

ช่วงความเชื่อมั่นบูตสทราปสำหรับค่าเฉลี่ยของการแจกแจงปัวซอง-อิชิตาตัดค่าศูนย์:
กรณีศึกษาจำนวนเหตุการณ์ความไม่สงบในจังหวัดชายแดนใต้ของไทย
Bootstrap Confidence Intervals for the Mean of Zero-truncated Poisson-Ishita
Distribution: A Case Study of the Number of Unrest Events
in the Southern Border Area of Thailand

วารุทธิ์ พานิชกิจโกศลกุล¹

E-mail: wararit@mathstat.sci.tu.ac.th

บทคัดย่อ

ในหลายสถานการณ์เกี่ยวข้องกับข้อมูลจำนวนนับตัดค่าศูนย์ และการแจกแจงปัวซอง-อิชิตาตัดค่าศูนย์ ซึ่งถูกนำไปใช้ในการกำหนดตัวแบบ อย่างไรก็ตาม ช่วงความเชื่อมั่นบูตสทราปสำหรับค่าเฉลี่ยของการแจกแจงปัวซอง-อิชิตาตัดค่าศูนย์ยังไม่ได้มีการนำเสนอ การศึกษานี้จึงได้นำเสนอช่วงความเชื่อมั่นแบบเปอร์เซ็นต์ไทล์บูตสทราป ช่วงความเชื่อมั่นแบบบูตสทราปอย่างง่าย และช่วงความเชื่อมั่นแบบบูตสทราปที่ปรับค่าเอนเอียง และเปรียบเทียบโดยพิจารณาความน่าจะเป็นคุ้มครองและความกว้างเฉลี่ยของช่วงความเชื่อมั่นด้วยวิธีการจำลองแบบมอนติคาร์โล ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่า ช่วงความเชื่อมั่นทุกวิธียังให้ค่าความน่าจะเป็นคุ้มครองไม่เข้าใกล้ระดับนัยสำคัญที่กำหนด เมื่อตัวอย่างมีขนาดเล็กในทุกๆ สถานการณ์ ยิ่งไปกว่านั้นเมื่อตัวอย่างมีขนาดใหญ่มากพอ ช่วงความเชื่อมั่นทุกวิธีจะผลการจำลองไม่แตกต่างกันมากนัก ในภาพรวมพบว่าช่วงความเชื่อมั่นบูตสทราปที่ปรับค่าเอนเอียงมีประสิทธิภาพมากกว่าช่วงความเชื่อมั่นวิธีอื่นๆ ถึงแม้ว่าตัวอย่างจะมีขนาดเล็กก็ตาม นอกจากนี้ ช่วงความเชื่อมั่นบูตสทราปแต่ละวิธีได้นำมาประยุกต์ใช้กับจำนวนเหตุการณ์ความไม่สงบในจังหวัดชายแดนใต้ของไทยโดยให้ผลลัพธ์สอดคล้องกับผลการจำลอง

คำสำคัญ: การประมาณค่าแบบช่วง การแจกแจงปัวซอง-อิชิตา ค่าเฉลี่ย วิธีบูตสทราป

Abstract

Many situations involve count data containing non-zero values and the zero-truncated Poisson-Ishita distribution can be used to model such data. However, confidence interval estimation for the mean has not yet been examined. In this study, the percentile, simple, and biased-corrected and accelerated bootstrap confidence intervals were examined in terms of coverage probability and average length via Monte Carlo simulation. The results indicate that attaining the nominal confidence level using the bootstrap confidence intervals was not possible for small sample sizes regardless of the other setting. Moreover, when a sample size was large, the performances of the bootstrap confidence intervals were not substantially different. Overall, the biased-corrected and accelerated bootstrap confidence interval outperformed the others, even for small sample sizes. Lastly, the bootstrap confidence intervals were used to estimate the population mean for the zero-truncated Poisson-Ishita distribution via the number of unrest events in the southern border area of Thailand, the results of which match those from the simulation study.

Keywords: Interval estimation, Poisson-Ishita distribution, mean, bootstrap method

¹ อาจารย์ประจำสาขาวิชาคณิตศาสตร์และสถิติ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

Introduction

The Poisson distribution is a discrete probability distribution that measures the probability of a given number of events happening in specific regions of time or space (Kissell and Poserina, 2017; Andrew and Michael, 2022). Data such as the number of orders a firm will receive tomorrow, the number of calls the firm receives next week for help concerning an “easy-to-assemble” toy, the number of defects in a finished product, the number of customers arriving at a checkout counter in a supermarket from 3 to 6 p.m., etc., (Siegel, 2016) follow a Poisson distribution.

The probability mass function (p.m.f.) of a Poisson distribution is defined as

$$p(x; \lambda) = \frac{e^{-\lambda} \lambda^x}{x!}, \quad x = 0, 1, 2, \dots, \lambda > 0, \quad (1)$$

where e is a constant approximately equal to 2.71828 and λ is the parameter of the Poisson distribution. This probability model is can be used to analyze data containing zeros and positive values that have low occurrence probabilities within a predefined time or area range (Sangnawakij, 2021). However, probability models can become truncated when a range of possible values for the variables is either disregarded or impossible to observe. Indeed, zero truncation is often enforced when one wants to analyze count data without zeros. David and Johnson (1952) developed the zero-truncated Poisson (ZTP) distribution, which has been applied to datasets of the length of stay in hospitals, the number of published journal articles in various disciplines, the number of children ever born to a sample of mothers over 40 years old, and the number of passengers in cars (Hussain, 2020). The zero-truncated distribution’s p.m.f. can be derived as

$$p(x; \theta) = \frac{p_0(x; \theta)}{1 - p_0(0; \theta)}, \quad x = 1, 2, 3, \dots, \quad (2)$$

where $p_0(x; \theta)$ is the p.m.f. of the un-truncated distribution. Shukla and Shanker (2019) defined the p.m.f. of the Poisson-Ishita (PI) distribution as

$$p_0(x; \theta) = \frac{\theta^3}{(\theta^3 + 2)} \frac{x^2 + 3x + (\theta^3 + 2\theta^2 + \theta + 2)}{(\theta + 1)^{x+3}}, \quad x = 0, 1, 2, \dots, \theta > 0. \quad (3)$$

The mathematical and statistical properties of the PI distribution for modeling biological science data were established by Shukla and Shanker (2019). The PI distribution arises from the Poisson distribution when parameter λ follows the Ishita distribution proposed by Shanker and Shukla (2017) with probability density function (p.d.f.)

$$f(\lambda; \theta) = \frac{\theta^3}{\theta^3 + 2} (\theta + \lambda^2) e^{-\theta \lambda}, \quad \lambda > 0, \theta > 0. \quad (4)$$

Shanker and Shukla (2017) showed that the p.d.f. in (4) is a better model than the exponential, Lindley (Lindley, 1958) and Akash (Shanker, 2015) distributions for modeling lifetime data. Many distributions have been introduced as an alternative to the zero-truncated Poisson distribution for handling over-dispersion in data, such as the zero-truncated Poisson-Lindley (ZTPL) (Ghitany et al., 2008), zero-truncated Poisson-Sujatha (ZTPS) (Shanker and Fesshaye, 2015) and zero-truncated Poisson-Akash (ZTPA) (Shanker, 2017b) distributions.

Recently, Shukla et al. (2020) proposed the zero-truncated Poisson-Ishita (ZTPI) distribution and its applications. The moment, coefficient of variation, skewness, kurtosis and the index of dispersion of ZTPI distribution had been proposed. The method of moments and the maximum likelihood method have also been

derived for estimating its parameter. Furthermore, when the ZTPI distribution was applied to two real data, it was more suitable than ZTP, ZTPL, ZTPS and ZTPA distributions.

To the best of our knowledge, no research has been conducted on estimating the bootstrap confidence intervals for the mean of the ZTPI distribution. Bootstrap confidence intervals provide a way of quantifying the uncertainties in statistical inference based on a sample of data. The concept is to run a simulation study based on the actual data for estimating the likely extent of sampling error (Wood, 2004). Therefore, the objective of the current study is to assess the efficiencies of three bootstrap confidence intervals for the population mean of ZTPI distribution, namely, the percentile bootstrap (PB), the simple bootstrap (SB), and the bias-corrected and accelerated (BCa) bootstrap methods. Because a theoretical comparison is not possible, we conduct a simulation study to compare their performances and used the results to determine the best-performing bootstrap confidence interval based on the coverage probability and the average length.

Theoretical Background

Compounding of probability distributions is a sound and innovative technique to obtain new probability distributions to fit data sets not adequately fit by common parametric distributions. Shukla and Shanker (2019) proposed a new compounding distribution by compounding Poisson distribution with Ishita distribution, as there is a need to find more flexible model for analyzing statistical data. The p.m.f. of the Poisson-Ishita distribution is given by in (3).

Let X be a random variable which follow ZTPI distribution with parameter θ , it is denoted as $X \sim \text{ZTPI}(\theta)$. Using Equations (2) and (3), the p.m.f. of ZTPI distribution can be obtained as

$$p(x; \theta) = \frac{\theta^3}{\theta^5 + 2\theta^4 + \theta^3 + 6\theta^2 + 6\theta + 2} \frac{x^2 + 3x + (\theta^3 + 2\theta^2 + \theta + 2)}{(\theta + 1)^x}, \quad x = 1, 2, 3, \dots, \theta > 0.$$

The plots of ZTPI distribution with some specified parameter values θ shown in Figure 1.

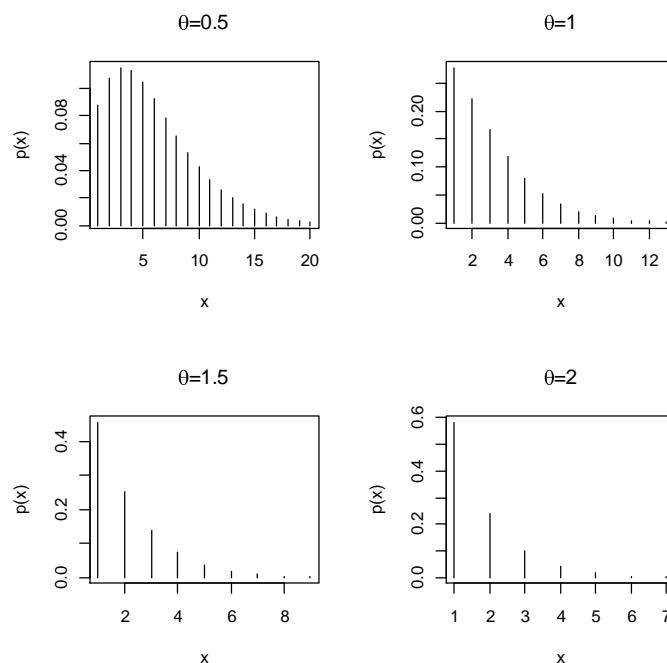


Figure 1. The plots of the mass function of the ZTPI distribution with $\theta = 0.5, 1, 1.5$ and 2

The expected value and variance of X are as follows:

$$E(X) = \mu = \frac{\theta^6 + 3\theta^5 + 3\theta^4 + 7\theta^3 + 18\theta^2 + 18\theta + 6}{\theta(\theta^5 + 2\theta^4 + \theta^3 + 6\theta^2 + 6\theta + 2)} \quad (5)$$

and

$$\text{var}(X) = \sigma^2 = \frac{(\theta+1)(\theta^{10} + 4\theta^9 + 6\theta^8 + 27\theta^7 + 69\theta^6 + 98\theta^5 + 136\theta^4 + 208\theta^3 + 180\theta^2 + 72\theta + 12)}{\theta^2(\theta^5 + 2\theta^4 + \theta^3 + 6\theta^2 + 6\theta + 2)^2}.$$

The point estimator of θ is obtained by maximizing the log-likelihood function $\log L(x_i; \theta)$ or the logarithm of joint p.m.f. of X_1, X_2, \dots, X_n . Therefore, the maximum likelihood (ML) estimator for θ of the ZTPI distribution is derived by the following processes:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \theta} \log L(x_i; \theta) &= \frac{\partial}{\partial \theta} \left[n \log \left(\frac{\theta^3}{\theta^5 + 2\theta^4 + \theta^3 + 6\theta^2 + 6\theta + 2} \right) - \sum_{i=1}^n x_i \log(\theta+1) \right. \\ &\quad \left. + \sum_{i=1}^n \log [x_i^2 + 3x_i + (\theta^3 + 2\theta^2 + \theta + 2)] \right] \\ &= \frac{3n}{\theta} - \frac{n(5\theta^4 + 8\theta^3 + 3\theta^2 + 12\theta + 6)}{\theta^5 + 2\theta^4 + \theta^3 + 6\theta^2 + 6\theta + 2} - \frac{n\bar{x}}{\theta+1} + \sum_{i=1}^n \frac{(3\theta^2 + 4\theta + 1)}{x_i^2 + 3x_i + (\theta^3 + 2\theta^2 + \theta + 2)}. \end{aligned}$$

Solving the equation $\frac{\partial}{\partial \theta} \log L(x_i; \theta) = 0$ for θ , we have the non-linear equation

$$\frac{3n}{\theta} - \frac{n(5\theta^4 + 8\theta^3 + 3\theta^2 + 12\theta + 6)}{\theta^5 + 2\theta^4 + \theta^3 + 6\theta^2 + 6\theta + 2} - \frac{n\bar{x}}{\theta+1} + \sum_{i=1}^n \frac{(3\theta^2 + 4\theta + 1)}{x_i^2 + 3x_i + (\theta^3 + 2\theta^2 + \theta + 2)} = 0,$$

where $\bar{x} = \sum_{i=1}^n x_i / n$ denotes the sample mean. Since the ML estimator for θ does not provide the closed-form solution, the non-linear equation can be solved by the numerical iteration methods such as Newton-Raphson method, bisection method and Ragula-Falsi method. In this paper, we use maxLik package (Henningesen and Toomet, 2011) with Newton-Raphson method for ML estimation in the statistical software R.

The point estimator of the population mean ($\hat{\mu}$) can be estimated by replacing the parameter θ with the ML estimator for θ shown in Equation (5). Therefore, the point estimator of the population mean ($\hat{\mu}$) is given by

$$\hat{\mu} = \frac{\hat{\theta}^6 + 3\hat{\theta}^5 + 3\hat{\theta}^4 + 7\hat{\theta}^3 + 18\hat{\theta}^2 + 18\hat{\theta} + 6}{\hat{\theta}(\hat{\theta}^5 + 2\hat{\theta}^4 + \hat{\theta}^3 + 6\hat{\theta}^2 + 6\hat{\theta} + 2)},$$

where $\hat{\theta}$ is the ML estimator for θ . It is obvious that the point estimator of the population mean ($\hat{\mu}$) is different from the parameter estimator ($\hat{\theta}$).

Bootstrap Confidence Interval Methods

In this study, we focus on the three bootstrap confidence interval methods that are most popular in practice: percentile bootstrap, simple bootstrap, and bias-corrected and accelerated bootstrap confidence intervals.

1. Percentile bootstrap (PB) method

The percentile bootstrap confidence interval is the interval between the $(\alpha/2) \times 100$ and $(1 - (\alpha/2)) \times 100$ percentiles of the distribution of μ estimates obtained from resampling or the distribution of $\hat{\mu}^*$, where μ represents a parameter of interest and α is the level of significance (e.g., $\alpha = 0.05$ for 95% confidence intervals) (Efron, 1982). A percentile bootstrap confidence interval for μ can be obtained as follows:

- 1) B random bootstrap samples are generated,
- 2) a parameter estimate $\hat{\mu}^*$ is calculated from each bootstrap sample,
- 3) all B bootstrap parameter estimates are ordered from the lowest to highest, and
- 4) the $(1 - \alpha)100\%$ percentile bootstrap confidence interval is constructed as follows:

$$CI_{PB} = [\hat{\mu}_{(r)}^*, \hat{\mu}_{(s)}^*], \quad (6)$$

where $\hat{\mu}_{(\alpha)}^*$ denotes the α^{th} percentile of the distribution of $\hat{\mu}^*$ and $0 \leq r < s \leq 100$. For example, a 95% percentile bootstrap confidence interval with 1000 bootstrap samples is the interval between the 2.5 percentile value and the 97.5 percentile value of the 1000 bootstrap parameter estimates.

2. Simple bootstrap (SB) method

The simple bootstrap method is sometimes called the basic bootstrap method and is a method as easy to apply as the percentile bootstrap method. Suppose that the quantity of interest is μ and that the estimator of μ is $\hat{\mu}$. The simple bootstrap method assumes that the distributions of $\hat{\mu} - \mu$ and $\hat{\mu}^* - \hat{\mu}$ are approximately the same (Meeker et al. 2017). The $(1 - \alpha)100\%$ simple bootstrap confidence interval for μ is

$$CI_{SB} = [2\hat{\mu} - \hat{\mu}_{(s)}^*, 2\hat{\mu} - \hat{\mu}_{(r)}^*], \quad (7)$$

where the quantiles $\hat{\mu}_{(r)}^*$ and $\hat{\mu}_{(s)}^*$ are the same percentile of empirical distribution of bootstrap estimates $\hat{\theta}^*$ used in (6) for the percentile bootstrap method.

3. Bias-corrected and accelerated (BCa) bootstrap method

To overcome the over coverage issues in percentile bootstrap confidence intervals (Efron and Tibshirani, 1993), the BCa bootstrap method corrects for both bias and skewness of the bootstrap parameter estimates by incorporating a bias-correction factor and an acceleration factor (Efron, 1987; Efron and Tibshirani, 1993). The bias-correction factor \hat{z}_0 is estimated as the proportion of the bootstrap estimates less than the original parameter estimate $\hat{\mu}$,

$$\hat{z}_0 = \Phi^{-1} \left(\frac{\#\{\hat{\mu}^* \leq \hat{\mu}\}}{B} \right),$$

where Φ^{-1} is the inverse function of a standard normal cumulative distribution function (e.g., $\Phi^{-1}(0.975) \approx 1.96$). The acceleration factor \hat{a} is estimated through jackknife resampling (i.e., “leave one out” resampling), which involves generating n replicates of the original sample, where n is the number of observations in the sample. The first jackknife replicate is obtained by leaving out the first case ($i = 1$) of the original sample, the second by

leaving out the second case ($i = 2$), and so on, until n samples of size $n - 1$ are obtained. For each of the jackknife resamples, $\hat{\mu}_{(-i)}$ is obtained. The average of these estimates is

$$\hat{\mu}_{(.)} = \frac{\sum_{i=1}^n \hat{\mu}_{(-i)}}{n}.$$

Then, the acceleration factor \hat{a} is calculated as follow,

$$\hat{a} = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{\mu}_{(.)} - \hat{\mu}_{(-i)})^3}{6 \left\{ \sum_{i=1}^n (\hat{\mu}_{(.)} - \hat{\mu}_{(-i)})^2 \right\}^{3/2}}.$$

With the values of \hat{z}_0 and \hat{a} , the values α_1 and α_2 are calculated,

$$\alpha_1 = \Phi \left\{ \hat{z}_0 + \frac{\hat{z}_0 + z_{\alpha/2}}{1 - \hat{a}(\hat{z}_0 + z_{\alpha/2})} \right\} \quad \text{and} \quad \alpha_2 = \Phi \left\{ \hat{z}_0 + \frac{\hat{z}_0 + z_{1-\alpha/2}}{1 - \hat{a}(\hat{z}_0 + z_{1-\alpha/2})} \right\},$$

where $z_{\alpha/2}$ is the α quantile of the standard normal distribution (e.g. $z_{0.05/2} = -1.96$). Then, the $(1 - \alpha)100\%$ BCA bootstrap confidence interval for μ is as follows

$$CI_{BCa} = [\hat{\mu}_{(\alpha_1)}^*, \hat{\mu}_{(\alpha_2)}^*], \quad (8)$$

where $\hat{\mu}_{(\alpha)}^*$ denotes the α^{th} percentile of the distribution of $\hat{\mu}^*$.

Simulation Study

In this study, the bootstrap confidence intervals for the mean of a ZTPI distribution are determined. Because a theoretical comparison is not possible, a Monte Carlo simulation study was designed using R version 4.2.2 statistical software (Ihaka and Gentleman, 1996) and conducted to compare the performances of three bootstrap confidence intervals for the mean in a ZTPI distribution. The study was designed to cover cases with different sample sizes, as $n = 10, 25, 50, 75$ and 100 , reflecting small to large samples. To observe the effect of small and large variances, the true parameter (θ) was given by $0.25, 0.5, 0.75, 1$ and 2 , and the population means μ are $12.0523, 6.0968, 4.1094, 3.1111$ and 1.7182 , respectively. It shows that the mean and variance of random variables will decrease as the value of θ increases. $B = 1000$ bootstrap samples of size n were generated from the original sample and each simulation was repeated 5000 times. Without loss of generality, the confidence level $(1 - \alpha)$ was set at 0.95 . The performances of the bootstrap confidence intervals were compared in terms of their coverage probabilities and average lengths. The one with a coverage probability greater than or close to the nominal confidence level means that it contains the true value and can be used to precisely estimate the confidence interval for the mean.

Table 1. Coverage probability and average length of the 95% bootstrap confidence intervals for μ in the ZTPI distribution

n	θ	μ	Coverage probability			Average length		
			PB	SB	BCa	PB	SB	BCa
10	2	1.7182	0.8596	0.8124	0.9354	1.2000	1.2003	1.3755
	1	3.1111	0.8946	0.8666	0.9096	2.5049	2.5059	2.6504
	0.75	4.1094	0.8860	0.8706	0.8910	3.2019	3.1999	3.3505
	0.5	6.0968	0.8814	0.8652	0.8878	4.5973	4.5999	4.8053
	0.25	12.0523	0.8838	0.8740	0.8872	8.5869	8.5910	8.9717
25	2	1.7182	0.9134	0.8948	0.9378	0.8239	0.8239	0.8773
	1	3.1111	0.9220	0.9056	0.9306	1.6627	1.6635	1.7086
	0.75	4.1094	0.9276	0.9174	0.9294	2.1769	2.1772	2.2318
	0.5	6.0968	0.9244	0.9170	0.9272	3.1100	3.1124	3.1889
	0.25	12.0523	0.9212	0.9152	0.9268	5.7835	5.7859	5.9211
50	2	1.7182	0.9310	0.9204	0.9400	0.5950	0.5946	0.6146
	1	3.1111	0.9432	0.9352	0.9420	1.2053	1.2057	1.2248
	0.75	4.1094	0.9402	0.9362	0.9400	1.5667	1.5678	1.5877
	0.5	6.0968	0.9430	0.9370	0.9424	2.2455	2.2473	2.2779
	0.25	12.0523	0.9356	0.9334	0.9358	4.1784	4.1760	4.2344
75	2	1.7182	0.9334	0.9222	0.9426	0.4883	0.4887	0.5002
	1	3.1111	0.9416	0.9364	0.9408	0.9908	0.9903	1.0022
	0.75	4.1094	0.9436	0.9390	0.9434	1.2886	1.2887	1.3004
	0.5	6.0968	0.9404	0.9380	0.9418	1.8493	1.8475	1.8651
	0.25	12.0523	0.9466	0.9422	0.9474	3.4443	3.4450	3.4761
100	2	1.7182	0.9396	0.9286	0.9454	0.4237	0.4237	0.4311
	1	3.1111	0.9436	0.9398	0.9444	0.8605	0.8602	0.8672
	0.75	4.1094	0.9416	0.9358	0.9444	1.1208	1.1205	1.1286
	0.5	6.0968	0.9466	0.9456	0.9462	1.6084	1.6074	1.6187
	0.25	12.0523	0.9416	0.9420	0.9382	2.9885	2.9857	3.0071

The results of the study are reported in Table 1 and Figures 2-3. For $n = 10$, the coverage probabilities of the three confidence intervals tended to be less than 0.90, except in a few cases where the values of μ are less or equal to 3.1111 for BCa bootstrap method. The nominal confidence level of SB method is difficult to reach in circumstances where $\mu = 1.7182$ and $n = 10$. Generally, as sample size increases, the coverage probability tends to increase and approach 0.95. The average length also obviously increases when the value of μ increases; this is because of the relationship between the variance and μ value. Unsurprisingly, as sample size increases, the average length falls. It can be as small as approximately 0.8239 when μ is at 1.7182 and the sample size is 25; the largest average length, 5.9211, occurs when $\mu = 12.0523$ and $n = 25$ in the case of BCa method. Furthermore, the average lengths of PB method are similar to those of SB method in all situations.

The performances of the three confidence intervals differed when the variance of the distribution was small (i.e., $\text{var}(X) = 5.0185, 1.2602$ for $\mu = 3.1111, 1.7182$, respectively) and n was small (i.e., $n = 25$); the BCa bootstrap method outperform the PB and SB methods in terms of coverage probability. For a small sample size, a larger variance (i.e., $\text{var}(X) = 59.3808, 17.2077, 8.4358$ for $\mu = 12.0523, 6.0968, 4.1094$, respectively) provided similar performances from all three confidence intervals.

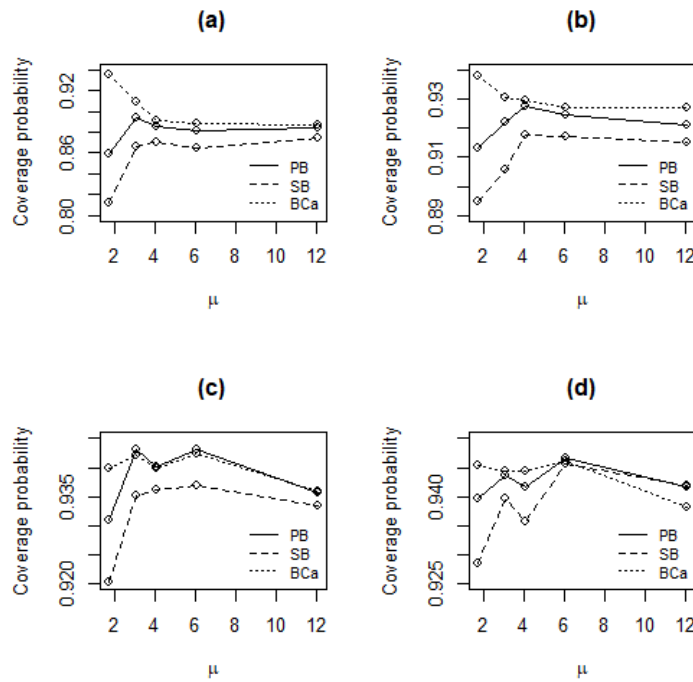


Figure 2. Coverage probability of the 95% bootstrap confidence intervals for μ in the ZTPI distribution when (a) $n = 10$ (b) $n = 25$ (c) $n = 50$ (d) $n = 100$

Numerical Example

We used a real-world example to demonstrate the applicability of the bootstrap confidence intervals for the mean of the ZTPI distribution established in the preceding section. The number of unrest events occurring in the southern border area of Thailand from July 2020 to October 2022 collected by the Southern Border Area News Summarizes (SBAN Summarizes) (<http://summarise.wbns.oas.psu.ac.th>) was used for this example (the total sample size is 28). The number of unrest events per month during this time period in the five southern provinces of Pattani, Yala, Narathiwat, Songkhla, and Satun is reported in Table 2 and Figure 4. For the goodness-of-fit test (Turhan, 2020) in Table 2, it is obvious from the chi-square statistic and p-value that the ZTPI distribution gives much closer than the ZTPL and ZTPS distributions. Therefore, a ZTPI distribution with $\hat{\theta} = 0.4532$ is suitable for this dataset. The point estimator of the population mean is 6.7100. Table 3 and Figure 5 reported the 95% bootstrap confidence intervals for the mean of the ZTPI distribution. The estimated parameter $\hat{\theta}$ is between 0.25 and 0.5. The results correspond with the simulation results for $n = 25$ because the average lengths of the PB and SB methods were shorter than those of the BCa bootstrap method. According to the simulation results, the coverage probability should be 0.92.

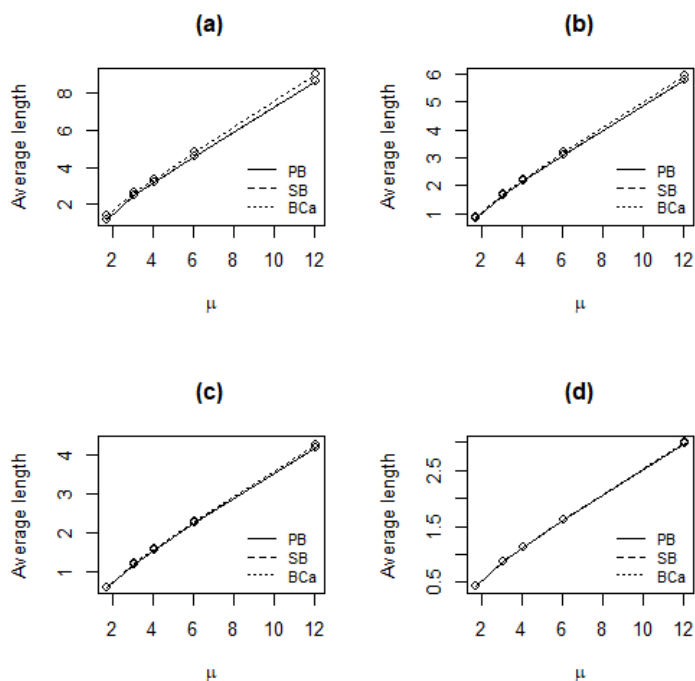


Figure 3. Average length of the 95% bootstrap confidence intervals for μ in the ZTPI distribution when (a) $n = 10$ (b) $n = 25$ (c) $n = 50$ (d) $n = 100$

Table 2. The number of unrest events and expected frequency in the southern border area of Thailand

Number of unrest events	Observed frequency	Expected frequency		
		ZTPL	ZTPS	ZTPI
1	3	3.0731	2.3069	2.0016
2	1	3.1064	2.7231	2.5728
3	3	2.9694	2.8944	2.8708
4	2	2.7370	2.8675	2.9250
5	4	2.4591	2.7018	2.7995
6	3	2.1678	2.4518	2.5601
7	4	1.8832	2.1611	2.2616
≥ 8	8	9.6040	9.8934	10.0086
ML Estimator		0.2900	0.4252	0.4532
Chi-square statistic		5.5611	4.2384	4.0875
d.f.		6	6	6
p-value		0.4741	0.6444	0.6648

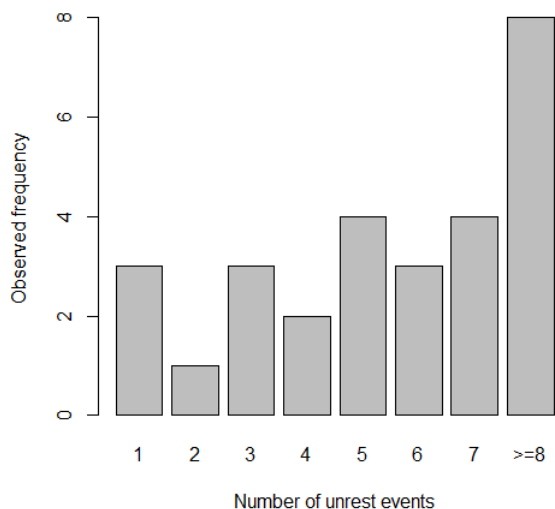


Figure 4. The number of unrest events in the southern border area of Thailand

Table 3. The 95% bootstrap confidence intervals and corresponding widths using all intervals for the mean in the unrest events example

Methods	Confidence intervals	Widths
PB	(5.1867, 8.2769)	3.0908
SB	(5.1456, 8.1951)	3.0495
BCa	(5.1896, 8.4390)	3.2494

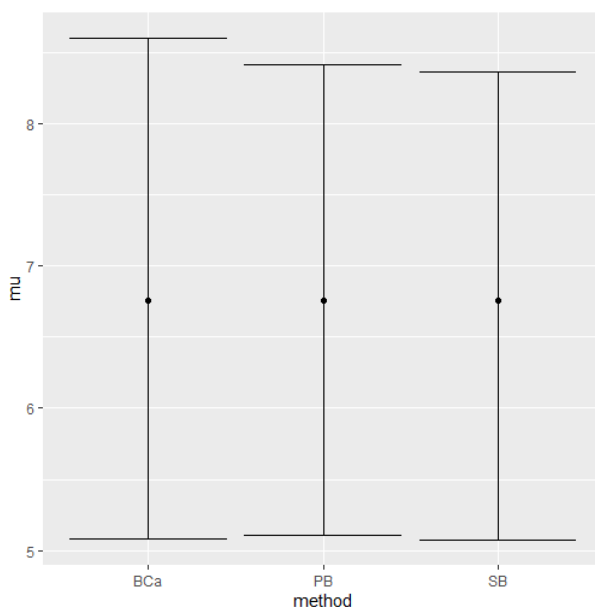


Figure 5. The 95% bootstrap confidence intervals for the mean in the unrest events example

Conclusions

The bootstrap confidence intervals of the mean of the zero-truncated Poisson-Ishita distribution are investigated in this study. At $n = 10$, all coverage probabilities are substantially lower than 0.90. A sample size of 25 is still insufficient to achieve the nominal confidence level for all θ 's and bootstrap confidence intervals. When the sample size is large enough, i.e., greater than or equal to 50, the coverage probabilities from three bootstrap methods, as well as the average length, are not markedly different. According to our findings, the BCa bootstrap method performs best even with small sample sizes as long as the variance of the ZTPI distribution is not too large.

Acknowledgements

The author would like to thank the reviewers for the valuable comments and suggestions to improve this paper.

References

- Andrew, F. S., & Michael, R. W. (2022). **Practical business statistics**. Academic Press.
- Beran, R. (1987). Pivoting to reduce level error of confidence sets. **Biometrika**. 74(3), 457–468.
- David, F. N., & Johnson, N. L. (1952). The truncated Poisson. **Biometrics**. 8(4), 275–285.
- Donna, L. M., Wilson, W. J., & Freund, R. J. (2022). **Statistical methods**. Academic Press.
- Efron, B. (1982). **The Jackknife, the bootstrap, and other resampling plans**, in CBMS-NSF Regional Conference Series in Applied Mathematics, Monograph 38 (Philadelphia, PA: SIAM).
- Efron, B. (1987). Better bootstrap confidence intervals. **Journal of the American Statistical Association**. 82(397), 171–185.
- Efron, B., & Tibshirani, R. J. (1993). **An Introduction to the bootstrap**. Chapman and Hall.
- Finney, D. J., & Varley, G. C. (1955). An example of the truncated Poisson distribution. **Biometrics**. 11(3), 387–394.
- Garman, P. (1923). The European red mites in Connecticut apple orchards. **Connecticut Agricultural Experiment Station Bulletin**. 252, 103–125.
- Ghitany, M. E., Al-Mutairi, D. K., & Nadarajah, S. (2008). Zero-truncated Poisson-Lindley distribution and its application. **Mathematics and Computers in Simulation**. 79(3), 279–287.
- Henningsen, A., & Toomet, O. (2011). maxLik: A package for maximum likelihood estimation in R. **Computational Statistics**. 26(3), 443–458.
- Hussain, T. (2020). A zero truncated discrete distribution: Theory and applications to count data. **Pakistan Journal of Statistics and Operation Research**. 16(1), 167–190.
- Ihaka, R., & Gentleman, R. (1996). R: A language for data analysis and graphics. **Journal of Computational and Graphical Statistics**. 5(3), 299–314.
- Kissell, R., & Poserina, J. **Optimal sports math, statistics, and fantasy**. Academic Press.
- Letson, D., & McCullough, B. D. (1998). Better confidence intervals: The double bootstrap with no pivot. **American Journal of Agricultural Economics**. 80(3), 552–559.
- Lindley, D. V. (1958). Fiducial distributions and Bayes' theorem. **Journal of the Royal Statistical Society: Series B**. 20(1), 102–107.
- McCullough, B. D., & Vinod, H. D. (1998). Implementing the double bootstrap. **Computational Economics**. 12(1), 79–95.
- Meeker, W. Q., Hahn, G. J., & Escobar, L. A. (2017). **Statistical intervals: A guide for practitioners and researchers**. John Wiley and Sons.
- Sangnawakij, P. (2021). Confidence interval for the parameter of the zero-truncated Poisson distribution. **The Journal of Applied Science**. 20(2), 13–22.
- Shanker, R. (2015). Akash distribution and its applications. **International Journal of Statistics and Probability**. 4(3), 65–75.
- Shanker, R. (2017a). The discrete Poisson-Akash distribution. **International Journal of Statistics and Probability**. 6(1), 1–10.
- Shanker, R. (2017b). Zero-truncated Poisson-Akash distribution and its applications. **American Journal of Mathematics and Statistics**. 7(6), 227–236.
- Shanker, R., & Feshshaye, H. (2015). Zero-truncated Poisson-Sujatha distribution with applications. **Journal of Ethiopian Statistical Association**. 24, 55–63.



- Shanker, R., & Shukla, K. K. (2017). Ishita distribution and its application to model lifetime data. **Biometrics and Biostatistics International Journal**. 5(2), 1–9.
- Shukla, K. K., & Shanker, R. (2019). A discrete Poisson-Ishita distribution and its applications. **International Journal of Economics and Statistics**. 20(2), 109–122.
- Shukla, K. K., & Shanker, R., & Tiwari, M. K. Zero-truncated Poisson-Ishita distribution and its application. **Journal of Scientific Research**. 64(2), 287–294.
- Siegel, A. F. (2016). **Practical business statistics**. Academic Press.
- Simonoff, J. S. (2003). **Analyzing categorical data**. Springer.
- Turhan, N. S. (2020). Karl Pearson’s chi-square tests. **Educational Research Review**. 15(9), 575–580.
- Wood, M. (2004). Statistical inference using bootstrap confidence intervals. **Significance**. 1(4), 180–182.

โครงสร้างและสภาพขอบนน้ำของฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ที่เคลือบด้วยดีซีแมกนีตรอนสเปตเตอริง Structural and Wettability Property of DC Magnetron Sputtered CrN Thin Films

อดิศร บุรณวงศ์¹ นรินทร์ วิทิตอนันต์^{2*}

E-mail: adisornb@buu.ac.th; nirun@buu.ac.th

บทคัดย่อ

ฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ (CrN) ถูกเคลือบบนแผ่นซิลิคอนและกระจกสไลด์ด้วยวิธีดีซีแมกนีตรอนสเปตเตอริงโดยการแปรค่าอัตราไหลแก๊สไนโตรเจนตั้งแต่ 5 ถึง 15 sccm เพื่อศึกษาผลของอัตราไหลแก๊สไนโตรเจนต่อโครงสร้างและสภาพขอบนน้ำของฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ที่เคลือบได้โดยการศึกษาด้วยเทคนิค XRD, EDS, AFM, FE-SEM และเครื่องวัดมุมสัมผัส ผลการศึกษาพบว่าฟิล์มบางที่เคลือบได้คือฟิล์มโครเมียมไนไตรด์ระนาบ (111), (200), (220) และ (311) โดยมีค่าคงที่แลตทิซในช่วง 4.136 - 4.159 Å ขนาดผลึกมีค่าลดลงจาก 28 nm เป็น 22 nm ค่าความหยาบผิวเฉลี่ย (R_a) ลดลงจาก 4.0 nm เป็น 2.3 nm เมื่ออัตราไหลแก๊สไนโตรเจนเพิ่มขึ้นโดยอัตราเคลือบและความหนาฟิล์มจากผลของ FE-SEM พบว่ามีค่าลดลงจาก 28.42 เป็น 20.33 nm/min และ 1705 เป็น 1220 nm ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าฟิล์มที่เคลือบด้วยอัตราไหลแก๊สไนโตรเจนต่ำ (5 และ 10 sccm) ฟิล์มมีความหยาบผิวสูงและแสดงสมบัติไฮโดรฟิลิก ส่วนฟิล์มเคลือบด้วยอัตราไหลแก๊สไนโตรเจนสูง (15 sccm) ฟิล์มมีความหยาบผิวต่ำและแสดงสมบัติไฮโดรโฟบิก ผลการศึกษาครั้งนี้แสดงให้เห็นว่าอัตราไหลแก๊สไนโตรเจนเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญของการเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีดีซีแมกนีตรอนสเปตเตอริง ซึ่งส่งผลต่อโครงสร้างผลึก ลักษณะพื้นผิว ความหยาบผิวและสภาพขอบนน้ำของฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์

คำสำคัญ: โครเมียมไนไตรด์ แมกนีตรอนสเปตเตอริง สภาพขอบนน้ำ ฟิล์มบาง

Abstract

The CrN thin films were deposited on silicon and glass slides by the DC magnetron sputtering method through adjusting N_2 gas flow rate from 5 to 15 sccm. The effect of N_2 gas flow rate on the structure and wettability of the as-deposited CrN thin films were investigated using XRD, EDS, AFM, FE-SEM, and contact angle measurement. The results show that the as-deposited thin film is a CrN film, with (111), (200), (220), and (311) plane, which is the lattice constant in the range of 4.136 - 4.159 Å. The crystallite size decreased from 28 nm to 22 nm. The average roughness (R_a) value gradually declined from 4.0 nm to 2.3 nm, as the N_2 flow rate increased. Consequently, both declination from 28.42 to 20.33 nm/min and 1705 to 1220 nm for deposition rate and thickness analyzed from FE-SEM result. In addition, the as-deposited at a low N_2 flow rate (5 and 10 sccm) have high surface roughness performed the hydrophilic property, while the highest N_2 flow rate (15 sccm) has low surface roughness performed the hydrophobic property. The results articulate that the N_2 flow rate was one of the important process parameters in the DC magnetron sputtering method that could affect the crystal structure, surface morphology, roughness value, and wettability of CrN thin films.

Keywords: CrN, Magnetron sputtering, wettability, thin films

ความเป็นมาของปัญหา

ปัจจุบันกระบวนการปรับปรุงพื้นผิวของวัสดุเพื่อเปลี่ยนแปลงหรือพัฒนาสมบัติเชิงผิวของชิ้นงานของเครื่องมือช่างอาชีพ อุปกรณ์สำหรับก๊าด ตัด เจาะ แม่พิมพ์สำหรับขึ้นรูปโลหะ ตลับลูกปืนและชิ้นส่วนเครื่องจักร เพื่อยืดอายุการใช้งานเริ่มมีความสำคัญอย่างมากสำหรับงานอุตสาหกรรม (Hosokawa et al., 2012; Li et al., 2020) ทั้งนี้ฟิล์มบางแข็งของโลหะทรานซิชันไนไตรด์ เช่น ไทเทเนียมไนไตรด์ (TiN) และโครเมียมไนไตรด์ (CrN) เป็นชั้นเคลือบแข็งที่ได้รับความนิยมในการวิจัยและพัฒนา ตลอดจนมีการนำมาใช้งานอย่างกว้างขวาง เนื่องจากชั้นเคลือบทั้งสองมีสมบัติเชิงกลและไตรโบโลยี (tribology) ที่ดี ซึ่งช่วยต้านการขัดสีระหว่างการใช้งาน อีกทั้งยังมีสมบัติด้านการกัดกร่อนของสารเคมี ทำให้ชั้นเคลือบแข็งของไทเทเนียมไนไตรด์และโครเมียมไนไตรด์เหมาะสำหรับการประยุกต์ใช้ด้านวิศวกรรม (Wan et al., 2019; González-Carmona et al., 2020; Chen et al., 2020)

^{1,2} อาจารย์ประจำสาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

ทั้งนี้ฟิล์มบางแข็งที่นิยมใช้ในช่วงแรกคือ ไทเทเนียมไนไตรด์ (TiN) เนื่องจากมีความแข็งสูงมาก มีเสถียรภาพทางเคมีที่ดี มีความต้านทานไฟฟ้าต่ำและทนต่อการสึกหรอได้ดี แต่มีข้อด้อยเพราะฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์เตรียมได้ค่อนข้างยาก อย่างไรก็ตามฟิล์มบางแข็งอีกชนิดหนึ่งที่มีความน่าสนใจคือโครเมียมไนไตรด์ เนื่องจากโครเมียมไนไตรด์มีสมบัติเชิงกลและโทรโบโลยีที่ดีใกล้เคียงกับไทเทเนียมไนไตรด์กล่าวคือมีความแข็งสูง มีเสถียรภาพทางเคมีและความร้อน อีกทั้งยังมีความคงทนต่อการกัดกร่อน ด้านทานการเกิดออกซิเดชันและป้องกันการเกาะติดได้ดี และที่สำคัญโครเมียมไนไตรด์สามารถเตรียมได้ง่ายกว่าไทเทเนียมไนไตรด์ จากสมบัติที่ดีเหล่านี้ทำให้ฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์เป็นวัสดุที่มีศักยภาพและน่าสนใจ เมื่อเปรียบเทียบกับไทเทเนียมไนไตรด์ สำหรับนำมาใช้เป็นชั้นป้องกันสำหรับอุปกรณ์ช่วง ชิ้นส่วนเครื่องจักรและแม่พิมพ์ (mold) ในอุตสาหกรรมต่างๆ (Ruden et al., 2013; Ferreira et al., 2020) ดังนั้นฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์จึงนิยมนำมาใช้เคลือบผิวแม่พิมพ์เพื่อป้องกันปัญหาการเกาะติดระหว่างใช้งาน

การเตรียมฟิล์มบางเคลือบแข็งของโครเมียมไนไตรด์สามารถทำได้หลายวิธี แต่วิธีที่นิยมและได้รับความนิยมอย่างกว้างขวางคือการเคลือบด้วยไอกายภาพ (physical vapor deposition; PVD) ซึ่งเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นในสุญญากาศ โดยการเคลือบวิธีนี้กำลังได้รับความนิยมอย่างมากทั้งในด้านการวิจัยและพัฒนา รวมถึงการนำมาใช้งานจริงทางอุตสาหกรรม เนื่องจากเป็นวิธีการเคลือบที่ได้รับการยอมรับว่ามีประสิทธิภาพสูงและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมเนื่องจากไม่มีการใช้สารเคมี อย่างไรก็ตามการเคลือบด้วยไอกายภาพยังสามารถแบ่งแยกย่อยออกเป็นวิธีต่างๆ ได้อีกหลายวิธี โดยวิธีหนึ่งที่มีประสิทธิภาพและมีการนำมาใช้งานกันอย่างแพร่หลายคือวิธีแมกนีตรอนสปัตเตอริง เนื่องจากเป็นวิธีเคลือบที่สามารถควบคุมกระบวนการได้ง่าย มีอัตราเคลือบสูงและสามารถเคลือบชิ้นงานได้ทั้งอุณหภูมิห้อง ทำให้การเคลือบด้วยวิธีดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงเหมาะสำหรับใช้เคลือบชิ้นงานที่มีจำนวนมากซึ่งตรงตามความต้องการของภาคอุตสาหกรรม (Tan et al., 2011; Lin et al., 2011) นอกจากนี้การเคลือบฟิล์มบางแข็งของโครเมียมไนไตรด์ด้วยวิธีแมกนีตรอนสปัตเตอริงยังสามารถควบคุมลักษณะเฉพาะของฟิล์มได้ง่ายโดยการแปรค่าหรือควบคุมเงื่อนไขการเคลือบ (Subramanian et al., 2012; Zhang et al., 2013) เช่น การควบคุมความดัน อัตราไหลแก๊ส กำลังไฟฟ้า ฯลฯ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการควบคุมอัตราไหลแก๊สที่ใช้ในกระบวนการเคลือบซึ่งมีบทบาทสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างผลึก สันฐานวิทยาของพื้นผิว ความหยาบและสมบัติของฟิล์ม (Wan et al., 2010; Shan et al., 2014)

สมบัติสำคัญอย่างหนึ่งของชั้นเคลือบโครเมียมไนไตรด์คือ ป้องกันการติด (anti-sticking) ของผิวชิ้นงาน กล่าวคือชิ้นงานที่มีการเคลือบผิวจะมีความลื่น การยึดติดของสารอื่นเป็นไปได้อย่างน้อย ทั้งนี้ในกรณีแม่พิมพ์ฉีด (injection mold) ที่ใช้ในการผลิตชิ้นงานหรือผลิตภัณฑ์ประเภทพลาสติก เนื่องจากบางครั้งระหว่างใช้งานขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ พลาสติกที่ฉีดเข้าแม่พิมพ์เพื่อขึ้นรูปอาจมีการตักค้างติดอยู่กับผิวของแม่พิมพ์ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีปัญหา ซึ่งมีผลอย่างมากต่อการควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ การเคลือบผิวแม่พิมพ์ฉีดด้วยชั้นเคลือบที่เหมาะสมจะช่วยป้องกันไม่ให้พลาสติกเข้าไปติดตักค้างที่แม่พิมพ์ฉีดระหว่างกระบวนการผลิต (Yang et al., 2011) สำหรับการวิเคราะห์หรือประเมินความสามารถในการป้องกันการติดของพลาสติกในแม่พิมพ์ฉีด ระบุได้จากสภาพชอบน้ำ (wettability) ซึ่งหมายถึงความสามารถในการกระจายตัวของของเหลวบนพื้นผิวของวัสดุ โดยสภาพชอบน้ำวัดได้จากมุมสัมผัส (contact angle) ระหว่างหยดน้ำทดสอบกับพื้นผิวของวัสดุ (Praveen, 2019) ทั้งนี้สภาพชอบน้ำของพื้นผิววัสดุมีความสำคัญอย่างมากทั้งด้านทฤษฎีและการใช้งานจริงในอุตสาหกรรม โดยในช่วงทศวรรษที่ผ่านมาได้มีการศึกษาวิจัยและพัฒนา สมบัติไฮโดรฟิลิก (สมบัติชอบน้ำ) หรือ สมบัติไฮโดรโฟบิก (สมบัติไม่ชอบน้ำ) ของชั้นเคลือบหรือฟิล์มบางอย่างต่อเนื่อง ซึ่งพบว่าปัจจัยหนึ่งที่มีอิทธิพลอย่างมากต่อสมบัตินี้คือลักษณะสันฐานวิทยาของพื้นผิว โดยเฉพาะค่าความหยาบผิวของพื้นผิวของวัสดุที่สนใจ (ค่า R_a และ R_{rms}) โดยมีรายงาน การศึกษาวิจัยเกี่ยวกับผลของความหยาบผิวต่อสภาพชอบน้ำของฟิล์มบางที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการป้องกันการเกาะติดหลายบทความ (Berni et al., 2017; Knotek et al., 2019; Jiang et al., 2021)

จากสมบัติที่น่าสนใจของฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ทำให้มีการศึกษาวิจัยและพัฒนาทุกด้านครอบคลุมทั้งในด้านการเตรียม การวิเคราะห์และการประยุกต์ใช้ แต่ในช่วงที่ผ่านมาการวิจัยเกี่ยวกับสมบัติสภาพชอบน้ำของฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ที่เตรียมด้วยวิธีดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงในส่วนที่เกี่ยวข้องกับผลของโครงสร้างหรือลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางต่อสมบัติสภาพชอบน้ำมีอยู่น้อยมาก โดยในงานวิจัยนี้เป็นการรายงานผลการศึกษาคณะเตรียมและการศึกษาลักษณะเฉพาะของฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ที่เตรียมด้วยวิธีดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง รวมถึงผลของอัตราไหลแก๊สไนโตรเจนต่อโครงสร้างผลึก องค์ประกอบทางเคมี โครงสร้างจุลภาค ลักษณะพื้นผิวและสภาพชอบน้ำของฟิล์มโครเมียมไนไตรด์ที่เตรียมได้เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับงานวิจัยและประยุกต์ใช้ต่อไป

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาการเตรียมฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ด้วยวิธีดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง
2. เพื่อศึกษาผลของอัตราไหลแก๊สไนโตรเจนที่มีผลต่อโครงสร้างผลึก องค์ประกอบทางเคมี โครงสร้างจุลภาค ลักษณะพื้นผิวและสภาพชอบน้ำฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ที่เตรียมได้

วิธีดำเนินการวิจัย

1. การเตรียมฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์

ฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ในงานนี้เตรียมด้วยวิธีอีพิตักษีแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริงด้วยเครื่องเคลือบระบบสปัตเตอร์ริง (รูปที่ 1) ของภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ห้องเคลือบมีลักษณะเป็นทรงกระบอก เป่าสารเคลือบเป็นแผ่นกลม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.0 cm หนา 3.0 mm ติดที่แคโทดชนิดระบายความร้อนด้วยน้ำเย็นซึ่งติดกับแผ่นปิดบนของห้องเคลือบ พร้อมแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูง (High voltage power supply) กระแสตรงขนาด 3 A 1000 V ระบบเครื่องสูบลมสุญญากาศของเครื่องเคลือบประกอบด้วยเครื่องสูบลมแบบแพร่ไอ (Diffusion pump) ซึ่งมีเครื่องสูบลมโรตารี (Rotary pump) เป็นเครื่องสูบลม การวัดความดันในห้องเคลือบใช้ชุดวัดความดันของ PFEIFFER ซึ่งใช้ส่วนแสดงผลรุ่น TPG262 และใช้มาตรวัดความดันช่วงกว้าง (Full range gauge) รุ่น PKR251 สำหรับการเคลือบใช้แก๊สอาร์กอน (99.999%) เป็นแก๊สสปัตเตอร์ และแก๊สไนโตรเจน (99.995%) เป็นแก๊สไอพริกริยาโดยจ่ายผ่านเครื่องควบคุมอัตราไหลมวลแก๊สของ MKS รุ่น type247D

การเคลือบเริ่มจากนำวัสดุรองรับได้แก่แผ่นซิลิคอนสำหรับศึกษาโครงสร้างผลึกและกระจกสไลด์สำหรับศึกษาสภาพขบหน้า ซึ่งทำความสะอาดโดยการล้างด้วยอะซิโตนและไอโซโพรพานอลในเครื่องล้างอัลตราโซนิคเป็นเวลา 10 นาทีและเป่าให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน โดยวางวัสดุรองรับในห้องเคลือบห่างจากหน้าเป่าสารเคลือบเท่ากับ 10 cm จากนั้นลดความดันในห้องเคลือบให้เท่ากับ 5.0×10^{-5} mbar (Base Pressure; P_B) แล้วปล่อยแก๊สอาร์กอนและแก๊สไนโตรเจนเข้าห้องเคลือบ โดยกำหนดให้อัตราไหลแก๊สอาร์กอนมีค่าคงที่ตลอดการเคลือบเท่ากับ 20 sccm และ แปรค่าแก๊สไนโตรเจนในช่วง 5 ถึง 15 sccm ตามลำดับ ทั้งนี้ระหว่างการเคลือบควบคุมความดันรวมให้คงที่เท่ากับ 5.0×10^{-3} mbar (Working Pressure; P_W) ด้วยการปรับวาล์วสุญญากาศ โดยฟิล์มแต่ละชุดใช้เวลาเคลือบนาน 60 นาที และใช้กำลังสปัตเตอร์ริงที่ตลอดการเคลือบเท่ากับ 175 W สำหรับเงื่อนไขการเตรียมฟิล์มบางในการศึกษาครั้งนี้สรุปในตารางที่ 1

2. การศึกษาลักษณะเฉพาะและสภาพขบหน้าของฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์

ฟิล์มที่เตรียมได้ทั้งหมดนำไปศึกษาลักษณะเฉพาะด้วยเทคนิคต่างๆ ดังนี้

2.1 โครงสร้างผลึกของฟิล์มศึกษาด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction; XRD) จากเครื่องการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของ Bruker รุ่น D8 โดยตรวจวัดต่อเนื่องด้วยสเกล 0.02° แบบ 2θ -scan ระหว่างมุม 20 ถึง 80° ในโหมดฟิล์มบาง (Thin Film Mode) ด้วยมุมตกกระทบเฉียง เท่ากับ 3°

2.2 ขนาดผลึกของฟิล์มที่เคลือบได้คำนวณตามสมการของ Scherrer (Abdeltawab et al., 2011) จากสมการดังนี้

$$L = \frac{k\lambda}{\beta \cos\theta}$$

เมื่อ L คือ ขนาดผลึก

k คือ ค่าคงที่เท่ากับ 0.9

λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ ($\text{CuK}\alpha = 1.546 \text{ \AA}$)

β คือ ความกว้างครึ่งหนึ่งของพีกที่มีค่าความเข้มสูงสุด

θ คือ ครึ่งหนึ่งของมุมพีก

สำหรับค่าคงที่แลตทิซหาจากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางที่ได้ โดยใช้สมการการหาระยะห่างระหว่างระนาบของฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ที่มีโครงสร้างผลึกแบบเฟซเซ็นเตอร์คิวบิก (FCC) (Wolfe et al., 2011) จากสมการดังนี้

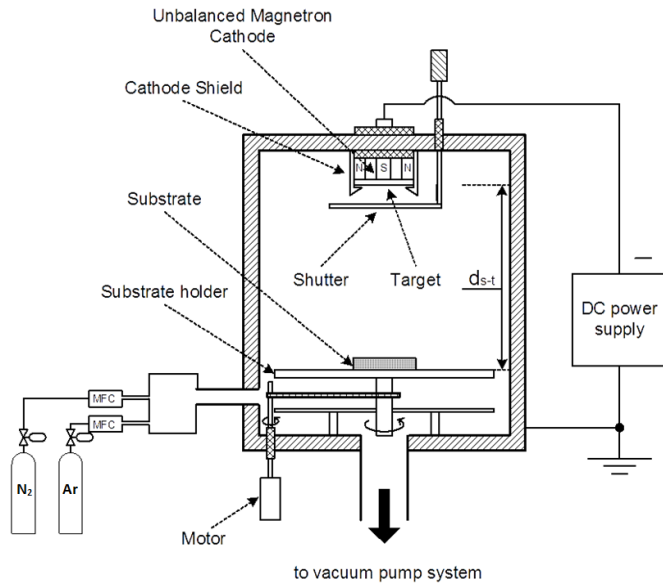
$$d_{hkl} = \frac{a}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}}$$

เมื่อ d_{hkl} คือ ระยะห่างระหว่างระนาบผลึก

a คือ ค่าคงที่แลตทิซ

hkl คือ ดัชนีมิลเลอร์ (Miller indices)

2.3 ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มที่เคลือบได้ ศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic Force Microscopy; AFM) ของ SEIKO รุ่น SPA400 ในโหมดแทปปิง (Tapping mode) (4) ความหยาบผิวของฟิล์มที่ได้คำนวณจากข้อมูลที่ได้จาก AFM เป็นค่าความหยาบผิวเฉลี่ย (R_a) และค่าความหยาบผิว rms (R_{rms}) (5) โครงสร้างจุลภาค ภาคตัดขวางและความหนาของฟิล์มศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Field Emission Scanning Electron Microscopy; FE-SEM) ของ Hitashi รุ่น s4700 (6) องค์ประกอบทางเคมี ศึกษาด้วยเทคนิคการวิเคราะห์การกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์ (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy; EDS) ของ EDAX ซึ่งติดตั้งต่อพ่วงอยู่กับกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด ของ LEO รุ่น 1450VP สำหรับการศึกษาสภาพขอบน้ำประเมิน จากค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำที่วัดจากเครื่องวัดมุมสัมผัสที่สร้างขึ้นเอง ซึ่งประกอบด้วยกล้อง CCD และโปรแกรมจับภาพแล้วนำมาวัดค่ามุมสัมผัส โดยวัดค่ามุมสัมผัสของฟิล์มโครเมียมไนไตรด์ชุดละ 5 จุด



ภาพที่ 1 ไดอะแกรมและลักษณะของเครื่องเคลือบที่ใช้ในงานวิจัย

ตารางที่ 1 เงื่อนไขการเคลือบฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์

พารามิเตอร์	รายละเอียด
เป้าสารเคลือบ	Cr (99.98%)
ระยะห่างระหว่างเป้าสารเคลือบกับวัสดุรองรับ	10 cm
ความดันพื้น	5.0×10^{-5} mbar
ความดันรวมขณะเคลือบ	5.0×10^{-3} mbar
อัตราไหลแก๊สอาร์กอน	20 sccm
อัตราไหลแก๊สไนโตรเจน	5, 10 และ 15 sccm
กำลังสปัตเตอริง	175 W
เวลาการเคลือบ	60 min

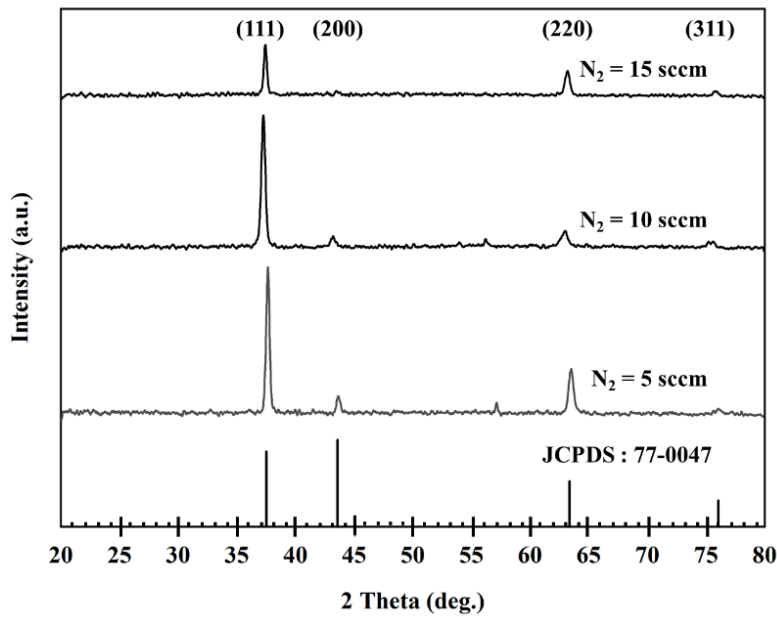
ผลการวิจัย

1. โครงสร้างผลึกของฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์

ภาพที่ 2 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ที่เคลือบบนแผ่นซิลิคอนเมื่อแปรค่าอัตราไหลแก๊สไนโตรเจน พบว่ารูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มที่ได้แปรตามอัตราไหลแก๊สไนโตรเจน โดยที่อัตราไหลแก๊สไนโตรเจนเท่ากับ 5 sccm พบรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่มุม 36.5° , 43.5° , 63.8° และ 74.9° สอดคล้องกับรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของโครเมียมไนไตรด์ระนาบ (111), (200), (220) และ (311) ตามฐานข้อมูล JCPDS (เลขที่ 77-0047) สำหรับรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่มุม 57.5° นั้นสอดคล้องกับรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของซิลิคอนที่ใช้เป็นวัสดุรองรับ ทั้งนี้ระนาบ (111) เป็น prefer orientation (ความเข้มของรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์มีค่าสูงสุด) เมื่ออัตราไหลแก๊สไนโตรเจนเพิ่มขึ้นเป็น 10 sccm พบว่า

รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ยังมีรูปแบบเดิม โดยความเข้มของรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ระนาบ (111) และ (220) มีค่าลดลง แต่ยังมีระนาบ (111) เป็นระนาบเด่น ขณะที่ระนาบ (200) และ (311) ความเข้มของรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์มีค่าคงที่ สุดท้ายเมื่ออัตราไหลแก๊สไนโตรเจนเพิ่มเป็น 15 sccm รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ยังคงเหมือนเดิม แต่ความเข้มของรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ระนาบ (111) ลดลงอย่างมาก ส่วนความเข้มของรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ระนาบ (200) และ (311) ยังคงมีค่าเท่าเดิม

ตารางที่ 2 แสดงขนาดผลึกและค่าคงที่แลตทิซฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ที่เคลือบได้เมื่อแปรค่าอัตราไหลแก๊สไนโตรเจน เมื่อพิจารณาขนาดผลึกของฟิล์มที่ได้จากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ซึ่งคำนวณจากสมการของ Scherrer พบว่าขนาดผลึกของฟิล์มมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามอัตราไหลแก๊สไนโตรเจน โดยที่อัตราไหลแก๊สไนโตรเจนเท่ากับ 5 sccm ผลึกมีขนาดเท่ากับ 28 nm และลดลงเป็น 26 nm เมื่อใช้อัตราไหลแก๊สไนโตรเจนเท่ากับ 10 sccm และสุดท้ายที่อัตราไหลแก๊สไนโตรเจนเท่ากับ 15 sccm ขนาดผลึกลดลงเหลือ 22 nm ส่วนค่าคงที่แลตทิซของฟิล์มที่ได้มีค่าในช่วง 4.136 - 4.159 Å ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นตามอัตราไหลแก๊สไนโตรเจน โดยค่าคงที่แลตทิซที่ได้ในงานวิจัยนี้ยังสอดคล้องกับข้อมูลของสารประกอบโครเมียมไนไตรด์ตามฐานข้อมูล JCPDS (เลขที่ 77-0047)



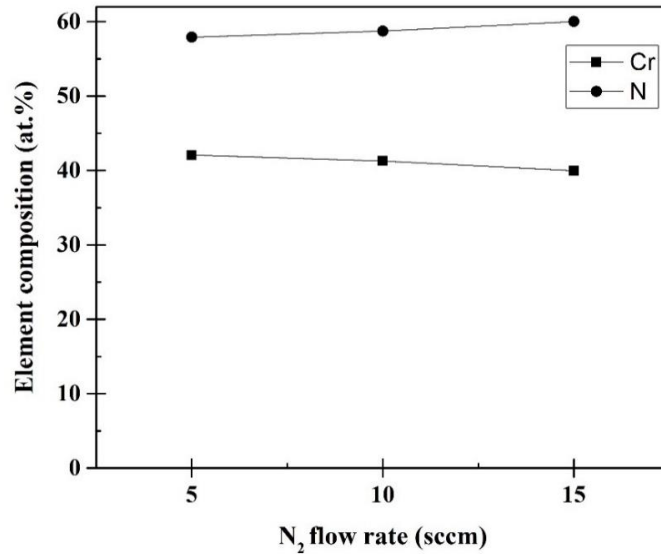
ภาพที่ 2 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ซึ่งเคลือบที่อัตราไหลแก๊สไนโตรเจนต่างๆ

ตารางที่ 2 ขนาดผลึก ค่าคงที่แลตทิซและองค์ประกอบทางเคมีของฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ซึ่งเคลือบที่อัตราไหลแก๊สไนโตรเจนต่างๆ

อัตราไหลแก๊สไนโตรเจน (sccm)	ขนาดผลึก (nm)	ค่าคงที่แลตทิซ (Å)	องค์ประกอบทางเคมี (at.%)		
			Cr	N	Cr:N
5	28	4.149	42.08	57.92	0.73
10	26	4.136	41.27	58.73	0.70
15	22	4.159	39.98	60.02	0.67

2. องค์ประกอบทางเคมีของฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์

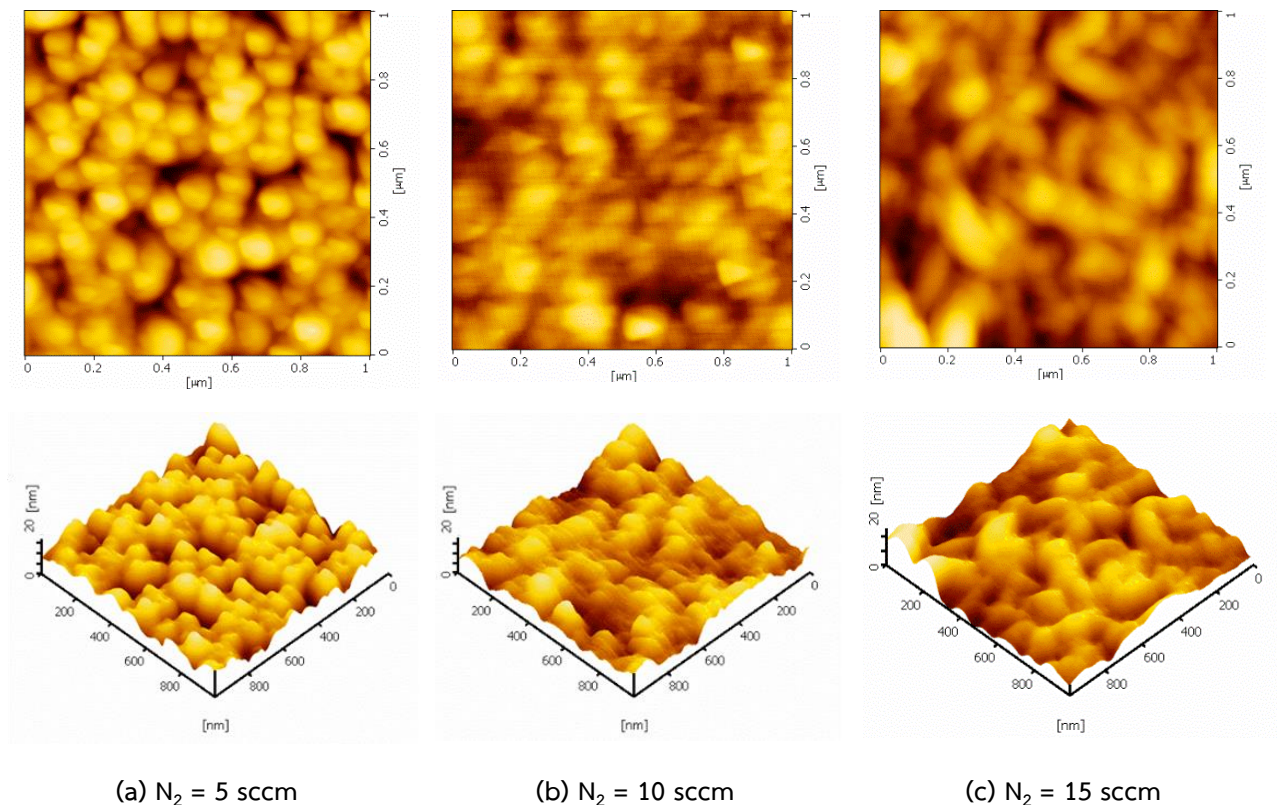
สำหรับองค์ประกอบทางเคมีของฟิล์มที่เคลือบได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS พบว่าฟิล์มบางที่เตรียมได้ทั้งหมดในงานวิจัยครั้งนี้มีอะตอมของธาตุโครเมียม (Cr) และ ไนโตรเจน (N) เป็นองค์ประกอบในสัดส่วนต่างๆ กัน ซึ่งแปรค่าตามอัตราไหลแก๊สไนโตรเจน สรุปดังตารางที่ 2 และภาพที่ 3 ซึ่งแสดงค่าองค์ประกอบทางเคมีของฟิล์มที่เป็นฟังก์ชันของอัตราไหลแก๊สไนโตรเจน โดยผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าอัตราไหลแก๊สไนโตรเจนมีบทบาทสำคัญต่อองค์ประกอบทางเคมีของฟิล์มที่เคลือบได้ โดยพบว่าเมื่ออัตราไหลแก๊สไนโตรเจนเพิ่มขึ้นจาก 5 sccm เป็น 15 sccm ปริมาณโครเมียมในเนื้อฟิล์มลดลงจาก 42.08 at.% เป็น 39.98 at.% ขณะที่ปริมาณไนโตรเจนเพิ่มขึ้นจาก 57.92 at.% เป็น 60.02 at.% โดยอัตราส่วนโครเมียมต่อไนโตรเจนมีค่าในช่วง 0.67 - 0.73 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ที่เคลือบได้ในงานนี้ทั้งหมดเป็นแบบ under stoichiometry



ภาพที่ 3 องค์ประกอบทางเคมีของฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ซึ่งเคลือบที่อัตราไหลแก๊สไนโตรเจนต่างๆ

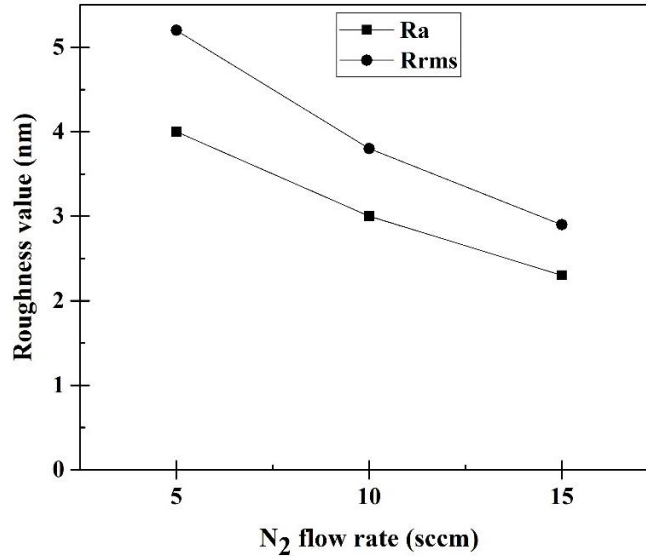
3. ลักษณะพื้นผิวและความหยาบผิวของฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์

ภาพที่ 4 เป็นภาพลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ซึ่งเคลือบด้วยอัตราไหลแก๊สไนโตรเจนในช่วง 5–15 sccm จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค AFM ของผิวหน้าฟิล์มในพื้นที่ $1 \times 1 \mu\text{m}^2$ ซึ่งแสดงทั้งแบบ 2D และ 3D โดยภาพจากเทคนิค AFM ของฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ซึ่งเคลือบด้วยอัตราไหลแก๊สไนโตรเจนเท่ากับ 5 sccm แสดงให้เห็นเกรนของฟิล์มที่มีลักษณะเป็นเม็ดกลมขนาดใหญ่เกาะกลุ่มกระจายอยู่ทั่วผิวหน้าของฟิล์ม และเมื่ออัตราไหลแก๊สไนโตรเจนเพิ่มขึ้นเป็น 10 sccm พบว่าเม็ดเกรนของฟิล์ม เริ่มมีการประสานตัวรวมกันในบางบริเวณจนมีขนาดใหญ่ขึ้น สุดท้ายเมื่ออัตราไหลแก๊สไนโตรเจนเพิ่มขึ้นเป็น 15 sccm เกรนของฟิล์ม มีขนาดเล็กลงและรวมตัวกันหนาแน่นมากขึ้น โดยบางส่วนเริ่มมีการประสานตัวรวมกันจนมีรูปร่างแบบสามเหลี่ยมหรือมีลักษณะเป็นแบบปิรามิด ซึ่งทำให้บางบริเวณเกิดเป็นที่ว่างระหว่างเกรน



ภาพที่ 4 ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ซึ่งเคลือบที่อัตราไหลแก๊สไนโตรเจนต่างๆ

สำหรับความหยาบผิวของฟิล์มบางที่เคลือบได้ซึ่งแสดงด้วยค่าความหยาบผิวเฉลี่ย (R_a) และ ค่าความหยาบผิว rms (R_{rms}) จากเทคนิค AFM พบว่าค่า R_a และ ค่า R_{rms} ของฟิล์มที่ได้มีเปลี่ยนแปลงไปตามอัตราไหลแก๊สไนโตรเจน ดังแสดงในภาพที่ 5 โดยค่า R_a และ ค่า R_{rms} ของฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ซึ่งเคลือบด้วยอัตราไหลแก๊สไนโตรเจนเท่ากับ 5 sccm มีค่าเท่ากับ 4.0 nm และ 5.2 nm ตามลำดับ และมีค่าลดลงเท่ากับ 2.3 nm และ 2.9 nm ตามลำดับ เมื่ออัตราไหลแก๊สไนโตรเจนเพิ่มเป็น 15 sccm

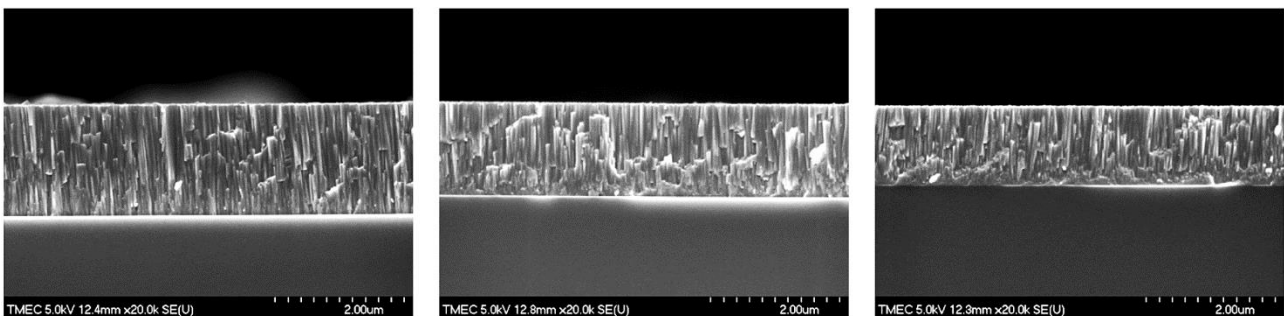


ภาพที่ 5 ค่าความหยาบผิว (R_a และ R_{rms}) ของฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ซึ่งเคลือบที่อัตราไหลแก๊สไนโตรเจนต่างๆ

4. โครงสร้างจุลภาคและภาคตัดขวางของฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์

ภาพที่ 6 แสดงโครงสร้างจุลภาคและภาคตัดขวางของฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ซึ่งเคลือบบนแผ่นซิลิคอนเมื่อใช้อัตราไหลแก๊สไนโตรเจนในช่วง 5 – 15 sccm จากการวิเคราะห์หัตถ์ด้วยเทคนิค FE-SEM ผลการศึกษาพบว่าฟิล์มที่เคลือบได้มีลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่คล้ายกันทุกเงื่อนไข กล่าวคือฟิล์มที่เคลือบได้มีลักษณะโครงสร้างเป็นแบบแท่งเรียวยาวแหลมจากผิวหน้าของวัสดุรองรับยาวขึ้นไปถึงผิวหน้าของฟิล์มที่เคลือบได้ และพบว่ามีช่องว่างระหว่างแท่งแหลมเรียวยาวของเนื้อฟิล์มปะปนอยู่เล็กน้อย โดยโครงสร้างจุลภาคของฟิล์มที่เคลือบได้ในงานวิจัยนี้มีลักษณะเป็นแบบคอลัมน์แปรตามอัตราไหลแก๊สไนโตรเจนที่ใช้ในกระบวนการเคลือบ

ทั้งนี้จากผลการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของฟิล์มบางด้วยเทคนิค FE-SEM พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างความหนาฟิล์มและอัตราเคลือบซึ่งคำนวณจากค่าความหนาฟิล์มหารด้วยเวลาเคลือบ แสดงได้ดังภาพที่ 7 โดยผลการศึกษาในงานวิจัยครั้งนี้แสดงให้เห็นถึงแนวโน้มการลดลงในลักษณะเดียวกันของทั้งความหนาฟิล์มและอัตราเคลือบ เมื่ออัตราไหลแก๊สไนโตรเจนเพิ่มขึ้นจาก 5 sccm เป็น 15 sccm โดยความหนาฟิล์มลดลงจาก 1705 nm เป็น 1220 nm ส่วนอัตราเคลือบลดลงจาก 28.42 nm/min เป็น 20.33 nm/min เนื่องจากเมื่ออัตราไหลแก๊สไนโตรเจนในกระบวนการเคลือบเพิ่มขึ้นจะทำให้เกิดขึ้นของสารประกอบไนไตรด์ต่างๆ หน้าปัสสารเคลือบที่เรียกว่าเกิดปรากฏการณ์ “target poisoning” เป็นผลให้อัตราการสปีดเตอร์ปัสสารเคลือบลดลง ซึ่งทำให้อะตอมโครเมียมจากปัสสารเคลือบถูกสปีดเตอร์ออกมารวมตัวเป็นชั้นฟิล์มลดลงตามอัตราไหลแก๊สไนโตรเจนที่เพิ่มขึ้น

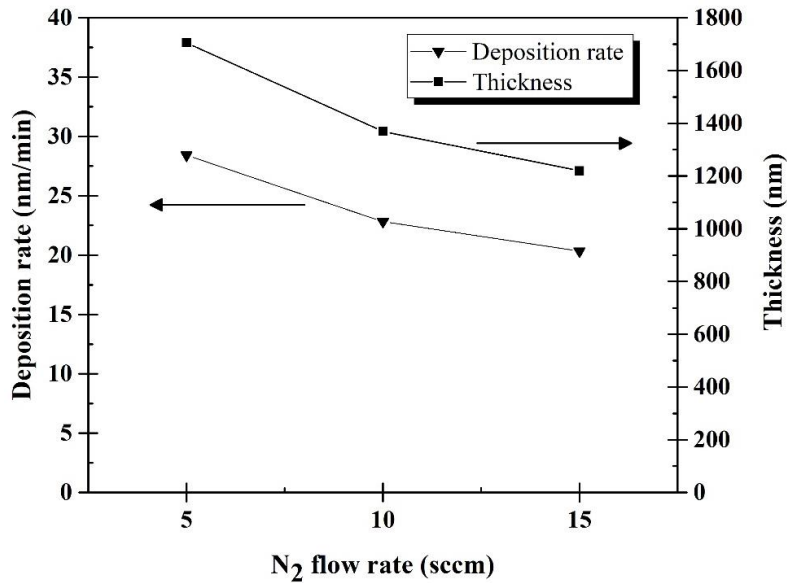


(a) $N_2 = 5$ sccm

(b) $N_2 = 10$ sccm

(c) $N_2 = 15$ sccm

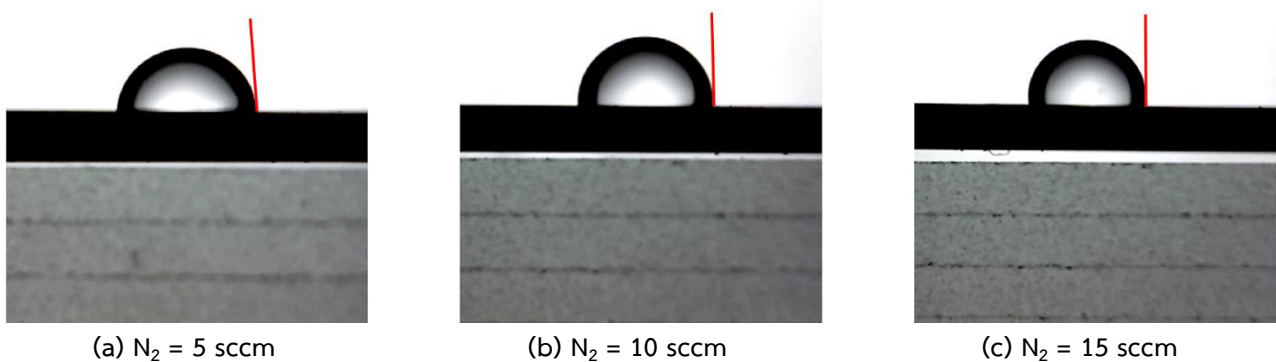
ภาพที่ 6 โครงสร้างจุลภาคและภาคตัดขวางของฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ซึ่งเคลือบที่อัตราไหลแก๊สไนโตรเจนต่างๆ



ภาพที่ 7 ความหนาและอัตราเคลือบของฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ซึ่งเคลือบที่อัตราไหลแก๊สไนโตรเจนต่างๆ

5. สภาพขบหน้าของฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์

ทั้งนี้สภาพขบหน้าของฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ที่ได้ในงานวิจัยนี้ ซึ่งพิจารณาจากค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำบนผิวหน้าของฟิล์มที่เคลือบบนแผ่นซิลิคอน โดยรูปหยดน้ำที่ใช้วัดค่ามุมสัมผัสแสดงได้ดังภาพที่ 8 ผลการศึกษาพบว่าฟิล์มซึ่งเคลือบด้วยอัตราไหลแก๊สไนโตรเจนเท่ากับ 5 และ 10 sccm ค่ามุมสัมผัสเฉลี่ยที่ตรวจวัดได้มีค่าเท่ากับ 78.3° (ภาพที่ 8(a)) และ 82.6° (ภาพที่ 8(b)) ผลของค่ามุมสัมผัสเฉลี่ยที่ได้นี้แสดงให้เห็นว่าฟิล์มทั้งสองกรณีมีสภาพขบหน้าเป็นแบบไฮโดรฟิลิก (ค่ามุมสัมผัสน้อยกว่า 90°) แต่เป็นไฮโดรฟิลิกที่ยังไม่ดี (มีความขบหน้าน้อย) ส่วนกรณีฟิล์มบางซึ่งเคลือบด้วยอัตราไหลแก๊สไนโตรเจนสูงเท่ากับ 15 sccm พบว่ามุมสัมผัสเฉลี่ยมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 90.8° (ภาพที่ 8(c)) ในกรณีแสดงให้เห็นว่าฟิล์มที่ได้เริ่มมีสมบัติไฮโดรโฟบิก (ค่ามุมสัมผัสมากกว่า 90°) (ฟิล์มเริ่มมีความไม่ขบหน้า) ตารางที่ 3 เป็นผลของอัตราไหลแก๊สไนโตรเจนต่อค่าความหยาบผิวและมุมสัมผัสของฟิล์มโครเมียมไนไตรด์ ทั้งนี้จากผลการศึกษาในงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ที่เคลือบได้มีสภาพขบหน้าที่แตกต่างกันออกไป โดยอาจเป็นไฮโดรฟิลิกหรือไฮโดรโฟบิกก็ได้ขึ้นกับลักษณะพื้นผิวและความหยาบผิวของฟิล์ม ซึ่งความหยาบผิวของฟิล์มก็จะเปลี่ยนแปลงหรือขึ้นกับอัตราไหลแก๊สไนโตรเจนที่ใช้เคลือบ ดังนั้นหากควบคุมลักษณะพื้นผิวหรือความหยาบผิวของฟิล์มได้ ก็สามารถควบคุมสภาพขบหน้าของฟิล์มบางที่ต้องการให้เป็นไฮโดรฟิลิกหรือไฮโดรโฟบิกก็ได้



ภาพที่ 8 การวัดค่ามุมสัมผัสของฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ซึ่งเคลือบที่อัตราไหลแก๊สไนโตรเจนต่างๆ

ตารางที่ 3 ผลของอัตราไหลแก๊สไนโตรเจนต่อความหยาบผิวและมุมสัมผัสของฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์

อัตราไหลแก๊สไนโตรเจน (sccm)	ความหยาบผิวเฉลี่ย (R_a) (nm)	ความหยาบผิว rms (R_{rms}) (nm)	มุมสัมผัสเฉลี่ย (องศา)
5	4.0	5.2	78.3
10	3.0	3.8	82.6
15	2.3	2.9	90.8

อภิปรายผล

ผลจากเทคนิค XRD แสดงให้เห็นว่าเฟสและความเป็นผลึกของฟิล์มที่เคลือบได้มีการเปลี่ยนแปลงไปตามอัตราไหลแก๊สไนโตรเจนอย่างชัดเจน โดยเมื่ออัตราไหลแก๊สไนโตรเจนที่ใช้ในการเคลือบมีค่าเพิ่มขึ้นพบว่าความเป็นผลึกและขนาดผลึกของฟิล์มที่ได้มีค่าลดลง เนื่องจากเมื่ออัตราไหลแก๊สไนโตรเจนเพิ่มขึ้นจะทำให้ปริมาณไนโตรเจนในห้องเคลือบเพิ่มมากขึ้น โดยส่วนหนึ่งจะเข้าทำปฏิกิริยากับอะตอมของโครเมียมที่ถูกสเปตเตอร์ออกมาจากเป้าสารเคลือบฟอร์มตัวเป็นชั้นของสารประกอบไนไตรด์ของธาตุสองชนิด (binary nitride compound layer) ตกเคลือบบนผิวหน้าของวัสดุรองรับ ขณะเดียวกันก็จะมีไนโตรเจนบางส่วนที่มากเกินไปเข้าทำปฏิกิริยากับโครเมียมที่ผิวหน้าของเป้าสารเคลือบเกิดเป็นชั้นของสารประกอบไนไตรด์บางๆ ที่ผิวหน้าของเป้าสารเคลือบ ส่งผลให้เกิดปรากฏการณ์ “target poisoning” (Ruden et al., 2013; Purandare et al., 2016) ซึ่งทำให้อัตราการสเปตเตอร์เป้าสารเคลือบลดลง กล่าวคืออะตอมของโครเมียมที่หลุดจากเป้าสารเคลือบลดลง ซึ่งส่งผลให้การฟอร์มตัวของอะตอมสารเคลือบเป็นชั้นโครเมียมไนไตรด์ลดลงด้วย กรณีนี้ทำให้ความหนาของฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ที่เคลือบได้มีค่าลดลงด้วย ผลที่ได้นี้สอดคล้องกับความเข้มของรังสีเอกซ์เลี้ยวเบนที่ตรวจวัดได้มีค่าลดลงตามความหนาของฟิล์ม (Chekour et al., 2005) สำหรับในกรณีที่ความเป็นผลึกลดลงเมื่ออัตราไหลแก๊สไนโตรเจนเพิ่มขึ้นอธิบายได้ว่าฟิล์มที่มีบางมากเป็นผลมาจากการที่มีอัตราเคลือบต่ำทำให้อะตอมสารเคลือบ (โครเมียมและไนโตรเจน) ยังฟอร์มตัวหรือรวมตัวกันเป็นผลึกยังไม่ดีซึ่งส่งผลโดยตรงต่อกระบวนการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของเทคนิค XRD (Ghorannevis et al., 2016) นอกจากนี้ค่าคงที่แลตทิซซึ่งคำนวณได้จากข้อมูลหรือผลการวิเคราะห์จากเทคนิค XRD ยังสอดคล้องกับฐานข้อมูลมาตรฐาน JCPDS ซึ่งช่วยยืนยันว่าฟิล์มที่เคลือบได้ในงานวิจัยนี้เป็นฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์

สำหรับองค์ประกอบทางเคมีของฟิล์มที่เคลือบได้ซึ่งวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS พบว่าปริมาณของโครเมียมและไนโตรเจนในเนื้อฟิล์มมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามอัตราไหลของแก๊สไนโตรเจนที่ใช้ในกระบวนการเคลือบ โดยปริมาณไนโตรเจนในฟิล์มมีสัดส่วนเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของอัตราไหลของแก๊สไนโตรเจน ซึ่งตรงข้ามกับปริมาณโครเมียมในฟิล์มซึ่งพบว่ามีปริมาณลดลงตรงข้ามกับการเพิ่มของปริมาณไนโตรเจน ทั้งนี้แก๊สไนโตรเจนในกระบวนการเคลือบจะดีสชาร์จ (discharge) เกิดเป็นพลาสมาของไนโตรเจนซึ่งจะทำปฏิกิริยากับอะตอมของโครเมียมที่ถูกสเปตเตอร์ออกมาจากเป้าโครเมียมแล้วฟอร์มตัวเป็นชั้นฟิล์ม ดังนั้นเมื่อเพิ่มอัตราไหลของแก๊สไนโตรเจนในการเคลือบให้มากขึ้นก็เท่ากับเป็นการเพิ่มโอกาสในการทำปฏิกิริยาของไนโตรเจนกับโครเมียมในกระบวนการเคลือบให้มากขึ้นด้วย (Wan et al., 2010; Zhang et al., 2013; Shan et al., 2014) ทั้งนี้จากผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS พบว่าปริมาณโครเมียมในฟิล์มมีค่าลดลงแบบเชิงเส้นซึ่งตรงข้ามกับปริมาณไนโตรเจนที่เพิ่มขึ้น โดยแนวโน้มนี้อาจเกิดขึ้นจากอัตราเคลือบที่ใกล้เคียงจำนวนของอะตอมโครเมียมที่มาถึงผิวหน้าของวัสดุรองรับ ดังนั้นเมื่ออัตราเคลือบลดปริมาณโครเมียมในฟิล์มก็ลดลงด้วยเช่นกัน

ทั้งนี้การเปลี่ยนแปลงลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางที่เคลือบได้ซึ่งวิเคราะห์ด้วยเทคนิค AFM โดยพิจารณาจากค่าความหยาบผิว (R_a and R_{rms}) พบว่าความหยาบผิวของฟิล์มมีการเปลี่ยนแปลงจากผิวหน้าที่มีความหยาบผิวมากไปเป็นฟิล์มที่มีความหยาบผิวน้อย (ฟิล์มเรียบมากขึ้น) เมื่ออัตราไหลแก๊สไนโตรเจนเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าค่าการเพิ่มอัตราไหลแก๊สไนโตรเจนยังมีส่วนทำให้ผิวหน้าฟิล์มมีลักษณะแน่นทึบ เนื่องจากเมื่อปริมาณแก๊สไนโตรเจนเพิ่มขึ้นตามอัตราไหลจะส่งผลให้การเคลื่อนที่ของอะตอม (mobility) ในกระบวนการเคลือบลดลง ทำให้การรวมตัวกันของอะตอมสารเคลือบลดน้อยลงซึ่งส่งผลให้ลักษณะผิวหน้าของฟิล์มมีความเรียบมากขึ้น (ความหยาบผิวลดลง) ทั้งนี้ผลการศึกษาค้นพบว่าเมื่ออัตราเคลือบต่ำเนื่องจากการเพิ่มอัตราไหลแก๊ส นอกจากทำให้ความหนาฟิล์มลดลงแล้ว ยังทำให้ผลึกมีขนาดเล็ก พื้นผิวหน้าของฟิล์มมีความราบเรียบขึ้นสอดคล้องกับงานวิจัยของ (Ahmadipour et al., 2019)

ในส่วนของการเคลือบฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ที่ได้ในงานวิจัยนี้ ซึ่งคำนวณจากค่าความหนาฟิล์มที่วัดจากเทคนิค FE-SEM หารด้วยเวลา ซึ่งพบว่ามีค่าลดลงอย่างชัดเจนอาจเกิดจากปัจจัยต่อไปนี้เป็น (1) เกิดชั้นบางๆ ของสารประกอบโครเมียมไนไตรด์ที่ผิวหน้าของเป้าสารเคลือบ (target poisoning) ซึ่งทำให้อัตราการสเปตเตอร์เป้าสารเคลือบลดลง ส่งผลให้อะตอมโครเมียมลดลงด้วย และ (2) โอกาสในการชนกันของอะตอมอาร์กอน (สเปตเตอร์แก๊ส) กับแก๊สไนโตรเจน ซึ่งเพิ่มขึ้นตามอัตราไหลแก๊สไนโตรเจน ซึ่งส่งผลให้อะตอมของอาร์กอนที่จะเข้าชนเป้าสารเคลือบ (หรือสเปตเตอร์เป้าสารเคลือบ) ลดลง (Peng et al., 2016) อย่างไรก็ตามลักษณะโครงสร้างของฟิล์มที่ได้เป็นแบบคอลัมน์ทั้งหมด ในกรณีนี้สรุปได้ว่าอัตราไหลแก๊สไนโตรเจนไม่มีผลต่อโครงสร้างของฟิล์มที่ได้ โดย

โครงสร้างแบบคอลัมน์าร์ของฟิล์มที่เคลือบได้นี้สอดคล้องกับ Zone 2 ของแบบจำลองโครงสร้างของ Thronton ซึ่งระบุว่าโครงสร้างแบบ Zone 2 นี้สามารถพบได้ทั่วไปในฟิล์มที่เตรียมได้จากเทคนิคสปีดเทอริง (Kusano, 2019)

ทั้งนี้เป็นที่ทราบโดยทั่วไปว่าสภาพขอบน้ำของฟิล์มบางใดๆ จะขึ้นกับโครงสร้างและความหยาบผิวของฟิล์มเป็นสำคัญ โดยในงานวิจัยนี้พบว่าฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ที่เคลือบได้เมื่อเพิ่มอัตราไหลแก๊สไนโตรเจนที่เพิ่มขึ้นจาก 5 sccm เป็น 15 sccm ฟิล์มที่ได้มีค่าความหยาบผิวลดลงอย่างเห็นได้ชัดเจน โดยค่า R_a ลดลงจาก 4.0 nm เป็น 2.3 nm ส่วนค่า R_{rms} ลดลงจาก 5.2 nm เป็น 2.9 nm ขณะที่ค่ามุมสัมผัสเฉลี่ยมีค่าค่อยๆ เพิ่มขึ้นจาก 78.3° เป็น 90.8° ทั้งนี้จากผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าค่ามุมสัมผัสเฉลี่ยของฟิล์มบางที่เคลือบได้ในงานวิจัยนี้เปลี่ยนแปลงไปตามค่าความหยาบผิว ซึ่งสามารถปรับเปลี่ยน (ความหยาบผิว) ได้โดยการควบคุมอัตราไหลแก๊สไนโตรเจนที่ใช้ในกระบวนการเคลือบอีกต่อหนึ่ง นอกจากนี้ฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ทั้งหมดที่เคลือบได้ในงานวิจัยนี้ยังแสดงสภาพขอบน้ำที่แตกต่างกันออกไปเมื่อพิจารณาจากค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำบนพื้นผิวฟิล์ม จึงอาจกล่าวโดยสรุปได้ว่าในงานวิจัยนี้ฟิล์มที่เคลือบด้วยอัตราไหลแก๊สไนโตรเจนสูง (15 sccm) จะมีค่าความหยาบผิวต่ำและสามารถแสดงสมบัติป้องกันการเกาะติดของน้ำได้ดีที่สุดเนื่องจากมีค่ามุมสัมผัสเฉลี่ยสูงที่สุดเท่ากับ 90.8° ซึ่งแสดงว่าฟิล์มที่เตรียมได้จากเงื่อนไขการเคลือบนี้มีสภาพไม่ชอบน้ำ (ไฮโดรโฟบิก) จึงเหมาะสำหรับใช้เป็นตัวเลือกในการเคลือบผิวของแม่พิมพ์ฉีดเพื่อป้องกันการเกาะติดของพลาสติกที่นำมาฉีดขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ สอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้านี้อันที่เคลือบผิวของแม่พิมพ์ฉีดด้วยฟิล์มโครเมียมไนไตรด์แล้วพบว่าไม่ชอบน้ำ (ไฮโดรโฟบิก) เช่นเดียวกัน โดยมีค่ามุมสัมผัสเท่ากับ 111.4° (Yang et al., 2011) อีกทั้งผลการศึกษางานวิจัยนี้สอดคล้องกับงานวิจัยอื่นก่อนหน้านี้อันที่แสดงให้เห็นว่าลักษณะพื้นผิวและความหยาบผิวของชั้นเคลือบที่ใช้เคลือบผิววัสดุผลโดยตรงต่อสภาพขอบน้ำ โดยถ้าพื้นผิววัสดุที่มีค่ามุมสัมผัสต่ำจะแสดงสภาพขอบน้ำได้ดีเนื่องจากความหยาบผิวหรือความขรุขระของพื้นผิววัสดุจะทำให้ผิววัสดุมีช่องว่างจำนวนมากซึ่งส่งผลโดยตรงต่อค่ามุมสัมผัสและสภาพขอบน้ำของพื้นผิว (Comakli, 2021) นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยอีกหลายเรื่องที่ยืนยันว่ามุมสัมผัสของวัสดุ จะมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อความหยาบผิวของวัสดุมีค่าลดลง (Majeed et al., 2015) ซึ่งสอดคล้องเข้ากันได้กับผลการศึกษางานวิจัยนี้

สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้สามารถเคลือบฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ที่มีโครงสร้างผลึก องค์ประกอบทางเคมี โครงสร้างจุลภาค ลักษณะพื้นผิวและความหยาบผิวที่ต่างกันบนแผ่นซิลิคอนและกระจกสไลด์ด้วยวิธีดีซีแมกนีตรอนสปีดเทอริงเมื่อใช้อัตราไหลแก๊สไนโตรเจนที่ต่างกันเพื่อศึกษาสมบัติสภาพขอบน้ำฟิล์มบางที่เคลือบได้ โดยผลการศึกษางานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าอัตราไหลแก๊สไนโตรเจนที่ใช้ในกระบวนการเคลือบมีบทบาทสำคัญต่อโครงสร้างและสภาพขอบน้ำฟิล์มบางที่เคลือบได้ ผลจากเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์แสดงให้เห็นว่าฟิล์มบางที่ได้มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบพหุผลึก โดยความเป็นผลึกและขนาดผลึกของฟิล์มมีค่าลดลงตามอัตราไหลแก๊สไนโตรเจนที่เพิ่มขึ้น ในส่วนขององค์ประกอบทางเคมีจากเทคนิค EDS พบว่าปริมาณไนโตรเจนในเนื้อฟิล์มที่เคลือบได้มีค่าเพิ่มขึ้นตามอัตราไหลแก๊สไนโตรเจน โดยปริมาณไนโตรเจนที่เพิ่มขึ้นนี้มีส่วนช่วยให้ไนโตรเจน (N) และโครเมียม (Cr) ทำปฏิกิริยากันแล้วฟอร์มตัวเป็นโครเมียมไนไตรด์ในกระบวนการเคลือบมากขึ้น สำหรับความหยาบผิวจากเทคนิค AFM พบว่าฟิล์มที่ใช้อัตราไหลแก๊สไนโตรเจนสูง (15 sccm) ฟิล์มที่เคลือบได้ค่อนข้างเรียบโดยมีค่า R_a และค่า R_{rms} ต่ำประมาณ 2.3 nm และ 2.9 nm ตามลำดับ ทั้งนี้อัตราเคลือบและความหนาของฟิล์มที่วัดจากเทคนิค FE-SEM พบว่ามีค่าลดลงตามอัตราไหลแก๊สไนโตรเจนที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากเกิดปรากฏการณ์ “target poisoning” ที่หน้าเป้าของสารเคลือบ สำหรับสภาพขอบน้ำของฟิล์มโครเมียมไนไตรด์พบว่าฟิล์มที่มีความหยาบผิวสูงมีสภาพขอบน้ำดีกว่าฟิล์มที่มีลักษณะพื้นผิวที่เนียนเรียบ ทั้งนี้ผลของงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าสภาพขอบน้ำเปลี่ยนแปลงไปตามลักษณะพื้นผิวและความหยาบผิวของฟิล์มซึ่งสามารถออกแบบและควบคุมได้ด้วยอัตราไหลแก๊สไนโตรเจนซึ่งเป็นเงื่อนไขของการเคลือบฟิล์ม

ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาค่าฟิล์มบางหรือชั้นเคลือบชนิดอื่นที่อาจมีสภาพขอบน้ำแตกต่างออกไปสำหรับประยุกต์ใช้ในงานด้านอื่น
2. ศึกษาค่าผลของเงื่อนไขการเคลือบอื่นที่อาจมีผลต่อโครงสร้างผลึก ลักษณะพื้นผิวและความหยาบผิว ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อสภาพขอบน้ำของวัสดุ
3. ศึกษาค่าตัวแปรหรือสมบัติอื่นของฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ที่อาจมีผลต่อสภาพขอบน้ำ เช่น เฟสและโครงสร้างผลึก ความหนาฟิล์ม โครงสร้างจุลภาค เป็นต้น
4. ควรมีการทดสอบการใช้งานจริง โดยนำแม่พิมพ์ฉีดมาเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ตามเงื่อนไขของงานวิจัยนี้
5. ควรมีการนำฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ตามเงื่อนไขของงานวิจัยนี้ไปทดสอบการใช้งานจริงกับชิ้นงานหรือผลิตภัณฑ์อื่น

เอกสารอ้างอิง

- Abdeltawab A.A., Shoeib M.A., & Mohamed S.G. (2011). Electrophoretic deposition of hydroxyapatite coatings on titanium from dimethylformamide suspensions. **Surf Coat Technol**, 206, 43-50.
- Ahmadipour M., Arjmand M., Ain F.M., Ahmad Z.A., & Pung S.Y. (2019). Effect of Ar:N₂ flow rate on morphology, optical and electrical properties of CCTO thin films deposited by RF magnetron sputtering. **Ceram. Int**, 47, 15077-15081.
- Berni M.G., Marchiori G., Gambardella A., Boi M., Bianchi M., Russo A., Visani A., Marcacci M., Pavan P.G., & Lopomo N.F. (2017). Effects of working gas pressure on zirconium dioxide thin film prepared by pulsed plasma deposition: roughness, wettability, friction and wear characteristics. **J Mech Behav Biomed Mater**, 72, 200-208.
- Chekour L., Nouveau C., Chala A., Labidi C., Rouag N., & Djouadi M.A. (2005). Growth mechanism for chromium nitride films deposited by magnetron and triode sputtering methods. **Surf Coat Technol**, 200, 241-244.
- Chen Y., Wang S., Hao Y., Pu J., Jiang X., Huang L.-F., & Wang L. (2020). Friction and wear behavior of CrN coating on 316L stainless steel in liquid sodium at elevated temperature. **Tribol Int**, 143, 106079.
- Comakli J.A. (2021). Improved structural, mechanical, corrosion and tribo-corrosion properties of Ti45Nb alloys by TiN, TiAlN monolayers, and TiAlN/TiN multilayer ceramic films. **Ceram. Int**, 47, 4149-4156.
- Ferreira R., Carvalho Ó., Sobral L., Carvalho S., & Silva F. (2020). Influence of morphology and microstructure on the tribological behavior of arc deposited CrN coatings for the automotive industry. **Surf Coat Technol**, 397, 126047.
- Ghorannevis Z., Akbarnejad E., & Ghoranneviss M. (2016). Effects of various deposition times and RF powers on CdTe thin film growth using magnetron sputtering. **J Theor Appl Phys**, 10(3), 225-231.
- González-Carmona J.M., Triviño J.D., Gómez-Ovalle Á., Ortega C., Alvarado-Orozco J.M., Sánchez-Sthepa H., & Avilac A. (2020). Wear mechanisms identification using Kelvin probe force microscopy in TiN, ZrN and TiN/ZrN hard ceramic multilayers coatings. **Ceram Int**, 46, 24592-24604.
- Hosokawa A., Shimamura K., & Ueda T. (2012). Cutting characteristics of PVD-coated tools deposited by unbalanced magnetron sputtering method. **CIRP Annals**, 61, 95-98.
- Jiang Y., Liu H., Shi K., Tang C., & Song J. (2021). Effect of annealing temperature on wettability of TiO₂/PDA thin films. **Surf Coat Technol**, 411, 126994.
- Knotek P., Kutálek P., Černošková E., Tichý L., & Janíček P. (2019). The wettability of variously treated As₄₂Se₅₈ thin films. **Surf Coat Technol**, 221, 216-223.
- Kusano E. (2019). Structure-zone modeling of sputter-deposited thin films: a brief review. **Appl. Sci. Conver. Technol**, 28(6), 179-185.
- Li K., Xu G., Huang X., Chen Q., Xie Z., & Gong, F. (2020). Surface evolution analysis of Cr_xW_yN_z coatings on WC mold in glass molding process. **Surf Coat Technol**, 393, 125839.
- Lin J., Sproul W.D., Moore J.J., Lee S., & Myers S. (2011). High rate deposition of thick CrN and Cr₂N coatings using modulated pulse power (MPP) magnetron sputtering. **Surf Coat Technol**, 205, 3226-3234.
- Majeed A., He J., Jiao L., Zhong X., & Sheng Z. (2015). Surface properties and biocompatibility of nanostructured TiO₂ film deposited by RF magnetron sputtering. **Nanoscale Res. Lett**, 10, 1-9.
- Peng S., Yang Y., Li G., Jiang J., Jin K., Yao T.T., Zhang K., Cao X., Wang Y., & Xu G. (2016). Effect of N₂ flow rate on the properties of N doped TiO₂ films deposited by DC coupled RF magnetron sputtering, **J Alloys Compd**, 678, 355-359.
- Praveen K., Pious M., C.V., Thomas S., & Grohens Y. (2019) **Non-Thermal Plasma Technology for Polymeric Materials Applications in Composites, Nanostructured Materials and Biomedical Fields**. Elsevier



- Purandare P.Y., Ehasarian A.P., & Hovsepian P.E. (2016). Target poisoning during CrN deposition by mixed high power impulse magnetron sputtering and unbalanced magnetron sputtering technique, **J. Vac Sci Technol A**, 34(4), 041502.
- Ruden A., Restrepo-Parra E., Paladines A.U., & Sequeda F. (2013). Corrosion resistance of CrN thin films produced by dc magnetron sputtering. **Appl Surf Sci**, 270, 150-156.
- Shan L., Wang Y., Li J., & Chen J. (2014). Effect of N₂ flow rate on microstructure and mechanical properties of PVD CrN_x coatings for tribological application in seawater. **Surf Coat Technol**, 242, 74-82.
- Subramanian B., Prabakaran K., & Jayachandran M. (2012). Influence of nitrogen flow rates on materials properties of CrN_x films grown by reactive magnetron sputtering. **Bull Mater Sci**, 35, 505-511.
- Tan S., Zhang X., Wu X., Fang F., & Jiang J. (2011). Comparison of chromium nitride coatings deposited by DC and RF magnetron sputtering. **Thin Solid Films**, 519, 2116-2120.
- Wan S., Wang H., Xia Y., Tieu A.K., Tran B.H., Zhu H., Zhang G., & Zhu Q. (2019). Investigating the corrosion-fatigue wear on CrN coated piston rings from laboratory wear tests and field trial studies. **Wear**, 432-433, 202940.
- Wan X.S., Zhao S.S., Yang Y., Gong J., & Sun C. (2010). Effects of nitrogen pressure and pulse bias voltage on the properties of Cr-N coatings deposited by arc ion plating. **Surf Coat Technol**, 204, 1800-1810.
- Wolfe D.E., Gabriel B.M., & Reedy M.W. (2011). Nanolayer (Ti, Cr)N coatings for hard particle erosion resistance. **Surf Coat Technol**, 205(19), 4569-4576.
- Yang Y.S., Huang W, Huang M.S., & Huang C.F. (2011). Anti-sticking effects of Cr-N and Zr-DLC films on microinjection molding for LGP applications. **Adv Mat Res**, 179-180, 339-344.
- Zhang H., Duo S., Xu X., & Liu T. (2013). Effect of N₂ flow rate on structure and mechanical properties of CrN coatings prepared by closed field unbalanced magnetron sputtering. **Key Eng Mater**, 591, 95-98.

ผลของสารรีดิวซ์จากธรรมชาติต่อเส้นไหมที่เคลือบซีโอไลต์ 4A ย้อมคราม

Natural Reducing Agents Affected on Silk Coated Zeolite 4A Dyeing with Indigo

กาวอน พูนคำ¹ กัญญา ศิริลาภโกคิน² สุตาพร ตั้งควนิช³

E-mail: kavone2017@gmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาปริมาณของปูนขาวและปูนแดงที่เหมาะสมในการทำเนื้อคราม ศึกษาผลของสารรีดิวซ์จากเนื้อมะขามและเนื้อกล้วยน้ำว่าในการเตรียมน้ำย้อมครามต่อเฉดสีของเส้นไหม และทดสอบสัณฐานวิทยาของเส้นไหมที่ไม่เคลือบและเคลือบซีโอไลต์ 4A ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (FT-IR) ทดสอบสมบัติการต้านเชื้อแบคทีเรียของเส้นไหม ความคงทนของสีต่อแสงและความคงทนของสีต่อการซักล้างของเส้นไหมที่ไม่เคลือบและเส้นไหมที่เคลือบซีโอไลต์ 4A ย้อมคราม ผลการวิจัยพบว่า เส้นไหมที่ไม่เคลือบด้วยซีโอไลต์ 4A มีผิวหน้าที่เรียบ เส้นไหมที่เคลือบซีโอไลต์ 4A จะมีอนุภาคซีโอไลต์ 4A ที่ผิวหน้า เส้นไหมที่ไม่เคลือบและเส้นไหมที่เคลือบซีโอไลต์ 4A 1, 2, 3, 4 และ 5 กรัม พบว่า ค่าความคงทนของสีต่อแสงเฉลี่ยอยู่ในระดับ 4-5 (ดี-ดีมาก) และความคงทนของสีต่อการซักล้างเปลี่ยนไปเล็กน้อยเมื่อเพิ่มจำนวนครั้งในการซักเป็น 10, 20 และ 30 ครั้ง เส้นไหมเคลือบซีโอไลต์ 4A 4 กรัม ย้อมครามโดยใช้เนื้อกล้วยน้ำว่า เป็นสารรีดิวซ์ เป็นเงื่อนไขที่ดีที่สุด โดยมีค่าความคงทนของสีต่อแสงและความคงทนของสีต่อการซักล้างอยู่ในระดับ 5 (ดีมาก) เมื่อผ่านการซักล้าง 30 ครั้ง ค่าความคงทนของสีต่อการซักล้างอยู่ในระดับ 4-5 (ดี-ดีมาก) และเส้นไหมที่เคลือบซีโอไลต์ 4A สามารถยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย *Staphylococcus aureus* ได้

คำสำคัญ: ซีโอไลต์ 4A เส้นไหม สารรีดิวซ์จากธรรมชาติ คราม

Abstract

This research studied the suitable quantity of white lime and red lime for producing indigo paste. The effect of reducing agents from tamarind and banana in the preparation of indigo dye on color shade of silk dyed was investigated. The morphology of uncoated and silk coated with zeolite 4A was characterized by using the scanning electron microscopy (SEM) and their functional group identification was carried out using a fourier transform infrared spectrophotometer (FT-IR). The properties of uncoated silk and silk coated with zeolite 4A and indigo dyed as antibacterial, light fastness and washing fastness were also investigated. The results showed that the uncoated silk had a smooth surface. Silk coated with zeolite 4A reflected zeolite particles on the surface. The uncoated silk and silk coated with zeolite 4A 1, 2, 3, 4 and 5 g showed that the average light fastness was in level of 4-5 (good to very good) and washing fastness slightly changed with increasing the number of washed cycle to 10, 20 and 30 washed. Silk coated with zeolite 4A 4 g and indigo dyed using banana as reducing agent was the best condition. The light fastness and washing fastness was 5 (excellent). After 30 washed cycles, the washing fastness was found to be of 4-5 (good to very good) and silk coated with zeolite 4A could inhibit *Staphylococcus aureus* bacteria.

Keywords: Zeolite 4A, silk, natural reducing agent, indigo

¹ นักศึกษาหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ศึกษา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี

^{2,3} อาจารย์ประจำสาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี

ความเป็นมาของปัญหา

ผ้าย้อมครามเป็นภูมิปัญญาที่สืบทอดมาจากบรรพบุรุษจากปู่ย่าตายาย สู่ลูกหลาน ปัจจุบันผลิตภัณฑ์จากผ้าย้อมครามธรรมชาติกลายเป็นผลิตภัณฑ์หนึ่งที่มีความนิยมมากจากประเทศต่างๆ ทั้งในทวีปยุโรปและแถบเอเชีย เช่น ญี่ปุ่น จีน เกาหลี อินเดีย ลาว และประเทศไทย ซึ่งแต่ละประเทศมีองค์ความรู้ในการปลูกต้นคราม และการย้อมครามแตกต่างกันไป (อ้อยทิพย์ ผู้พัฒนา, 2552) เนื่องจากผ้าย้อมครามธรรมชาติเป็นผ้าที่มีสีและกลิ่นที่เป็นเอกลักษณ์ สามารถป้องกันรังสียูวี เป็นผลิตภัณฑ์จากธรรมชาติ 100% เป็นงานหัตถกรรมที่มีสีเป็นเอกลักษณ์เฉพาะผิวไม่ซ้ำแบบใคร สามารถให้เฉดสีได้ตั้งแต่เฉดสีฟ้าอ่อนจนถึงน้ำเงินเข้ม และยังเป็นหนึ่งในแม่สีหลักของสีธรรมชาติ ดังนั้นสีครามจึงเป็นหนึ่งในความนิยม และได้รับการยอมรับว่าเป็นราชาแห่งสีย้อมที่สำคัญในอุตสาหกรรม สิ่งทอ (เนศตรา แก้วคง, 2557)

ในอุตสาหกรรมการย้อมผ้าความที่นิยมสูงมาก เช่น กางเกงยีนส์สีน้ำเงิน ปัญหาการย้อมสีคราม คือ ครามธรรมชาติผลิตไม่ทันต่อความต้องการและกระบวนการก่อกำครามธรรมชาติในระดับอุตสาหกรรมยังไม่เสถียรมากพอ สีเคมีจึงเป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายทั่วทุกมุมโลกมาจนถึงปัจจุบัน เพราะขั้นตอนในการย้อมทำงานง่าย สีเข้ม หลากหลายเฉดสี สีสมน้ำส้ม ราคาถูก ทนต่อแสง ทนต่อการซักล้างและสามารถผลิตผ้าได้มาก เนื้อครามที่เห็นทั่วไป คือ ครามสีน้ำเงิน (indigo blue) หรือครามซึ่งไม่ละลายน้ำ ดังนั้นก่อนย้อมต้องทำให้ครามสีน้ำเงินเปลี่ยนไปเป็นครามไม่มีสี (indigo white) เรียกขั้นตอนนี้ว่า การก่อกำคราม เนื่องจาก indigo blue เป็นสารไม่ละลายน้ำจึงใช้ย้อมเส้นใยไม่ติด แต่ indigo blue สามารถถูกทำให้เปลี่ยนเป็น indigo white ที่ไม่มีสี ละลายน้ำได้ ในภาวะที่เป็นต่าง pH 10.5-11.5 อุณหภูมิ 27-30 องศาเซลเซียส มีน้ำขี้เถ้า และแบคทีเรียกลุ่ม *Bacillus alkaliophilus* (อนุรัตน์ สายทอง, 2552) หรือใช้สารรีดิวซ์ที่เป็นสารเคมีในการเปลี่ยน indigo blue ให้เป็น indigo white หรือสารรีดิวซ์จากธรรมชาติ เช่น น้ำตาลรีดิวซ์จากผลไม้ สารรีดิวซ์ที่นิยมใช้มากที่สุดสำหรับอุตสาหกรรมการย้อมคราม คือ โซเดียมไดไทโอไนท์ และโซเดียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งสามารถรีดิวซ์สีครามได้ในเวลาสั้นมาก อย่างไรก็ตามเนื่องจากผลที่ได้จากปฏิกิริยาทำให้เกิดสารซัลไฟด์ และซัลเฟต ซึ่งก่อให้เกิดปัญหาที่สำคัญคือ เมื่อน้ำย้อมที่ใช้แล้วปล่อยลงสู่แหล่งน้ำต่างๆ ส่งผลให้เกิดน้ำเสีย เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม สารเคมีตกค้างในเนื้อผ้าทำให้เป็นอันตรายต่อผู้สวมใส่ เนื่องจากสีย้อมส่วนใหญ่เป็นออกไซด์ของโลหะหนัก ซึ่งโลหะหนักหลายชนิดเป็นสารก่อมะเร็ง จากสาเหตุดังกล่าวทำให้ผู้คนหันมาใช้สีย้อมจากธรรมชาติมากขึ้น และมีนักวิจัยจำนวนมากพยายามศึกษาการนำสารรีดิวซ์ที่มาจากธรรมชาติมาใช้แทนสารเคมี สารรีดิวซ์ที่นำมาใช้ในการย้อมสีครามเพื่อเปลี่ยน indigo ให้เป็นรูปแบบของ leuco-indigo ที่ละลายน้ำได้ คือ โซเดียมไดไทโอไนท์ ซึ่งเป็นสารรีดิวซ์ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายมากที่สุด และใช้น้ำตาลโมโนแซ็กคาไรด์ ได้แก่ น้ำตาลกลูโคส น้ำตาลฟรุคโทส และน้ำตาลกาแลคโทส น้ำตาลไดแซ็กคาไรด์ ได้แก่ น้ำตาลแลคโทส และน้ำตาลมอลโทส มาใช้เป็นสารรีดิวซ์ที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม เพื่อใช้แทนโซเดียมไดไทโอไนท์ในการย้อมคราม ผลการวิจัยพบว่า น้ำตาลสามารถนำมาใช้ในการรีดิวซ์ความเป็นต่างของสีครามที่อุณหภูมิสูงขึ้นภายใน 10 นาที (Laksanawadee Saikhao *et al.*, 2018) มีรายงานการใช้สารรีดิวซ์จากกล้วย โดยศึกษาชนิด และปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ พบว่า สภาวะในการเตรียมน้ำย้อมครามใช้สารรีดิวซ์จากกล้วยที่ให้ผลดีที่สุด คือ การใช้เนื้อกล้วยสุก หรือเนื้อกล้วยสุกหอม โดยเฉพาะเนื้อกล้วยหอมทอง เนื้อกล้วยหอมเขียว และเนื้อกล้วยน้ำว้าปริมาณ 4 กรัม คราม 0.1 กรัม โซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.8 โมล/ลิตรต่อน้ำย้อม 100 มิลลิลิตร เวลาที่ใช้ในการรีดิวซ์ 12 ชั่วโมง และน้ำตาลฟรุคโทสให้ประสิทธิภาพในการรีดิวซ์ได้ดีที่สุด รองลงมาคือ น้ำตาลกลูโคส และของผสมระหว่างน้ำตาลกลูโคสกับน้ำตาลฟรุคโทส ตามลำดับ การใช้กล้วยเป็นสารรีดิวซ์ในการเตรียมน้ำย้อมสีครามจึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจใช้เวลาในการเตรียมน้อย และเป็นกระบวนการที่ไม่ทำลายสิ่งแวดล้อม (สุดกมล ลาโสภา และคณะ, 2555) ในปี 2016 Delwar Hossain *et al.* รายงานความคงทนของสีย้อมครามธรรมชาติ โดยใช้สารรีดิวซ์ที่ได้จากธรรมชาติ 3 ชนิด คือ ปาล์ม (palm) กล้วย และ แอปเปิ้ล โดยการต้ม เปรียบเทียบผลของความเข้มข้นของสารรีดิวซ์และความเข้มข้นของปูนขาวในการเตรียมน้ำย้อมครามธรรมชาติ ต่อความคงทนของสี ค่า pH และค่าความเข้มข้น (K/S) พบว่า ค่าความเข้มข้นขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารรีดิวซ์ โดยสารรีดิวซ์ที่ให้ค่าความเข้มข้นเฉลี่ยสูงสุดคือ ปาล์ม ที่สภาวะอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และ pH ช่วง 10.8 -11 การใช้สารรีดิวซ์ธรรมชาติมีความคงทนของสีและความเข้มข้นดีกว่าสารรีดิวซ์สังเคราะห์ การเตรียมน้ำย้อมครามสำหรับย้อมเส้นไหมโดยใช้สารรีดิวซ์จากธรรมชาติที่มีปริมาณมากและหาง่ายในท้องถิ่นเช่น เนื้อกล้วยและเนื้อมะขามจึงเป็นที่น่าสนใจ

การย้อมเส้นไหม หรือผ้าไหมด้วยครามในปัจจุบันยังไม่เป็นที่แพร่หลาย เนื่องจากปัญหาที่เกิดในการย้อมไหมด้วยครามแบบพื้นดั้งเดิมส่วนมากสีผ้าไหมไม่สม่ำเสมอและสีซีด ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากเนื้อครามที่นำมาก่อกำครามมีปริมาณปูนมากเกินไป เมื่อนำมาย้อมเส้นไหมจึงทำให้สีของเส้นไหมไม่สม่ำเสมอและไม่คงทนต่อแสง นอกจากนี้เส้นไหมยังแข็งกระด้าง ขาดง่าย การทำเนื้อครามเป็นขั้นตอนที่สำคัญที่ส่งผลต่อคุณภาพของเนื้อคราม โดยเฉพาะการเติมปริมาณปูนลงไปเพื่อตกตะกอนเนื้อคราม หากเติมปูนลงไปปริมาณมากเกินไปจะทำให้ได้เนื้อครามที่มีน้ำหนักรวม แต่ส่งผลเสียต่อเฉดสีและความคงทนของสีและความทนทานของเส้นใยโดยเฉพาะเส้นไหมจะขาดง่ายและสีไม่สม่ำเสมอ ซึ่งในกระบวนการทำเนื้อครามตามภูมิปัญญาชาวบ้าน พบว่า ในขั้นตอนการกวนคราม ถ้าสังเกตเห็นน้ำสีเขียวแสดงว่าใส่ปูนน้อยเกินไปและมีสีครามเหลืออยู่ในน้ำครามจึงส่งผลให้ได้เนื้อครามในปริมาณน้อยมาก เมื่อนำเนื้อครามไปก่อกำ

สีย้อมจะไม่ติดเส้นใย ถ้าใส่ปูนในปริมาณพอดี น้ำครามใสเป็นสีน้ำตาลเหลือง (สีชา) หากใส่ปูนมากเกินไปเนื้อครามเป็นสีเทาใช้ไม่ได้ เนื้อครามที่ดีต้องเนื้อเนียนละเอียด สีน้ำเงินสดใส และเป็นเงา ซึ่งอาจเก็บเป็นเนื้อครามเปียกหรือเนื้อครามผง นอกจากนี้ยังพบว่าในการทำเนื้อคราม เมื่ออุณหภูมิคงที่สีครามตั้งต้นในใบครามจะถูกสลาย ให้สีครามออกมาอยู่ในน้ำครามได้มากที่สุดในเวลาที่เหมาะสมเท่านั้น และแช่น้ำที่อุณหภูมิปกติเพียง 12 ชั่วโมง (ศูนย์ศึกษาการพัฒนาภูพานอันเนื่องมาจากพระราชดำริ จังหวัดสกลนคร, 2560) ระยะเวลาในการแช่ต้องพอเหมาะหลังแยกกากใบครามออกทิ้ง แล้วต้องเติมปูนขาวในน้ำคราม และเติมปริมาณพอดี จึงทำการกวนให้เกิดฟอง และตกตะกอน หลังจากได้ตะกอนเนื้อครามแล้วจึงนำเนื้อครามมาผสมกับน้ำซี้เค้า และน้ำซี้เค้าต้องเค็มพอดี และผสมกันในสัดส่วนพอดี จึงจะเกิดสีครามในน้ำย้อมที่สามารถย้อมผ้าได้ ซึ่งปูนขาว หรือปูนแดงเป็นสารทำปฏิกิริยาทำให้ครามเกาะตัว หากใส่ปูนลงไปปริมาณมากๆ ทำให้ได้เนื้อครามปริมาณมาก แต่เนื้อครามจะต่างเวลาย้อมจะได้สีอ่อน และเวลานำมาย้อมเส้นไหมจะทำให้เส้นไหมต่าง และกระด้าง การใส่ปูนขาวต่อถัง 20 ลิตร จึงควรประมาณ 0.5–1 กิโลกรัม (ประวิทย์ อ่วงอารีย์ และ วิจิตรา สุจริต, 2560)

ปัจจุบันการประยุกต์ใช้วัสดุนาโนบนเส้นใยฝ้ายและไหมโดยการนำวัสดุนาโนมาใช้กับสิ่งทอ เช่น นาโนไททาเนียมไดออกไซด์ ซิงค์ออกไซด์ ซีโอไลต์ และโคโตซาน เป็นต้น เพื่อวัตถุประสงค์ให้ผ้ามีคุณสมบัติที่พิเศษขึ้นทั้งทางด้านกายภาพ เคมี และชีวภาพ คุณสมบัติพิเศษต่างๆ ของสิ่งทอสามารถพัฒนาด้วยวัสดุนาโน ได้แก่ กันน้ำหรือสะท้อนน้ำ การยับยั้งเชื้อแบคทีเรียกันไฟฟ้าสถิต ป้องกันการยับ การตกแต่งผ้านุ่ม การเพิ่มความสามารถในการดูดซับสีและเพิ่มความคงทนของสีและการป้องกันรังสียูวี เป็นต้น ซีโอไลต์เป็นผลึกของสารประกอบพวอะลูมิเนียมซิลิเกตของโลหะอัลคาไลน์และอัลคาไลน์เอิร์ธ มีโครงสร้างสามมิติเกิดจากโครงข่ายของหน่วยโครงสร้างปฐมภูมิหมู่เตตระไฮดรอล ของ $[SiO_4]^{4-}$ และ $[AlO_4]^{5-}$ มาเรียงตัวกันเชื่อมโดยอะตอมของออกซิเจน ได้หน่วยโครงสร้างทุติยภูมิโครงสร้างของซีโอไลต์ประกอบด้วย 3 ส่วน ได้แก่ 1) ส่วนที่เป็นโครงข่ายเตตระไฮดรอลของหมู่ $[SiO_4]^{4-}$ และ $[AlO_4]^{5-}$ มาเชื่อมต่อกัน มีองค์ประกอบหลัก คือ Si, Al และ O 2) ส่วนที่เป็นแคตไอออนเป็นไอออนบวกของโลหะ เช่น Na^+ , K^+ , Ca^{2+} และ Mg^{2+} เป็นต้น 3) ส่วนที่เป็นโมเลกุลของน้ำที่ถูกดูดซับอยู่ในโครงข่าย ซึ่งซีโอไลต์จะมีน้ำที่ดูดซับอยู่ในโครงผลึก เมื่อให้ความร้อนจะระเหยได้ ทำให้เกิดช่องว่าง ซึ่งเป็นเอกลักษณ์ของซีโอไลต์ คือ สามารถเกิดการดูดซับโมเลกุลและไอออนขนาดเล็กได้ เนื่องจากซีโอไลต์มีขนาดและรูปร่างของช่องว่าง (channel) ภายในโมเลกุลของซีโอไลต์ที่เฉพาะเจาะจงสามารถควบคุมการผ่านเข้าออกของอนุภาคเข้าไปภายในกรง (cage) ถ้าอนุภาคขนาดมีขนาดและรูปร่างเหมาะสมจะสามารถผ่านเข้าไปในกรง และถูกกักอยู่ภายในโครงข่ายได้ จากลักษณะของโครงข่ายทำให้ซีโอไลต์สามารถใช้เป็นตัวกรองโมเลกุล (molecular sieve) และการแลกเปลี่ยนไอออน (ion exchange) ได้ดี (สุตาพร ตั้งควนิช, 2564) การประยุกต์ใช้ซีโอไลต์มาเคลือบบนเส้นใยไหมและย้อมครามธรรมชาติจึงเป็นประเด็นที่น่าสนใจ

จากสภาพปัญหาดังกล่าวคณะผู้วิจัยจึงสนใจศึกษาปริมาณของปูนขาว และปูนแดงในการทำเนื้อคราม ศึกษาผลของสารรีดิวซ์จากเนื้อมะขามและเนื้อกล้วยน้ำว่าต่อเฉดสีของเส้นไหมย้อมคราม และศึกษาสมบัติการต้านเชื้อแบคทีเรียของเส้นไหมที่เคลือบซีโอไลต์ 4A ย้อมคราม ซึ่งทำให้ได้ทราบปริมาณปูนที่เหมาะสมในการทำเนื้อคราม ชนิดสารรีดิวซ์จากธรรมชาติที่เหมาะสมในการย้อมเส้นไหมได้เงื่อนไขในการย้อมเส้นไหมที่มีสมบัติความคงทนของสีต่อแสง และความคงทนของสีต่อการซักล้างเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นการพัฒนาต่อยอดภูมิปัญญาท้องถิ่นด้านผ้าไหมย้อมคราม และเป็นการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมอีกทางหนึ่ง

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาปริมาณของปูนขาวและปูนแดงที่เหมาะสมในการทำเนื้อคราม
2. เพื่อศึกษาผลของสารรีดิวซ์จากเนื้อมะขามและเนื้อกล้วยน้ำว่าต่อเฉดสีของเส้นไหมย้อมคราม
3. เพื่อศึกษาสมบัติการต้านเชื้อแบคทีเรียของเส้นไหมที่เคลือบซีโอไลต์ 4A ย้อมคราม

ขอบเขตการวิจัย

1. พี่ชที่ศึกษาได้แก่ คราม เก็บจากบ้านตอเรือ อำเภอพรรณานิคม จังหวัดสกลนคร
2. สารรีดิวซ์ที่ศึกษา ได้แก่ เนื้อมะขามสุกแกะเมล็ด น้ำตาล 7% brix และ pH 3.55 และเนื้อกล้วยน้ำว่าสุกงอม น้ำตาล 3.1% brix และ pH 6.59
3. ปูนที่ศึกษา ได้แก่ ปูนขาว pH 12.77 และปูนแดง pH 12.73
4. เส้นไหมที่นำมาศึกษาเป็นเส้นไหมสีขาวที่ผ่านการฟอกแล้ว จากบริษัทจุลไหมไทย จังหวัดเพชรบูรณ์
5. วัสดุนาโนที่ศึกษา ได้แก่ ซีโอไลต์ 4A
6. ทดสอบสมบัติการต้านเชื้อแบคทีเรียโดยวิธี AATCC test method 147-2004

วิธีดำเนินงานวิจัย

1. การทำเนื้อคราม

1.1 นำต้นครามปริมาณ 20 กิโลกรัม แล้วนำไปล้างที่เตรียมไว้ 10 ถัง เติมน้ำเปล่า 132 ลิตร ใส่จนท่วมต้นคราม ใช้ก้อนหิน หรือวัสดุถ่วงต้นครามให้จมน้ำ เพื่อให้สีจากใบครามออกมาได้มากที่สุด โดยการแช่ทิ้งไว้นาน 12 ชั่วโมง แยกกากครามออกจะได้เนื้อครามใสสีฟ้าจาง

1.2 เติมน้ำขาว 2%, 4%, 6%, 8% และ 10% ตามลำดับ และเติมน้ำแดง 2%, 4%, 6%, 8% และ 10% ตามลำดับ ตีน้ำครามให้เกิดฟองสีน้ำตาลมากมาย จนกระทั่งฟองครามยุบ (เวลาที่ใช้ในการตีครามประมาณ 30 นาที) ทิ้งน้ำครามไว้นาน 12 ชั่วโมง เพื่อให้เนื้อครามตกตะกอน รินน้ำใสๆ ที่อยู่ด้านบนตะกอนทิ้ง จะได้เนื้อครามที่มีลักษณะเหมือนโคลน กรอง แล้วนำเอาเนื้อครามที่ได้ขึ้นแปล เพื่อกรองน้ำออกจากเนื้อคราม

2. การเตรียมสารละลาย Cross-link agent 1,000 มิลลิลิตร

เตรียมกรดซัคซินิกเข้มข้น 6% w/w ในสารละลายโซเดียมไฮโปฟอสเฟต (NaH_2PO_4) เข้มข้น 4 % w/w โดยชั่งสารโซเดียมไฮโปฟอสเฟต 40 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 1,000 มิลลิลิตร ชั่งกรดซัคซินิก (CH_2COOH_2) 60 กรัม เติมน้ำลงในสารละลายโซเดียมไฮโปฟอสเฟต 940 กรัม คนให้สารละลายเข้ากัน (Karimi *et al.*, 2010)

3. การเคลือบเส้นไหมด้วยสารละลาย Cross-link agent

แช่เส้นไหมในน้ำปราศจากไอออน นาน 30 นาที แล้วบิดให้หมาด ตวงสารละลาย cross-link agent ปริมาตร 100 มิลลิลิตร เทลงในบีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร แล้วนำเส้นไหมที่เตรียมไว้ไป sonicate ด้วยเครื่องอัลตราโซนิกในสารละลายนาน 1 ชั่วโมง นำไปอบที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส นาน 3 นาที จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส นาน 2 นาที ผึ่งให้แห้ง (Karimi *et al.*, 2010)

4. การเคลือบเส้นไหมด้วยซีโอไลต์ 4A

ซีโอไลต์ 4A 1, 2, 3, 4 และ 5 กรัม ใส่ในบีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร แล้วเติมน้ำปราศจากไอออน 100 มิลลิลิตร นำไป sonicate นาน 30 นาที ด้วยเครื่องอัลตราโซนิก นำเส้นไหมที่ผ่าน cross-link จุ่มลงในสารแขวนลอยที่เตรียมไว้ แล้วนำไป sonicate ที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส นาน 1 ชั่วโมง ยกเส้นไหมขึ้น บิดให้หมาด แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที เพื่อ fix ซีโอไลต์ 4A นำเส้นไหมไป sonicate ด้วยน้ำปราศจากไอออน นาน 10 นาที เพื่อล้างอนุภาคนาโนที่ไม่เกิดปฏิกิริยาออก

5. การเตรียมสีย้อมคราม

5.1 การเตรียมสีย้อมคราม โดยใช้มะขามเป็นสารรีดิวซ์

ชั่งเนื้อมะขาม 100 กรัม มาละลายในน้ำอุ่นอุณหภูมิ 40-60 องศาเซลเซียส ปริมาตร 1 ลิตร กรองเอากากออก จะได้น้ำมะขาม เพื่อใช้ในการทดลองต่อไป ชั่งเนื้อครามมา 1 กิโลกรัม ละลายด้วยน้ำต่างซี้แก่กั้วย pH 13 จำนวน 1 ลิตร เติมน้ำมะขามที่เตรียมไว้ผสมใส่ลงในบีกเกอร์ที่มีเนื้อครามอยู่ โจงครามให้เข้ากัน แล้วทิ้งไว้ 72 ชั่วโมง

5.2 การเตรียมสีย้อมคราม โดยใช้กล้วยน้ำว้าเป็นสารรีดิวซ์

ชั่งเนื้อกล้วยน้ำว้าสุกอมป็นละเอียดมา 100 กรัม ละลายในน้ำอุ่นอุณหภูมิ 40-60 องศาเซลเซียส ปริมาตร 1 ลิตร กรองเอากากออก จะได้น้ำกล้วยเพื่อใช้ในการทดลองต่อไป ชั่งเนื้อครามมา 1 กิโลกรัม ละลายด้วยน้ำต่างซี้แก่กั้วย pH 13 จำนวน 1 ลิตร เติมน้ำกล้วยน้ำว้าที่เตรียมไว้ผสมใส่ลงในบีกเกอร์ที่มีเนื้อครามอยู่ โจงครามให้เข้ากัน แล้วทิ้งไว้ 72 ชั่วโมง

6. การย้อมเส้นไหมด้วยคราม

นำเส้นไหมที่ไม่เคลือบและเคลือบซีโอไลต์ 4A แช่ในน้ำปราศจากไอออน เป็นเวลา 1 ชั่วโมง นำเส้นไหมบิดพอหมาด ตวงน้ำย้อมคราม 100 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร จุ่มเส้นไหมลงในน้ำย้อมที่เตรียมไว้ นาน 1 นาที ยกเส้นไหมขึ้นให้สัมผัสอากาศนาน 1 นาที แล้วจุ่มต่อให้ครบ 5 นาที (ย้อมซ้ำ 5 ครั้ง) ยกเส้นไหมขึ้นจากน้ำย้อม บิดพอหมาด กระทบเส้นไหมเบาๆ ทิ้งไว้ 1-2 นาที แล้วล้างออกด้วยน้ำสะอาดจนกว่าน้ำล้างใส จากนั้นนำไปผึ่งให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง เก็บตัวอย่างเส้นไหมที่ย้อมเสร็จไปทดลองในขั้นต่อไป

7. การทดสอบสมบัติทางกายภาพของเส้นไหม

ทดสอบสัณฐานวิทยาของเส้นไหมที่ไม่เคลือบ และเคลือบซีโอไลต์ 4A ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscopy, SEM) รุ่น JSM-6010 LV บริษัท JEOL, USA พิสูจน์เอกลักษณ์เส้นไหมที่ไม่เคลือบ และเคลือบด้วยซีโอไลต์ 4A ด้วยเครื่อง fourier transform infrared spectrophotometer (FT-IR) Model 45321 spectrum 2000, Perkin Elmer Company, USA นำเส้นไหมหลังย้อมไปวัดค่าความเข้มสีด้วยเครื่องวัดสี (color meter) CIELAB เพื่อหาค่า L^* , a^* , b^* และ K/S ยี่ห้อ Hunter-Lab รุ่น Ultra Scan Vis ทดสอบค่าความคงทนของสีต่อแสง (light fastness) โดยเทียบกับ gray scale ตามมาตรฐาน

ISO 105-BO2: 1994 (E) และค่าความคงทนของสีต่อการซักล้างโดยเทียบกับ gray scale ตามมาตรฐาน TISI 121, volume 3: 2009 method A (1) (40 °C, 30 minutes) ทดสอบสมบัติการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของเส้นไหมที่เคลือบด้วยซีไอโกลด์ 4A โดยวิธี AATCC test method 147-2004 โดยใช้เชื้อแบคทีเรีย *Escherichia coli* และ *Staphylococcus aureus*

ผลการทดลองและอภิปรายผล

การศึกษาปริมาณของปูนขาว และปูนแดงที่เหมาะสมในการทำเนื้อคราม ค่า pH ของน้ำแช่ต้นคราม และเนื้อครามที่ได้เมื่อใช้ปูนขาวในการทำเนื้อคราม พบว่า ปริมาณปูนที่เติม 6-10 % ค่า pH ของน้ำแช่ต้นครามเท่ากับ 13 และค่า pH ของเนื้อครามเท่ากับ 11 ซึ่งมีค่า pH มากกว่าการเติมปูนแดง เมื่อใช้ปูนแดงน้ำแช่ต้นครามมีค่า pH เท่ากับ 9 และเนื้อครามที่ได้มีค่า pH เท่ากับ 8 ซึ่งปริมาณปูนที่เหมาะสมในการเตรียมเนื้อคราม คือ 6 % (ตารางที่ 1) ซึ่งสอดคล้องกับสุดกมล ลาโสภา (2561) รายงานว่าการทำเนื้อครามในขั้นตอนการจะใช้ปูนขาว 20 กรัมต่อน้ำคราม 1 ลิตร หรือเติมทีละน้อยจนฟองครามเป็นสีน้ำเงิน ปัญหาที่เกิดในการย้อมเส้นไหมด้วยครามแบบพื้นดั้งเดิมส่วนมากสีผ้าไหมไม่สม่ำเสมอและสีซีด ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากเนื้อครามที่นำมาท้อมีปริมาณปูนมากเกินไป เมื่อนำมาย้อมเส้นไหมจึงทำให้สีของเส้นไหมไม่สม่ำเสมอและไม่คงทนต่อแสง นอกจากนี้เส้นไหมยังแข็งกระด้าง ขาดง่าย การทำเนื้อครามเป็นขั้นตอนที่สำคัญที่ส่งผลต่อคุณภาพของเนื้อคราม โดยเฉพาะการเติมปริมาณปูนลงไปเพื่อตกตะกอนเนื้อคราม หากเติมปูนลงไปปริมาณมากเกินไปจะทำให้ได้เนื้อครามที่มีน้ำหนักมาก แต่ส่งผลเสียต่อเจดสีและความคงทนของสีและความทนทานของเส้นใยโดยเฉพาะเส้นไหมจะขาดง่ายและสีไม่สม่ำเสมอ ซึ่งในกระบวนการทำเนื้อครามตามภูมิปัญญาชาวบ้าน พบว่า ในขั้นตอนการกวนคราม ถ้าสังเกตเห็นน้ำใสสีเขียวแสดงว่าใส่ปูนน้อยเกินไปและมีสีครามเหลืออยู่ในน้ำครามจึงส่งผลให้ได้เนื้อครามในปริมาณน้อยมาก เมื่อนำเนื้อครามไปท้อมือ สีย้อมจะไม่ติดเส้นใย ถ้าใส่ปูนในปริมาณพอดี น้ำครามใสเป็นสีน้ำตาลเหลือง (สีชา) หากใส่ปูนมากเกินไปเนื้อครามเป็นสีเทาใช้ไม่ได้ เนื้อครามที่ติดเนื้อเนียนละเอียด สีน้ำเงินสดใส และเป็นเงา ซึ่งอาจเก็บเป็นเนื้อครามเปียกหรือเนื้อครามผง นอกจากนี้ยังพบว่าการทำเนื้อคราม เมื่ออุณหภูมิคงที่สีครามตั้งต้นในใบครามจะถูกสลาย ให้สีครามออกมาอยู่ในน้ำครามได้มากที่สุดในเวลาที่เหมาะสมเท่านั้น และแช่น้ำที่อุณหภูมิปกติเพียง 12 ชั่วโมง (ศูนย์ศึกษาการพัฒนาภูพานอันเนื่องมาจากพระราชดำริ จังหวัดสกลนคร, 2555) หลังจากแยกใบครามออกทิ้งแล้วต้องเติมปูนขาวในน้ำครามและเติมปริมาณพอดีจึงทำการกวนให้เกิดฟองและตกตะกอน ซึ่งปูนขาว หรือปูนแดงเป็นสารทำปฏิกิริยาทำให้ครามเกาะตัว หากใส่ปูนลงไปปริมาณมากเกินไปทำให้ได้เนื้อครามปริมาณมาก แต่เนื้อครามจะต่างเวลาย้อมจะได้สีอ่อน และเวลานำมาย้อมเส้นไหมจะทำให้เส้นไหมต่าง และกระด้าง การใช้ปูนขาวต่อถัง 20 ลิตร จึงควรประมาณ 0.5-1 กิโลกรัม (ประวิทย์ อ่วงอารีย์ และวิจิตรา สุจริต, 2560) หรือประมาณ 2-5 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 1 ค่า pH ของน้ำแช่ต้นครามและเนื้อคราม

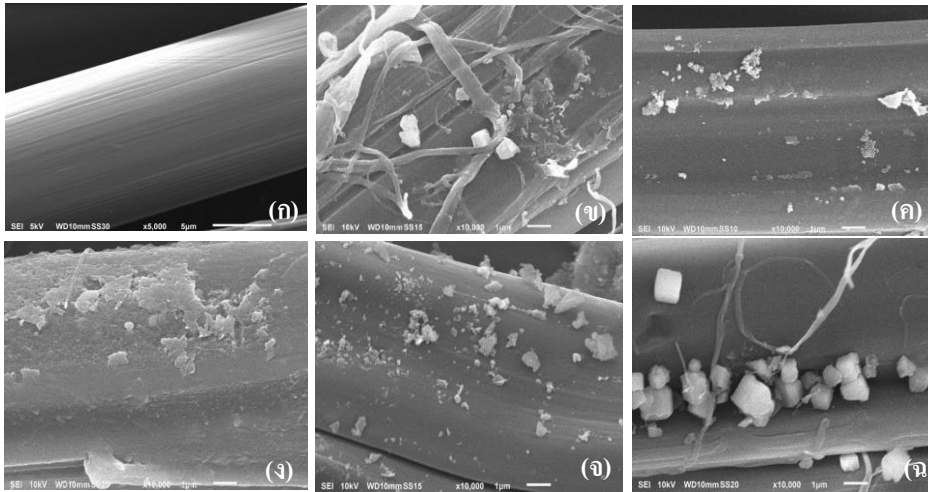
ปริมาณปูนที่เติม (%)	ค่า pH			
	ปูนขาว		ปูนแดง	
	น้ำแช่ต้นคราม	เนื้อคราม	น้ำแช่ต้นคราม	เนื้อคราม
2	9	8	8	7
4	9	8	8	8
6	13	11	9	8
8	13	11	9	8
10	13	11	9	8

ตารางที่ 2 ร้อยละผลผลิตได้เนื้อคราม

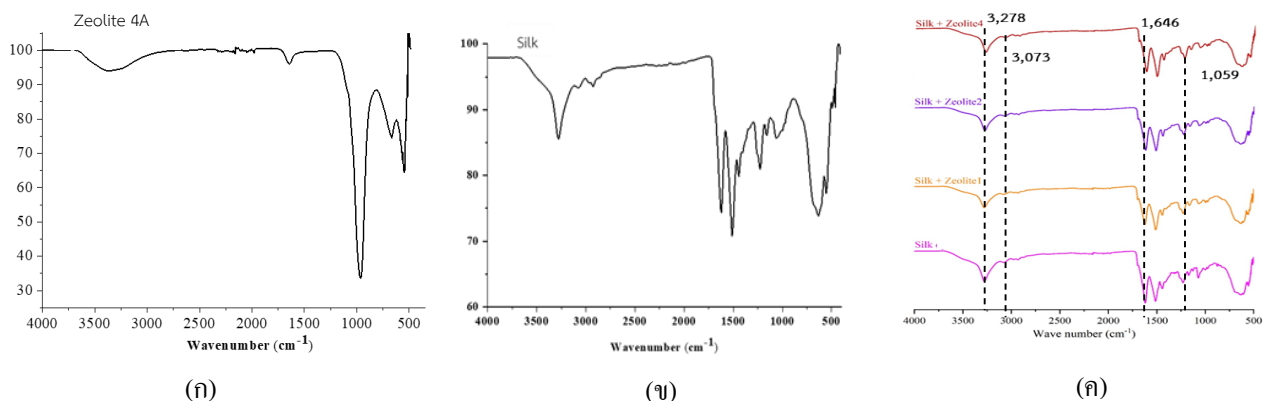
ปริมาณปูนที่เติม (%)	ปูนขาว		ปูนแดง	
	เนื้อคราม (กรัม)	ร้อยละผลผลิตได้	เนื้อคราม (กรัม)	ร้อยละผลผลิตได้
2	100	0.5	40	0.2
4	90	0.45	90	0.45
6	2,000	10	700	3.5
8	2,600	13	1,000	5
10	3,300	16.5	1,900	9.5

ตารางที่ 2 แสดงร้อยละผลผลิตได้นีโอคราม พบว่า เมื่อใช้ปูนขาวเติมในการแช่ต้นคราม จะได้เนือครามปริมาณมากกว่าใช้ปูนแดง ซึ่งปูนขาวร้อยละ 10 ได้นีโอครามมากที่สุดหนัก 3,300 กรัม ร้อยละผลผลิตของเนือครามมีค่าเท่ากับ 16.5 และเมื่อใช้ปูนแดง ร้อยละ 10 ได้นีโอครามหนัก 1,900 ร้อยละผลผลิตได้นีโอครามมีค่าเท่ากับ 9.5 แสดงว่าเมื่อเติมปูนขาวในการทำเนือครามได้นีโอครามมากกว่าเติมปูนแดง การเติมปูนลงไปปริมาณมากๆ ทำให้ได้นีโอครามปริมาณมาก แต่เมื่อนำมาก่อหม้อครามและนำมาย้อมเส้นไหมจะทำให้เส้นไหมต่างและกระด้าง ดังนั้นปริมาณปูนที่เหมาะสมในการเตรียมเนือคราม คือ 6 % ผลการทดสอบสัณฐานวิทยาของเส้นไหมด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่า เส้นไหมที่ไม่เคลือบด้วย ซีโอไลต์ 4A บริเวณผิวหน้าของเส้นไหมจะเรียบ ส่วนเส้นไหมที่เคลือบด้วยซีโอไลต์ 4A จะพบอนุภาคของซีโอไลต์ 4A กระจายอย่างสม่ำเสมอบนผิวหน้าของเส้นไหม ซึ่งสามารถยืนยันว่ามีอนุภาคของซีโอไลต์ 4A เกาะที่ผิวหน้าของเส้นไหมและมีอนุภาคมาเกาะเพิ่มมากขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณของซีโอไลต์ 4A ดังภาพที่ 1 สอดคล้องกับแถบการสั่นที่ตำแหน่งของหมู่ฟังก์ชันที่ปรากฏจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง FT-IR ภาพที่ 2 ซึ่งพบว่า ปรากฏแถบการสั่นที่ตำแหน่ง $3,278\text{ cm}^{-1}$ เป็นแถบการสั่นของ N-H stretching แถบการสั่นที่ตำแหน่ง $3,073\text{ cm}^{-1}$ เป็นแถบการสั่นของ OH stretching แถบการสั่นที่ตำแหน่ง $1,646\text{ cm}^{-1}$ เป็นแถบการสั่นของ OH bending แถบการสั่นที่ตำแหน่ง $1,059\text{ cm}^{-1}$ เป็นแถบการสั่นของ Si-O-Si bending (Hajer Aloulou *et al.*, 2017) จึงสามารถระบุได้ว่ามีซีโอไลต์ 4A เข้ายึดเกาะอยู่บนพื้นผิวของเส้นไหม เนื่องจากแถบการสั่นของหมู่เอไมด์ทุติยภูมิและเอไมด์ทุติยภูมิ เรียกว่าเกิด red shift

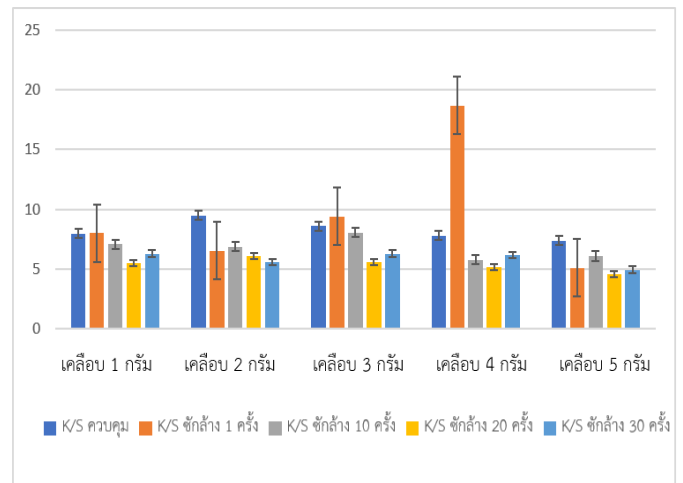
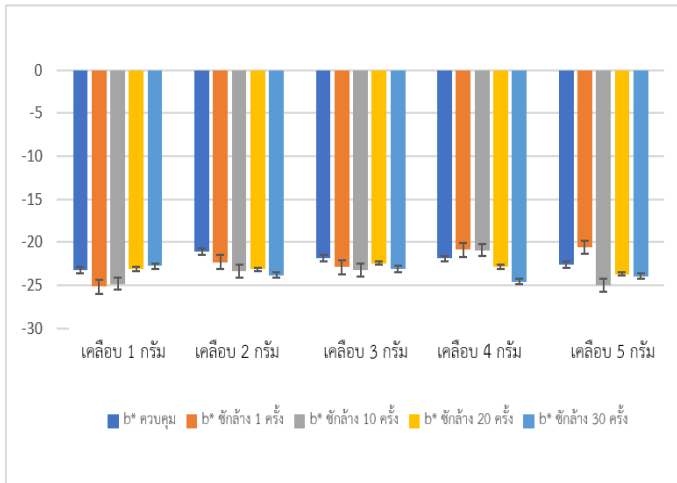
เส้นไหมย้อมครามโดยใช้เนื้อมะขามเป็นสารรีดิวซ์ พบว่า เส้นไหมที่เคลือบซีโอไลต์ 4A 1 กรัม (ควบคุม) มีค่าความเป็นสีน้ำเงิน (b^*) สูงสุดเท่ากับ -25.13 และเส้นไหมเคลือบซีโอไลต์ 4A 2 กรัม มีค่าความเป็นสีน้ำเงินน้อยที่สุดเท่ากับ -20.58 เส้นไหมที่เคลือบซีโอไลต์ 4A 4 กรัม ซักล้าง 1 ครั้ง มีค่าความเข้มสี (K/S) สูงสุดเท่ากับ 18.68 และเส้นไหมเคลือบซีโอไลต์ 4A 5 กรัม ซักล้าง 20 ครั้ง มีค่าความเข้มสีน้อยที่สุดเท่ากับ 4.54 ดังภาพที่ 3 (ก) และภาพที่ 3 (ข) ตามลำดับ ในขณะที่เส้นไหมย้อมครามโดยใช้เนื้อกล้วยน้ำว้าเป็นสารรีดิวซ์ พบว่า เส้นไหมที่เคลือบซีโอไลต์ 4A 1 กรัม มีค่าความเป็นสีน้ำเงิน (b^*) สูงสุดเท่ากับ -65 เส้นไหมที่เคลือบซีโอไลต์ 4A 4 กรัม ซักล้าง 10 ครั้ง มีค่าความเข้มสี (K/S) สูงสุดเท่ากับ 14.09 และเส้นไหมเคลือบซีโอไลต์ 4A 2 กรัม ซักล้าง 20 ครั้ง มีค่าความเข้มสีน้อยที่สุดเท่ากับ 5.96 ดังภาพที่ 4 (ก) และภาพที่ 4 (ข) ตามลำดับ



ภาพที่ 1 ภาพถ่าย SEM ของเส้นไหม (ก) ไม่เคลือบซีโอไลต์ 4A (ข) เคลือบซีโอไลต์ 4A 1 กรัม (ค) เคลือบซีโอไลต์ 4A 2 กรัม (ง) เคลือบซีโอไลต์ 4A 3 กรัม (จ) เคลือบซีโอไลต์ 4A 4 กรัม และ (ฉ) เคลือบซีโอไลต์ 4A 5 กรัม



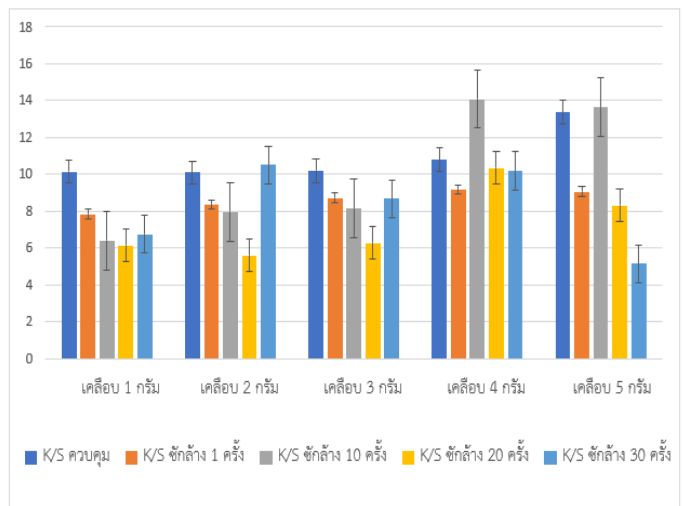
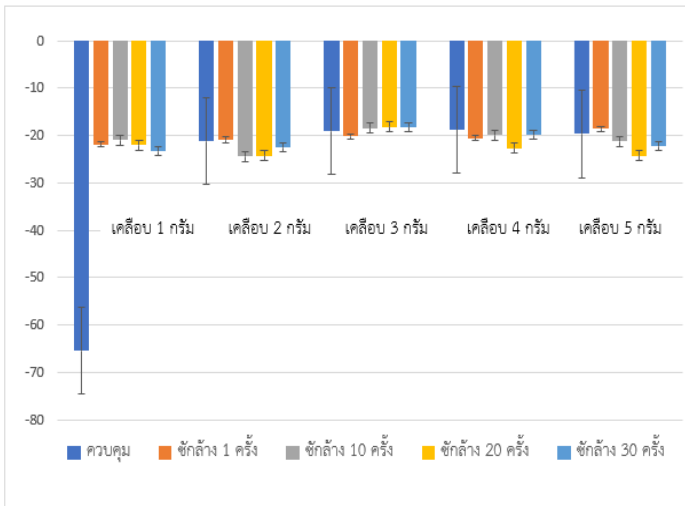
ภาพที่ 2 IR Spectrum ของ (ก) ซีโอไลต์ 4A, (ข) เส้นไหม, (ค) เส้นไหมที่ไม่เคลือบและเคลือบซีโอไลต์ 4A 1, 2 และ 4 กรัม



(ก)

(ข)

ภาพที่ 3 ค่า (ก) b* และ (ข) K/S ของเส้นไหมเคลือบซีโอโลต์ 4A 1 กรัม, 2 กรัม, 3 กรัม, 4 กรัม และ 5 กรัม ย้อมครามโดยใช้เนื้อมะขามเป็นสารรีดิวซ์



(ก)

(ข)

ภาพที่ 4 ค่า (ก) b* และ (ข) K/S ของเส้นไหมเคลือบซีโอโลต์ 4A 1 กรัม, 2 กรัม, 3 กรัม, 4 กรัม และ 5 กรัม ย้อมครามโดยใช้เนื้อกล้วยน้ำว้าเป็นสารรีดิวซ์



มะขาม



กล้วยน้ำว้า

ภาพที่ 5 เฉดสีของเส้นไหมย้อมครามโดยใช้เนื้อมะขามและเนื้อกล้วยน้ำว้าเป็นสารรีดิวซ์ (ก)ไม่เคลือบซีโอโลต์ 4A, (ข) เส้นไหมที่เคลือบซีโอโลต์ 4A 1 กรัม, (ค) 2 กรัม, (ง) 3 กรัม, (จ) 4 กรัม และ (ฉ) 5 กรัม

ภาพที่ 5 แสดงเจดสีของเส้นไหมที่ไม่เคลือบและเส้นไหมที่เคลือบซีโอดี 4A ย้อมครามโดยใช้เนื้อมะขามและเนื้อกล้วยน้ำว้า เป็นสารรีดิวซ์ พบว่า ได้เส้นไหมที่มีความเข้มของเจดสีแตกต่างกัน เส้นไหมที่ไม่เคลือบมีสีน้ำเงินเข้มกว่าเส้นไหมที่เคลือบซีโอดี 4A ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากสีของซีโอดี 4A ที่เคลือบ โดยเส้นไหมที่มีเจดสีน้ำเงินเข้มที่สุด ได้แก่ เส้นไหมที่เคลือบซีโอดี 4A 5 > 4 > 3 > 2 > 1 กรัม ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับสูตรผสม ลาโสภา (2561) ศึกษาการใช้สารรีดิวซ์ธรรมชาติในกระบวนการย้อมสีครามบนผ้าฝ้าย และการปรับปรุงสมบัติบางประการของผ้าฝ้ายด้วยโคโตซานเมื่อใช้สารเชื่อมโยง จากนั้นย้อมด้วยสีครามธรรมชาติ พบว่า การใช้ผลไม้สุก ได้แก่ กล้วยน้ำว้า มะขามเปียก ตะขบ มะม่วงน้ำดอกไม้ มะละกอพื้นบ้าน และแตงไทย ผลไม้สุกที่เป็นสารรีดิวซ์ที่ดีที่สุดคือ กล้วยน้ำว้า ซึ่งกล้วยน้ำว้ามีปริมาณน้ำตาลเท่ากับ 23% และมะขามมีปริมาณน้ำตาลเท่ากับ 16% กล้วยน้ำว้าจะใช้เวลาในการรีดิวซ์ indigo เป็น indigo white น้อยกว่ามะขาม เนื่องมาจากมะขามมีกรด ได้แก่ กรดทาร์ทาริก กรดซิตริกและกรดมาลิกซึ่งโมเลกุลของกรดอาจไปขัดขวางการทำงานของน้ำตาลรีดิวซ์ทำให้เวลาในการรีดิวซ์มากกว่ากล้วยน้ำว้า

ตารางที่ 3 ค่าความคงทนของสีต่อแสง และความคงทนของสีต่อการซักล้างของเส้นไหมที่ไม่เคลือบและเคลือบซีโอดี 4A ย้อมคราม โดยใช้มะขามและกล้วยน้ำว้าเป็นสารรีดิวซ์

ตัวอย่างเส้นไหม	ชนิดสารรีดิวซ์	ระดับความคงทนของสี				
		แสง	การซักล้าง (ครั้ง)			
			1	10	20	30
เส้นไหมที่ไม่เคลือบ	มะขาม	5	4-5	4-5	4	3
	กล้วยน้ำว้า	5	5	4-5	4	3
เส้นไหมเคลือบซีโอดี 4A 1 กรัม	มะขาม	4-5	4-5	4	4	3
	กล้วยน้ำว้า	4-5	4-5	4-5	4	3-4
เส้นไหมเคลือบซีโอดี 4A 2 กรัม	มะขาม	5	5	4	3-4	3
	กล้วยน้ำว้า	4-5	5	4-5	4	3-4
เส้นไหมเคลือบซีโอดี 4A 3 กรัม	มะขาม	5	4-5	4	3-4	3
	กล้วยน้ำว้า	5	5	4-5	4	3-4
เส้นไหมเคลือบซีโอดี 4A 4 กรัม	มะขาม	5	5	4-5	3-4	3-4
	กล้วยน้ำว้า	5	5	5	4-5	4-5
เส้นไหมเคลือบซีโอดี 4A 5 กรัม	มะขาม	5	4-5	4	3-4	3
	กล้วยน้ำว้า	5	5	5	4-5	3-4

จากตารางที่ 3 พบว่า เส้นไหมที่ไม่เคลือบและเส้นไหมที่เคลือบซีโอดี 4A 1, 2, 3, 4 และ 5 กรัม มีค่าความคงทนของสีต่อแสงเฉลี่ยอยู่ในระดับ 4-5 (ดี-ดีมาก) ความคงทนของสีต่อการซักล้าง 1, 10, 20 และ 30 ครั้ง พบว่า เส้นไหมที่ไม่เคลือบซีโอดี 4A ซักครั้งที่ 1 เฉลี่ยอยู่ที่ระดับ 4-5 (ดี-ดีมาก) และความคงทนในการซักล้างเปลี่ยนไปเล็กน้อยเมื่อเพิ่มจำนวนครั้งในการซักเป็น 10, 20 และ 30 ครั้ง โดยเงื่อนไขที่ดีที่สุดคือ เส้นไหมที่เคลือบซีโอดี 4A 4 กรัม มีความคงทนของสีต่อแสงอยู่ในระดับดีมาก (5) และเมื่อทดสอบการซักจำนวน 30 ครั้ง ความคงทนต่อซักอยู่ในระดับ 4-5 (ดี-ดีมาก) ซึ่งสอดคล้องกับสูตรผสม ดังควนิช (2563) ศึกษาผ้าฝ้ายเคลือบด้วยอนุภาคนาโนโคโตซานและนาโนซิงค์ออกไซด์ย้อมคราม ทดสอบสัมมนาวิทยาของผ้าฝ้ายที่เคลือบอนุภาคนาโนโคโตซานและนาโนซิงค์ออกไซด์ด้วย SEM และพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วย FT-IR ทดสอบสมบัติการป้องกันรังสียูวีและความคงทนของสีต่อแสงและความคงทนของสีต่อการซักล้างของผ้าฝ้ายที่เคลือบ พบว่า ผ้าฝ้ายที่ไม่เคลือบด้วยอนุภาคนาโนโคโตซานและนาโนซิงค์ออกไซด์มีผิวหน้าที่เรียบ ผ้าฝ้ายที่เคลือบจะปรากฏอนุภาคนาโนโคโตซานและนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ผิวหน้าซึ่งช่วยเพิ่มพื้นที่สัมผัสให้เส้นใยดูดซับโมเลกุลสีย้อมได้มากขึ้น ความคงทนต่อแสงและความคงทนต่อการซักล้างของผ้าฝ้ายที่เคลือบย้อมครามเฉลี่ย 4-5 (ดี-ดีมาก) และ 4 (ดี) ตามลำดับ ผ้าฝ้ายเคลือบนาโนโคโตซาน (0.3 และ 0.5 กรัม): นาโนซิงค์ออกไซด์ (1, 2 และ 3 กรัม) ย้อมคราม ความคงทนต่อการซักล้างจำนวน 30 ครั้ง อยู่ในระดับ 4 (ดี) และสามารถป้องกันรังสียูวีได้ดีเยี่ยมด้วยค่า UPF ในช่วง 51.61-60.31

ตารางที่ 4 ปริมาณของแบคทีเรียที่นับได้หลังจากสัมผัสกับเส้นไหมที่ไม่เคลือบและเคลือบซีไอโอดี 4A ที่เวลาเริ่มต้น (0 นาที) และเวลาสุดท้าย (24 ชั่วโมง)

ตัวอย่างเส้นไหม	ชนิดสารรีดิวซ์	ปริมาณของแบคทีเรีย CFU/กรัม					
		<i>Escherichia coli</i>			<i>Staphylococcus aureus</i>		
		เวลา 0 นาที	เวลา 24 ชม.	% reduction	เวลา 0 นาที	เวลา 24 ชม.	% reduction
ชุดควบคุมแบคทีเรีย ไม่สัมผัสกับเส้นไหม	-	>300 x10 ⁶	>300 x10 ⁶	0	28.9 x10 ⁶	16.7 x 10 ⁶	42.2
เคลือบซีไอโอดี 4A 4 กรัม	-	>300 x10 ⁶	>300 x10 ⁶	0	28.8 x10 ⁶	3.6 x 10 ⁵	98.6
ไม่เคลือบ	มะขาม	>300 x10 ⁶	>300 x10 ⁶	0	25.6 x10 ⁶	<1.0 x 10 ¹	100
	กล้วยน้ำว้า	>300 x10 ⁶	>300 x10 ⁶	0	26.7 x10 ⁶	3.2 x 10 ⁵	98.8
เคลือบซีไอโอดี 4A 4 กรัม	มะขาม	>300 x10 ⁶	>300 x10 ⁶	0	27.1 x10 ⁶	<1.0 x 10 ¹	100
	กล้วยน้ำว้า	>300 x10 ⁶	>300 x10 ⁶	0	26.3 x10 ⁶	1.35 x 10 ⁴	99.5

ตารางที่ 4 พบว่า ปริมาณของแบคทีเรียที่ใช้ทดสอบหลังจากสัมผัสกับเส้นไหมที่เคลือบซีไอโอดี 4A 4 กรัม ที่เวลาเริ่มต้น (0 นาที) และเวลาสุดท้าย (24 ชั่วโมง) เมื่อนำไหมที่เคลือบสารต้านจุลินทรีย์ มาทดสอบการสัมผัสกับเชื้อแบคทีเรีย *Escherichia coli* และ *Staphylococcus aureus* พบว่า เชื้อแบคทีเรีย *Staphylococcus aureus* มีความไวต่อเส้นไหมที่ไม่เคลือบและเส้นไหมเคลือบซีไอโอดี 4A 4 กรัม ย้อมครามโดยใช้เนื้อกล้วยน้ำว้าและเนื้อมะขามเป็นสารรีดิวซ์ โดยเฉพาะเส้นไหมที่ย้อมครามใช้เนื้อมะขาม เป็นสารรีดิวซ์ เมื่อเทียบกับชุดควบคุม แสดงปริมาณลดลงคิดเป็นเปอร์เซ็นต์การยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย สูงสุด 100 % ขณะที่เชื้อแบคทีเรีย *Escherichia coli* ไม่พบว่ามีผลไวต่อเส้นไหมทดสอบทั้งหมด สอดคล้องกับสุนิตย์ ตาทอง (2558) ได้พัฒนาผ้าฝ้ายขึ้นทอมีย้อมครามด้วยนาโนคาร์บอนแบล็ค และนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ พบว่า ผ้าฝ้ายที่เคลือบด้วยนาโนคาร์บอนแบล็ค และนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์สามารถพัฒนาคุณสมบัติผ้าฝ้ายให้ดีขึ้น และผ้าฝ้ายที่เคลือบด้วยนาโนคาร์บอนแบล็ค 0.2% w/v ต่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ 0.3% w/v มีความสามารถ ในการป้องกันรังสียูวีสูงที่สุด และผ้าฝ้ายที่เคลือบด้วยนาโนคาร์บอนแบล็ค และนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์สามารถยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย *Staphylococcus aureus* และ *Escherichia coli* ได้

สรุปผลการวิจัย

ปริมาณของปูนขาว และปูนแดงที่เหมาะสมในการทำเนื้อคราม คือ 6% เมื่อใช้ปูนขาวเต็มในการแช่ต้นครามจะได้เนื้อครามปริมาณมากกว่าใช้ปูนแดง เกรดสีของเส้นไหมที่ไม่เคลือบและเส้นไหมที่เคลือบซีไอโอดี 4A ย้อมครามที่ใช้เนื้อมะขามและเนื้อกล้วยน้ำว้าเป็นสารรีดิวซ์ พบว่า เส้นไหมมีความเข้มของเกรดสีแตกต่างกัน ความคงทนของสีต่อแสงและความคงทนของสีต่อการซักล้างของเส้นไหมที่ย้อมครามโดยใช้เนื้อมะขามและเนื้อกล้วยน้ำว้าเป็นสารรีดิวซ์ พบว่า โดยเงื่อนไขที่ดีที่สุดคือ เส้นไหมที่เคลือบซีไอโอดี 4A 4 กรัม ย้อมครามโดยใช้เนื้อกล้วยน้ำว้าเป็นสารรีดิวซ์ มีความคงทนของสีต่อแสงอยู่ในระดับดีมาก (5) และเมื่อทดสอบการซักจำนวน 30 ครั้ง ความคงทนต่อซักอยู่ในระดับ 4-5 (ดี-ดีมาก) การทดสอบฤทธิ์การต้านเชื้อแบคทีเรีย *Escherichia coli* และ *Staphylococcus aureus* พบว่า เชื้อแบคทีเรีย *Staphylococcus aureus* มีความไวต่อเส้นไหมเส้นไหมที่ไม่เคลือบและเคลือบซีไอโอดี 4A 4 กรัม ย้อมครามโดยใช้เนื้อกล้วยน้ำว้าและเนื้อมะขามเป็นสารรีดิวซ์ เมื่อเทียบกับชุดควบคุม แสดงปริมาณลดลงคิดเป็นเปอร์เซ็นต์การยับยั้งเชื้อแบคทีเรียสูงสุด 100 เปอร์เซ็นต์

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสาขาวิชาวิทยาศาสตร์ศึกษา และสาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี และขอบคุณวิทยาลัยครูปากเซ จังหวัดจำปาสัก สปป.ลาว ที่สนับสนุนทุนการศึกษาและการวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- จันทิศา แก้วทองมี. (2555). **คู่มือการผลิตผ้าย้อมคราม**. ศูนย์ศึกษาการพัฒนาภูพานอันเนื่องมาจากพระราชดำริ จังหวัดสกลนคร.
- ณศรดา แก้วคง. (2557). **การพัฒนาผ้าย้อมยั้งแบคทีเรียบนวัสดุสิ่งทอ**. ปรินญาวิทยาสาสตรมหาบัณฑิตสาขาเคมีนวัตกรรม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, หน้า 15-30.
- ประวิทย์ อ่วงอารีย์ และ วิจิตรา สุจริต. (2560). **การเพิ่มมูลค่าผลิตภัณฑ์ผ้าครามด้วยรอยเท้าคาร์บอน**. รายงานวิจัย มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร, หน้า 15-34.
- ศูนย์ศึกษาการพัฒนา ภูพานอันเนื่องมาจากพระราชดำริ จังหวัดสกลนคร. (2560). **การผลิตผ้าย้อมคราม**. <puparn.rid.go.th/industry/PDF/19-19.pdf> (สืบค้นเมื่อ 26 มกราคม 2561).
- สุดกมล ลาโสภา, วิภากรณ์ ถากงตา และ สุพัตรา อัดติยะ. (2555). **การพัฒนากระบวนการเตรียมน้ำย้อมสีครามด้วยสารรีดิวซ์จากกล้วย** รายงานวิจัย. มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร, หน้า 15-55.
- สุดกมล ลาโสภา. (2561). **คุณภาพผ้าย้อมครามสกลนครด้วยกระบวนการทางเคมี** รายงานวิจัย มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร, หน้า 70-93.
- สุดาพร ตั้งควนิช. (2563). **การปรับปรุงความคงทนของสีและสมบัติการป้องกันรังสียูวีของผ้าฝ้ายเคลือบนาโนไคโตซานและซิงค์ออกไซด์ย้อมคราม**. วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 3(30), 495-507.
- สุดาพร ตั้งควนิช. (2564). **เคมีของการดูดซับและการประยุกต์ใช้**. สาขาวิชาเคมี มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี, หน้า 105-112.
- สุนิษฐ์ ตาทอง. (2558). **การพัฒนาผ้าฝ้ายเข็นท้อมือย้อมครามด้วยนาโนคาร์บอนแบล็ค และนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์**. วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ศึกษา มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี.
- อนูรัตน์ สายทอง. (2552). **การผลิตสีครามจากต้นคราม**. คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สถาบันราชภัฏสกลนคร, หน้า 65-71.
- อ้อยทิพย์ ผู้พัฒน์. (2552). **สิ่งทอกับการป้องกันรังสียูวีกรณีศึกษาในผ้าฝ้ายย้อมคราม** รายงานการวิจัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, หน้า 90-110.
- Delwar Hossain, Mashiur Rahman Khan and Zulhash Uddin. (2016). Fastness properties and color analysis of natural indigo dye and compatibility study of different natural reducing agents. **Journal of Polymers and the Environment**, 25(4), 1219-1230.
- Hajer Aloulou, Hazem Bouhamed and other. (2017). Elaboration and characterization of ceramic microfiltration membranes from natural zeolite: application to the treatment of cuttlefish effluents. **International Conference on Mechanical, Aeronautical and Automotive Engineering**, 105(18), pp. 1-9.
- Laksanawadee Saikhao, Jantip Setthayanond, Thitinun Karpkird and Potjanart Suwanruji. (2018). Green reducing agents for indigo dyeing on cotton fabrics. **Journal of Cleaner Production**, 197(1), 106-113.

การศึกษาแบบจำลองในการตรวจจับต้นมันสำปะหลัง
จากภาพถ่ายทางอากาศยานไร้คนขับโดยใช้การเรียนรู้เชิงลึก
Model for Detection of Cassava Tree
from Unmanned Aerial Vehicle Imagery Using Deep Learning

มนีรัตน์ ผลประเสริฐ^{1*} บัณฑิต สุวรรณโท² พงษ์ศธร เขิดสม³
E-mail: phonprasert@gmail.com

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันประเทศไทยกำลังประสบปัญหาจากการระบาดของโรคทางใบมันสำปะหลัง ซึ่งก่อให้เกิดผลเสียต่อปริมาณผลผลิตและการส่งออกในภาคอุตสาหกรรม โดยโรคระบาดทางใบที่สำคัญของมันสำปะหลัง ได้แก่ โรคใบไหม้ โรคใบจุดสีน้ำตาล โรคใบจุดไหม้ โรคใบจุดขาว โรคพุ่มแจ้และโรคใบด่างมันสำปะหลัง เป็นต้น จากการสำรวจข้อมูลภาคสนามในเบื้องต้น ผู้วิจัยได้ตระหนักถึงความสำคัญในการแก้ปัญหาดังกล่าว โดยใช้เครื่องมือในการเก็บข้อมูลภาพจากอุปกรณ์อากาศยานไร้คนขับ (UAV) ร่วมกับการวิเคราะห์ประมวลผลภาพด้วยแบบจำลองทางการเรียนรู้เชิงลึก (Deep Learning) โดยงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาแบบจำลองในการตรวจจับต้นมันสำปะหลังจากภาพถ่ายทางอากาศยานไร้คนขับโดยใช้การเรียนรู้เชิงลึก ที่สามารถนำมาใช้ตรวจจับเพื่อระบุตำแหน่งของต้นมันสำปะหลังในแปลงให้ได้ก่อนทำการวิเคราะห์หาโรคในตำแหน่งของต้นมันสำปะหลัง ผู้วิจัยจึงได้ศึกษาใช้แบบจำลอง YOLO v3 ที่เป็นโมเดล Convolutional Neural Network (CNN) มาใช้ในงานตรวจจับวัตถุ (Object Detection) ในภาพถ่ายอากาศยานไร้คนขับจากการศึกษาได้แสดงให้เห็นว่าโมเดล YOLO v3 ได้ค่าผลจากการเรียนรู้ของแบบจำลอง training จำนวน 100 รอบ (epoch) ผลที่ได้คือ ค่า mAP 80.3% ค่า precision 76.2% และค่า recall 72.7% สรุปได้ว่าแบบจำลองโมเดล YOLO v3 สามารถนำมาใช้ตรวจจับต้นมันสำปะหลังจากภาพถ่ายอากาศยานไร้คนขับได้

คำสำคัญ: อากาศยานไร้คนขับ ต้นมันสำปะหลัง การเรียนรู้เชิงลึก การตรวจจับ

Abstract

At present, Thailand is experiencing the problem of an epidemic of cassava leaf diseases. Which negatively affects the output and exports in the industrial sector. The major epidemics of cassava are: cassava bacterial blight, brown leaf spot, white spot, witches broom, and cassava mosaic diseases. From preliminary field surveys, the researchers realized the importance of solving such problems by using a tool to collect image data from Unmanned Aerial Vehicle (UAV) equipment combined with image processing analysis with deep learning models. The purpose of this research is to study a model for detecting cassava trees from unmanned aerial vehicle images using deep learning that can be used to detect and identify the location of the cassava tree in the plot before analyzing the disease. The researcher has therefore studied the use of the YOLO v3 model, a Convolutional Neural Network (CNN) model, used in object detection in unmanned aerial vehicle images. The study result has shown that the YOLO v3 model with 100 epoch of training model is the mAP equal to 80.3%, precision is equal to 76.2%, and recall is equal to 72.7%. It can be used to detect cassava trees in plants plot from unmanned aerial vehicles images too.

Keywords: UAV, cassava tree, deep learning, detection

^{1,2} อาจารย์ประจำหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีสารสนเทศ คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม

³ นักวิชาการ/นักวิจัยทั่วไป อำเภอเมืองขอนแก่น จังหวัดขอนแก่น

ความเป็นมาของปัญหา

พืชเศรษฐกิจทางการเกษตรที่สำคัญของประเทศไทยในปัจจุบัน ได้แก่ ข้าว ยางพารา อ้อย มันสำปะหลัง และปาล์ม ซึ่ง “มันสำปะหลัง” จัดให้เป็นพืชเศรษฐกิจลำดับที่ 4 ที่นิยมปลูกมากในพื้นที่ภูมิภาคตะวันออกเฉียงเหนือ (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2563) ซึ่งในการเพาะปลูกมันสำปะหลัง พบว่า เกษตรกรจะประสบปัญหาหลักที่สำคัญคือ การเกิดโรคระบาดที่เรียกว่า “โรคใบด่างมันสำปะหลัง” ซึ่งเป็นโรคพืชของมันสำปะหลังที่ต้องให้ความสำคัญเป็นอย่างมากเนื่องจากก่อให้เกิดผลกระทบรุนแรงต่อผลผลิตหัวมันสำปะหลังสดที่ลดลงมากถึง 80% - 100% (สำนักวิจัยพัฒนาการอารักขาพืช กรมวิชาการเกษตร, 2561) มีการแสดงอาการบนใบ คือ โรคทางใบ โดยจะแสดงลักษณะเด่นของความผิดปกติที่ส่วนใบ ที่นักพยาธิวิทยาพืชสามารถระบุได้ผ่านการตรวจสอบด้วยสายตา และในปัจจุบันก็ได้มีเทคโนโลยีการเกษตรแม่นยำที่เริ่มเข้ามามีบทบาทช่วยในด้านการเกษตรให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น โดยช่วยให้เกษตรกรสามารถจัดการและควบคุมการเพาะปลูก เพื่อให้มีผลผลิตที่มีคุณภาพและส่งถึงผู้บริโภคได้อย่างเพียงพอต่อความต้องการ นั่นคือ การใช้เทคโนโลยีอากาศยานไร้คนขับ (Unmanned Aerial Vehicle Technology: UAV) โดยมีงานวิจัยที่นำภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับมาใช้แก้ปัญหาด้านการวิเคราะห์โรคใบด่างในพืชที่หลากหลายวิธี ดังจะเห็นได้จากบทความวิจัยการวิเคราะห์ภาพถ่ายอากาศยานไร้คนขับในช่วงคลื่นแสง RGB ร่วมกับการใช้โมเดลสี (Color Space) และดัชนีพืชพรรณ (Vegetation Index: VI) ในการตรวจจับโรคที่เกิดในต้นอ้อย (M. Kerkech, A. Hafiane, 2018) ด้วยโมเดลการเรียนรู้เชิงลึก (Deep Convolutional Neural Network: DCNN) ทำให้ค่าความแม่นยำของการตรวจหาโรครวมกว่า 98.8% และในเวลาต่อมาได้มีการนำเสนอและพัฒนานิเวศการตรวจหาโรครานี้ค้างในผลอ้อยและในใบอ้อยด้วยภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับด้วยกล้องถ่ายภาพมัลติสเปกตรัมร่วมกับเทคนิคการจัดเรียงภาพ (image registration) ใช้โมเดลการเรียนรู้เชิงลึก (M. Kerkech, A. Hafiane and R. Canals, 2020) ในการประมวลผลทำให้ได้ค่าความแม่นยำอยู่ที่ 92% และ 87% ตามลำดับ ซึ่งเป็นการต่อยอดจากงานวิจัยก่อนหน้านี้ที่พัฒนาจากภาพ RGB เป็นภาพ Multispectral แต่ถึงแม้งานวิจัยทั้งสองชิ้นที่กล่าวมาข้างต้นนี้จะได้ค่าความแม่นยำสูง แต่ในขั้นตอนการตรวจจับจะใช้เทคนิคการแบ่งส่วนภาพสำหรับการหาโรครานี้ค้างในต้นพืชที่เป็นเถาเลื้อย อีกทั้งยังเป็นวิธีการเพื่อค้นหาวัดดูในระดับ pixel จึงเป็นวิธีการที่ช้าและไม่เหมาะในการนำมาใช้หาตำแหน่งของต้นมันสำปะหลังที่มุ่งพัฒนาให้โมเดลสามารถตรวจจับและคัดแยกต้นมันสำปะหลังตามลักษณะทรงพุ่มของต้นมันสำปะหลัง

จากรายงานวิจัยที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ผู้วิจัยเล็งเห็นว่าปัจจุบันการทำการเกษตรในประเทศไทย มีการพัฒนาและนำเอาเทคโนโลยีอากาศยานไร้คนขับเข้ามาช่วยงานในการดำเนินกิจกรรมทางการเกษตรมากขึ้น ตั้งแต่กระบวนการรดน้ำ การให้ฮอร์โมน การให้ปุ๋ย การฉีดพ่นยากำจัดวัชพืชและแมลงศัตรูพืช การเก็บเกี่ยวและประมาณการผลผลิต รวมถึงใช้ในการสำรวจ วางแผน และถ่ายภาพวิเคราะห์ ตรวจสอบและเฝ้าติดตาม การวินิจฉัยโรคและระบุโรคในแปลงเพาะปลูก เพื่อสังเกตการเจริญเติบโตและอาการผิดปกติของพืชหากมีการระบาดของโรคพืชได้ ดังนั้น เพื่อให้การเฝ้าระวังโรคในมันสำปะหลังของเกษตรกรมีประสิทธิภาพสูงสุด ผู้วิจัยจึงให้ความสำคัญในส่วนของการตรวจจับต้นมันสำปะหลังจากภาพถ่ายอากาศยานไร้คนขับเป็นขั้นตอนสำคัญในลำดับแรกที่จะช่วยให้เกษตรกรสามารถทราบตำแหน่งของต้นมันสำปะหลังในแปลงที่มีความผิดปกติหรือเป็นโรคได้ โดยมีข้อดีในการเข้าถึงการสำรวจพื้นที่แปลงมันที่มีข้อจำกัดในเรื่องจำนวนแรงงานและเวลาในการเข้าถึง ตลอดจนเหมาะสมต่อการตรวจหาโรคในใบมันสำปะหลังได้ทั่วถึงในบริเวณกว้างได้ รวมทั้งทำให้ประหยัดเวลาและค่าใช้จ่ายในการจ้างแรงงานเข้าสำรวจโรคระบาดในแปลง และการใช้ภาพถ่ายทางอากาศยานไร้คนขับยังสามารถกำหนดข้อมูลขอบเขตและวางแผนการบินถ่ายภาพได้สะดวก เลือกลงเวลาถ่ายภาพได้ ทำให้มีความยืดหยุ่นในการสำรวจมากกว่าวิธีอื่น ข้อมูลภาพถ่ายอากาศยานไร้คนขับมีความเป็นปัจจุบันมากกว่า และใช้อุปกรณ์สำรวจที่มีความทันสมัย ใช้เทคโนโลยีการสำรวจที่เป็นมาตรฐานที่ได้รับการยอมรับทั้งภาครัฐและเอกชนในด้านเกษตรกรรมมากขึ้นอย่างต่อเนื่อง อีกทั้งการนำมาประยุกต์ใช้งานร่วมกับอัลกอริทึมการเรียนรู้เชิงลึก (Deep Learning) ที่เป็นโครงข่ายประสาทเทียมแบบคอนโวลูชัน (Convolutional Neural Network: CNN) มีความสามารถโดดเด่นในการสกัดคุณลักษณะเด่นของภาพ (Feature Extraction) ได้จากรูปแบบ (Pattern) รูปทรง (Shape) และค่าสีของแต่ละจุดภาพ (Color Space) จึงเป็นเหตุผลที่ผู้วิจัยได้เลือกแนวทางที่จะใช้อัลกอริทึมการเรียนรู้เชิงลึกที่มีโครงสร้างแบบ CNN มาประมวลผลข้อมูลประเภทรูปภาพที่มีความซับซ้อนมาใช้แก้ปัญหา เหมาะกับข้อมูลที่ไม่มีโครงสร้างได้ ซึ่งปัจจุบันโครงสร้างประสาทเทียมแบบ CNN ได้รับความนิยมและได้รับการยอมรับในการนำมาใช้งานที่หลากหลายมากขึ้นในด้านการทำเกษตรกรรมแม่นยำ (Precision Agriculture: PA) เช่น การค้นหาตำแหน่ง (Localization) การตรวจจับ (Detection) การวินิจฉัย (Diagnosis) การจำแนก (Classification) และการจัดกลุ่ม (Clustering) รวมทั้งการแบ่งส่วน (Segmentation) จากข้อมูลภาพได้อีกทางหนึ่งที่จะทำให้เกิดประโยชน์สูงสุดต่อการพัฒนาด้านเกษตรกรรมของไทยในอนาคตได้

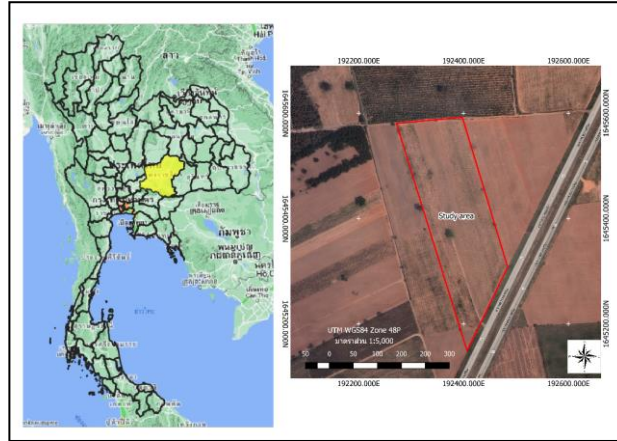
วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการตรวจจับต้นมันสำปะหลังโดยใช้การเรียนรู้เชิงลึกและการวิเคราะห์ภาพถ่ายทางอากาศยานไร้คนขับ

วิธีดำเนินการวิจัย

1. พื้นที่ของการศึกษา

การวิจัยนี้เป็นการวิจัยเชิงทดลอง โดยได้เลือกตัวแทนพื้นที่การศึกษาเป็นแปลงมันสำปะหลังพันธุ์เกษตรศาสตร์ 50 (KU50) ที่มีอายุปลูกที่ 3 เดือน โดยตั้งอยู่บนพิกัด 14°51'49.3"N 102°08'31.0"E ตำบลไชยมงคล อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา มีขนาดพื้นที่ 16 ไร่ ดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 ตำแหน่งและลักษณะทางภูมิศาสตร์ของพื้นที่แปลงมันสำปะหลังที่ใช้ในการศึกษา ตำบลไชยมงคล อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา

2. เครื่องมือที่ใช้ในการเก็บข้อมูล

2.1 ฮาร์ดแวร์

2.1.1 โดรน (Drone) หรืออากาศยานไร้คนขับ (UAV: Unmanned Aerial Vehicle) ใช้สำหรับการบินสำรวจเก็บข้อมูลภาคสนามของไร่มันสำปะหลังอายุ 1 เดือน และ 3 เดือน

2.1.2 กล้องมัลติสเปกตรัม ใช้สำหรับถ่ายภาพหลายช่วงคลื่นเพื่อสำรวจไร่มันสำปะหลัง

2.2 ซอฟต์แวร์

2.2.1 โปรแกรม Qgis

2.2.2 โปรแกรม Pix4D โปรแกรมรวมภาพถ่ายอากาศยานไร้คนขับ โดยจะได้ภาพแต่ละช่วงคลื่นทั้งหมด 5 band

ได้แก่ R, G, B, NIR, RedEdge

2.2.3 โปรแกรม Google Colab

2.2.4 Python 3

2.2.5 Keras

2.2.6 Tensorflow

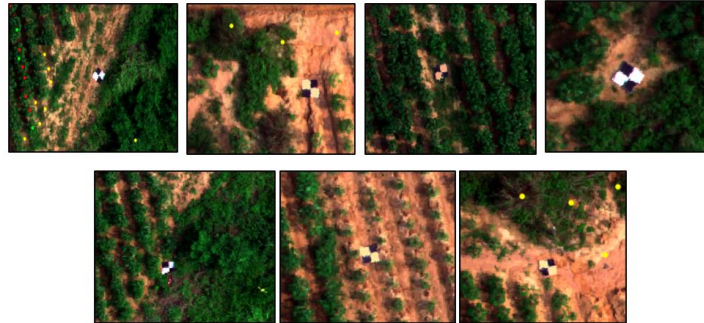


ภาพที่ 2 เครื่องมือที่ใช้ในการเก็บข้อมูล

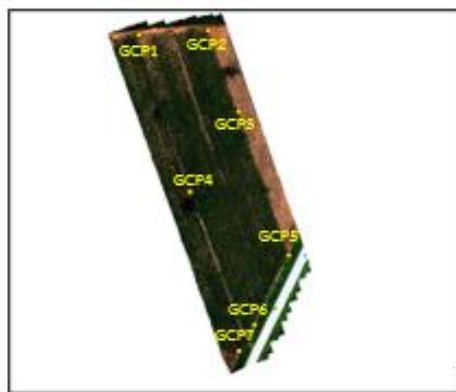
3. การเก็บรวบรวมข้อมูล

สามารถแบ่งออกเป็นขั้นตอน 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่ 1 การสำรวจข้อมูลภาคสนาม ส่วนที่ 2 การเตรียมชุดข้อมูลสำหรับพัฒนาฝึกฝนโมเดล

3.1 การสำรวจข้อมูลภาคสนาม ในการสำรวจภาคสนามเพื่อทำแผนที่ภาพถ่ายด้วยอากาศยานไร้คนขับจำเป็นต้องกำหนดจุดควบคุมภาพ (GCP) สำหรับการกำหนดพิกัด Georeferencing และช่วยในการตรวจสอบความถูกต้องของแผนที่ โดยต้องวางจุด GCP ให้ครอบคลุมพื้นที่การศึกษาตามความลาดชัน ซึ่งในการศึกษานี้ได้ทำการวางจุด GCP จำนวน 7 จุด ดังแสดงในภาพที่ 3 และภาพที่ 4



ภาพที่ 3 แสดงการวางจุด Ground Control Points (GCPs) ในแปลงตัวอย่าง



ภาพที่ 4 แสดงตำแหน่งการวางจุด GCP ในพื้นที่ศึกษา

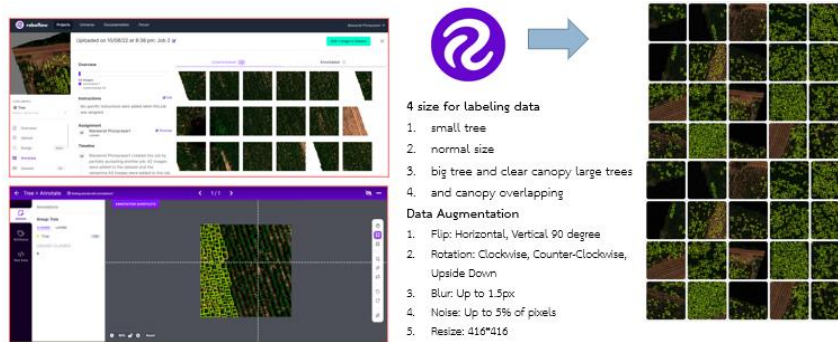
การศึกษานี้ได้บินถ่ายภาพพื้นที่ศึกษาด้วยอากาศยานไร้คนขับรุ่น VESPA HEX 650 (HG Robotic company, Thailand) และถ่ายภาพด้วยกล้องมัลติสเปกตรัม (Multispectral imaging camera) ที่มีความยาวหลายช่วงคลื่น โดยประกอบด้วยช่วงคลื่นสำคัญทั้งหมด 5 ช่วงคลื่น (bands) ได้แก่ ช่วงคลื่นสีแดง (Red) สีเขียว (Green) สีน้ำเงิน (Blue) ช่วงคลื่นอินฟราเรดใกล้ (NIR) และช่วงคลื่นขอบแดง (Red Edge) กำหนดพื้นที่บินและวางแผนการบินแบบอัตโนมัติผ่านแอปพลิเคชัน HGMC (HG Robotics HiveGround Mission Control) โดยกำหนดรูปแบบเส้นทางการบิน กำหนดความสูงบิน 44 เมตร ที่ให้ค่าความละเอียดภาพถ่าย (Ground Sampling Distance: GSD) เท่ากับ 3 เซนติเมตร/จุดภาพ กำหนดความเร็วการบิน กำหนดการซ้อนทับด้านหน้า (Front Overlap) เท่ากับ 80% และการซ้อนทับด้านข้าง (Side Overlap) เท่ากับ 60% จากนั้นข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศจะถูกนำไปประมวลผลด้วยโปรแกรม Pix4Dmapper เพื่อใช้ในการรวมภาพถ่ายออร์โธ (Orthophoto) และวิเคราะห์ภาพถ่ายเบื้องต้นด้วยโปรแกรม Qgis



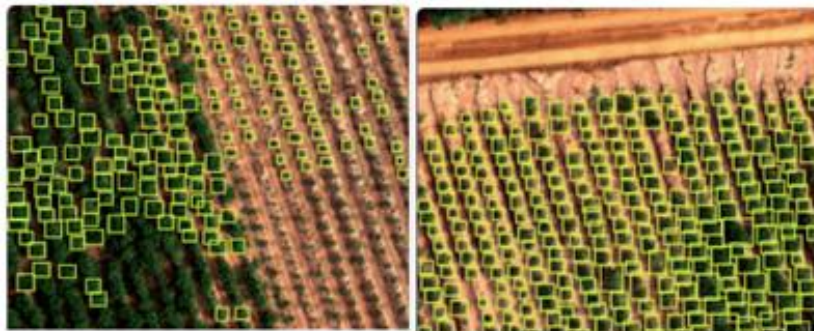
ภาพที่ 5 การสำรวจเพื่อเก็บบันทึกข้อมูลทางกายภาพในส่วนขนาดของต้นมันสำปะหลัง

3.2 การเตรียมชุดข้อมูลสำหรับพัฒนาฝึกฝนโมเดล

สำหรับการเตรียมข้อมูลฝึกฝนโมเดลจะนำภาพต้นฉบับของแปลงมันสำปะหลังมาทำการตัดแบ่งเป็นขนาดเล็ก จากนั้นจะนำมาเข้าซอฟต์แวร์ “Roboflow” ซึ่งเป็นเครื่องมือทาง computer vision developer framework เพื่อทำการกำหนดป้ายชื่อ (Labeling) ให้กับต้นมันสำปะหลัง โดยมีการกำหนดลักษณะของภาพต้นมันสำปะหลังที่จะทำการ labeling อยู่ด้วยกัน 4 ลักษณะ ได้แก่ ภาพต้นมันที่มีลักษณะลำต้นขนาดเล็ก ภาพต้นมันที่มีลักษณะลำต้นขนาดกลาง ภาพต้นมันที่มีลักษณะลำต้นขนาดใหญ่ และมีทรงพุ่มชัดเจน และภาพต้นมันที่มีลักษณะลำต้นขนาดใหญ่และมีทรงพุ่มติดกันหนาแน่น แต่ชุดข้อมูลภาพมีจำนวนน้อยเกินไป สำหรับการฝึกฝน จึงต้องมีการเพิ่มปริมาณของภาพที่ใช้ในการฝึกฝนด้วยเทคนิค Data Augmentation โดยใช้รูปแบบการกลับด้าน (Flip: Horizontal, Vertical 90 องศา) รูปแบบการหมุนภาพ (Rotation: Clockwise, Counter-Clockwise, Upside Down) รูปแบบการเบลอภาพ (Blur: Up to 1.5px) รูปแบบการเพิ่มสัญญาณรบกวนภาพ (Noise: Up to 5% of pixels) และการลดขนาดภาพ (Resize: 416*416) เพื่อให้ภาพมีขนาดที่เหมาะสมกับโมเดลของอัลกอริทึม YoloV3 ดังแสดงในภาพที่ 6 และภาพที่ 7 จากนั้นจึงทำการแบ่งชุดข้อมูลออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ Train set = 80%, Test set = 10%, Validation = 10% ดังแสดงในภาพที่ 8



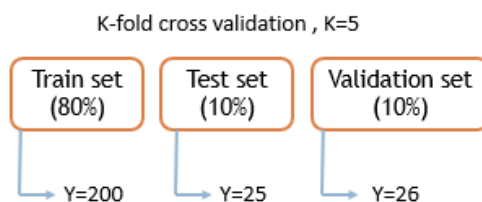
ภาพที่ 6 แสดงตัวอย่างภาพข้อมูลการทำ Data Labeling ที่ใช้ในการฝึกฝนโมเดลตรวจจับต้นมันสำปะหลัง



ภาพที่ 7 แสดงตัวอย่างภาพที่ผ่านการทำ Data Labeling

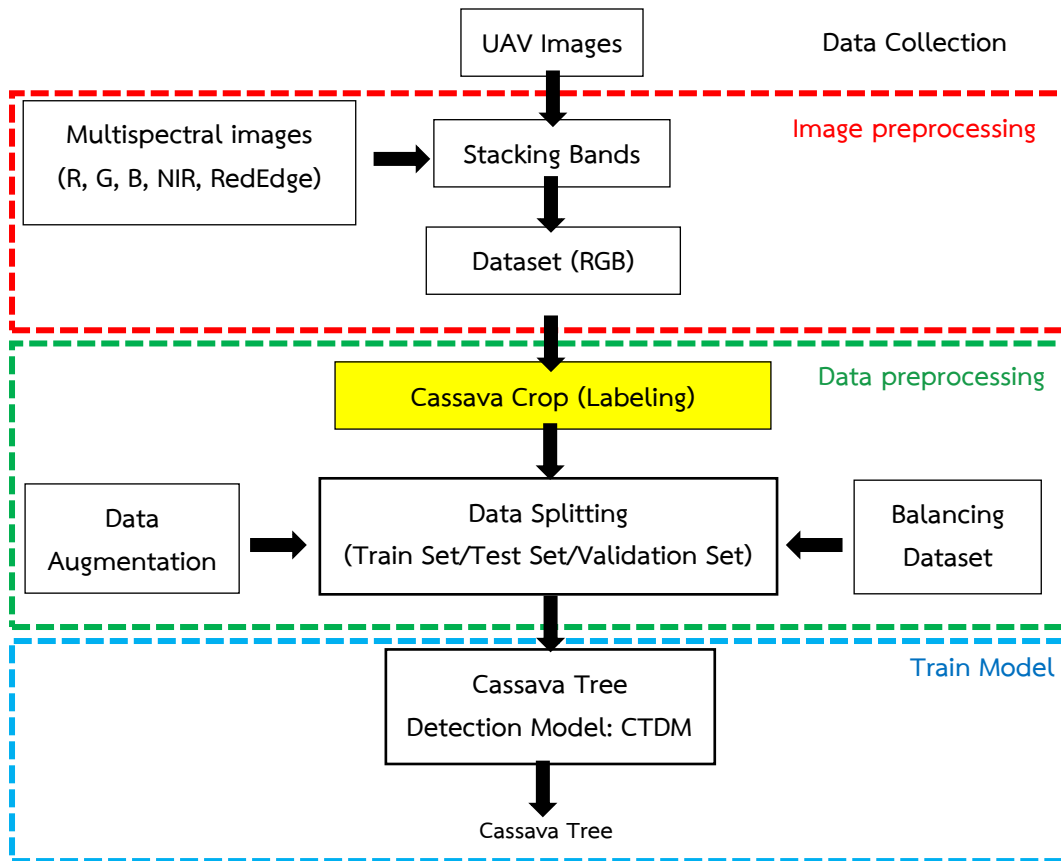
Labeling	Amount
Cassava (y)	251

Non-Data augmentation



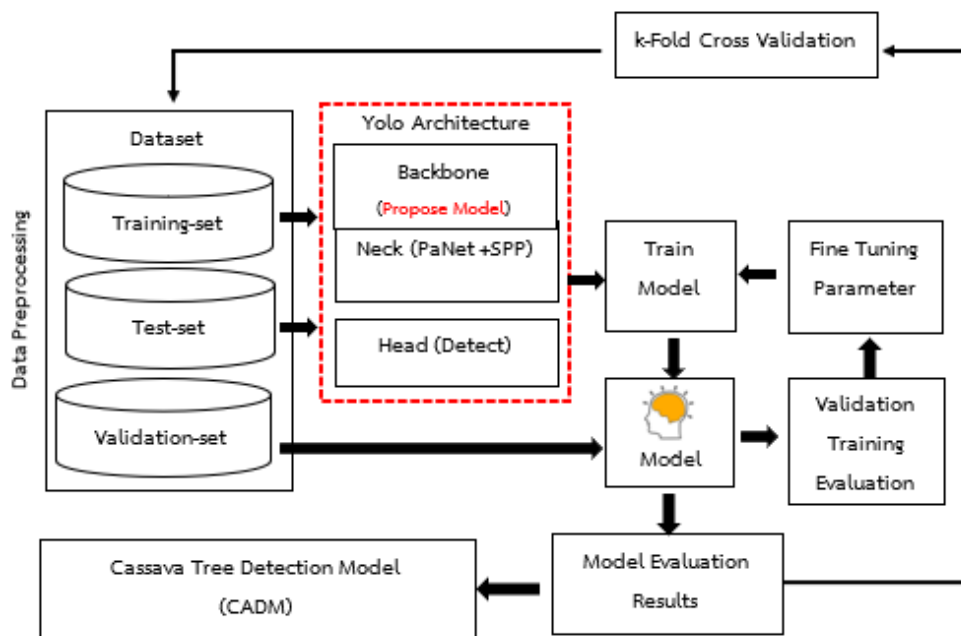
ภาพที่ 8 แสดงตัวอย่างข้อมูลที่ใช้ในการฝึกฝนโมเดลตรวจจับต้นมันสำปะหลัง

4. แผนภาพการวิจัย



ภาพที่ 9 ภาพรวมกระบวนการวางแผนการวิจัย (Research Plan)

5. ขั้นตอนการพัฒนาและการประเมินผลโมเดลตรวจจับต้นมันสำปะหลัง (Cassava Tree Detection Model: CTDM)



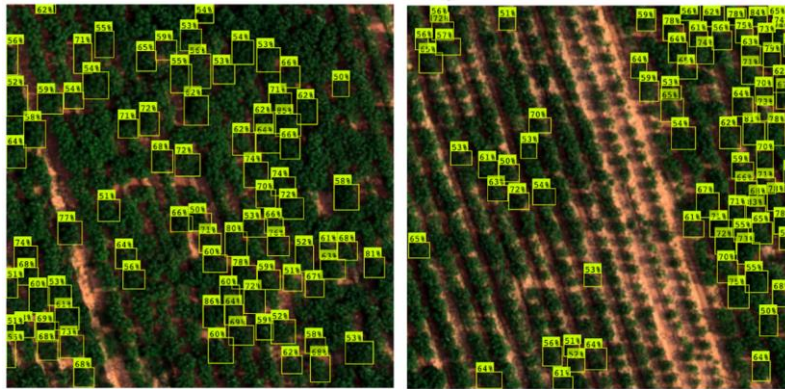
ภาพที่ 10 แผนภาพขั้นตอนการพัฒนาโมเดลตรวจจับต้นมันสำปะหลัง

6. การวิเคราะห์ข้อมูล

สำหรับการวิเคราะห์ข้อมูลในการออกแบบการทดลองของโมเดลตรวจจับต้นไม้ลำปะหลัง (CTDM) จะใช้อัลกอริทึม YOLO v3 โดยยังไม่มีการปรับแต่งค่า Parameter สำหรับการตรวจจับ จะทำการแบ่งชุดข้อมูลออกเป็น Train 80% และ Test 20% ซึ่งในชุดข้อมูล Train จะแบ่งออกเป็นชุดข้อมูล Validation 10% มีการกำหนดรอบการทำงานที่ Epoch = 100, Batch size = 32, LR = 0.0001, Optimizer = adam ได้ค่า Precision = 76.2%, Recall = 72.7% และ F1-Score = 80.3%

ผลการวิจัย

จากการวิเคราะห์ข้อมูลภาพจากอากาศยานไร้คนขับด้วยโมเดล YOLO v3 โดยที่ยังไม่มีการปรับแต่งค่า parameter สำหรับการตรวจจับต้นไม้ลำปะหลัง พบว่า แบบจำลองโมเดล YOLO v3 สามารถนำมาใช้ตรวจจับต้นไม้ลำปะหลังจากได้ โดยได้ค่า ค่า mAP เท่ากับ 80.3% ค่า precision เท่ากับ 76.2% และค่า recall เท่ากับ 72.7% ซึ่งชุดข้อมูล train loss และ validation loss ให้ผลที่ใกล้เคียงกัน



ภาพที่ 11 ผลการทดลองพัฒนาโมเดลตรวจจับต้นไม้ลำปะหลังโดยใช้อัลกอริทึม YOLO v3

อภิปรายผล

จากผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่า การบินถ่ายภาพเก็บข้อมูลด้วยกล้องที่ติดบนอากาศยานไร้คนขับ เพื่อตรวจจับต้นไม้ลำปะหลัง ที่ความสูงบิน 44 เมตร ที่ความละเอียดจุดภาพ (GSD) 3 ซม. โดยทำการประเมินประสิทธิภาพของโมเดลตรวจจับต้นไม้ลำปะหลัง โดยรวมด้วยอัลกอริทึม YOLO v3 ที่ค่า mAP เท่ากับ 80.3% โดยสอดคล้องกับงานวิจัยของ M. Kerkech, A. Hafiane and R. Canals. (2020) โดยใช้ภาพสะท้อนช่วงคลื่น RGB เพียงอย่างเดียวเหมือนกัน อีกทั้งโมเดลในงานวิจัยนี้ยังไม่มีการปรับค่า parameter ของโมเดล แต่อย่างใด ซึ่งงานวิจัยนี้มุ่งเน้นใช้ค่าสะท้อนแสงช่วงคลื่นให้สามารถทดสอบตรวจจับต้นไม้ลำปะหลังได้ ซึ่งอาจทำให้ผลการวิเคราะห์ข้อมูลมีความแปรผันมาก เนื่องจากการวิจัยครั้งนี้เป็นการทดลองกับตัวอย่างที่เป็นแปลงปลูกต้นไม้ลำปะหลังเพียง 1 แปลงรวมถึงภาพที่ได้จากอากาศยานไร้คนขับอาจมีความคลาดเคลื่อนในส่วนของมุมกล้อง การรับแสง และความเอียงเนื่องจากแรงลมในขณะที่ทำการบิน อีกทั้งความละเอียดจุดภาพอาจจะยังไม่ละเอียดพอ หากต้องการตรวจจับต้นไม้ลำปะหลังให้มีความแม่นยำสูงอาจจะต้องใช้การวิเคราะห์ผลค่าดัชนีพืชพรรณร่วมด้วย

สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาวิจัยในครั้งนี้แสดงให้เห็นว่าค่าการสะท้อนแสงจากข้อมูลภาพ RGB จากอากาศยานไร้คนขับ สามารถนำมาใช้เป็นข้อมูลนำเข้าในแบบจำลอง YOLO v3 เพื่อใช้ตรวจจับต้นไม้ลำปะหลังได้ดีในระดับเบื้องต้นเท่านั้น หากมีการเพิ่มความสามารถในการปรับค่า Hyperparameter ของโมเดล และมีการปรับแต่งโครงสร้างของ Backbone ในส่วนของการกำหนดโครงสร้างชั้นสกัดคุณลักษณะ รวมถึงการทดลองจับคู่ Hyperparameter ของโมเดลด้วยจะช่วยให้ผลการตรวจจับได้ดียิ่งขึ้น

ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะในการนำผลการวิจัยไปใช้

1. ควรนำไปใช้กับต้นไม้ลำปะหลังที่มีอายุตั้งแต่ 3 เดือน เพราะยังสามารถเห็นภาพทรงพุ่มของต้นไม้ลำปะหลังได้ชัดเจน
2. ควรนำไปใช้กับต้นไม้ลำปะหลังพันธุ์เกษตรศาสตร์ 50 เพื่อความแม่นยำในการตรวจจับ

ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยครั้งต่อไป

1. ควรมีการใช้โมเดลงานงาน Detection อื่นๆ เพิ่มเติม ซึ่งจะช่วยให้ได้โมเดลที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด
2. ควรมีการเปรียบเทียบกับ YOLO เวอร์ชันอื่นๆ ด้วย

เอกสารอ้างอิง

- ชัตติยานี ศรีแฉล้ม และ คณะ (2561). การศึกษาค่าสะท้อนพลังงานของมันสำปะหลังจากข้อมูลดาวเทียมในเขตอำเภอโชคชัย จังหวัดนครราชสีมา. วารสารวิจัยและพัฒนา วไลยอลงกรณ์ในพระบรมราชูปถัมภ์ สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 13(3), 12-22.
- สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. (2563). สถานการณ์การผลิตมันสำปะหลังโรงงานย้อนหลัง 5 ปีล่าสุด. สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. <http://mis-app.oae.go.th/product/มันสำปะหลัง_โรงงาน> (สืบค้นเมื่อ 20 เดือนตุลาคม 2564).
- สำนักวิจัยพัฒนาการอารักขาพืช กรมวิชาการเกษตร. (2561). คู่มือการสำรวจและเฝ้าระวัง โรคใบต่างของมันสำปะหลังเบื้องต้น. กรุงเทพฯ: กรมวิชาการเกษตร.
- Abdullakasm, W., Powbunthorn, K., Unartngam, J., and Takigama, T. (2011). An images analysis technique for recognition of brown leaf spot disease in cassava. *Tarim. Makinalari. Bilimi. Dergisi*, 7, 165–169.
- Aduwo, J. R., Mwebaze, E., and Quinn, J. A. (2010). **Automated vision-based diagnosis of Cassava Mosaic Disease**, in *Industrial Conference on Data Mining-Workshops* (New York, NY), 114–122.
- Dubey, S. R., and Jalal, A. S. (2014). **Adapted approach for fruit disease identification using images**. arXiv preprint arXiv: 1405.4930.
- Durmu,s, H., Güne,s, E. O., and Kirci, M. (2017). Disease detection on the leaves of the tomato plants by using deep learning, in **2017 6th International Conference on Agro-Geoinformatics** (Fairfax, VA: IEEE), 1–5. doi: 10.1109/Agro-Geoinformatics.2017.8047016.
- Fuentes, A., Yoon, S., Kim, S. C., and Park, D. S. (2017). **A robust deep-learning based detector for real-time tomato plant diseases and pests recognition**. *Sensors* 17: 2022. doi: 10.3390/s17092022.
- Gibson, D., Burghardt, T., Campbell, N., and Canagarajah, N. (2015). Towards automating visual in-field monitoring of crop health, in **IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)**, 2015 (Quebec City, QC: IEEE), 3906–3910.
- Kumar, M., Gupta, P., and Madhav, P. (2020). Disease detection in coffee plants using convolutional neural network, in **2020 5th International Conference on Communication and Electronics Systems (ICCES)** (Coimbatore: IEEE), 755–760. doi: 10.1109/ICCES48766.2020.9138000.
- Liu, B., Ding, Z., Tian, L., He, D., Li, S., and Wang, H. (2020). **Grape leaf disease identification using improved deep convolutional neural networks**. *Front. Plant Sci.* 11:1082. doi: 10.3389/fpls.2020.01082.
- Liu, B., Zhang, Y., He, D., and Li, Y. (2017). **Identification of apple leaf diseases based on deep convolutional neural networks**. *Symmetry* 10:11. doi:10.3390/sym10010011.
- M Dian Bah., Adel Hafiane., and Raphael Canals. (2018). Deep Learning with Unsupervised Data Labeling for Weed Detection in Line Crops in UAV Images., **Remote Sens**, 10, 1690; doi:10.3390/rs10111690.
- M. Kerkech, A. Hafiane and R. Canals. (2020). Vine disease detection in UAV multispectral images using optimized image registration and deep learning segmentation approach. **Computers and Electronics in Agriculture**, 174 (2020). <<http://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105446>>
- M. Kerkech, A. Hafiane. (2018). Deep learning approach with colorimetric spaces and vegetation indices for vine diseases detection in UAV images. **Computers and Electronics in Agriculture**, 155(2018), 237-243. <<http://doi.org/10.1016/j.compag.2018.10.006>>
- Metlek S., (2021). “Disease Detection From Cassava Leaf Images With Deep Learning Methods In Web Environment” **Int. J. of 3D printing Tech. Dig. Ind.**, 5(3), 625-644, (2021).
- Mwebaze, E., and Owomugisha, G. (2016). Machine learning for plant disease incidence and severity measurements from leaf images, in **Machine Learning and Applications (ICMLA)**, 2016 15th IEEE International Conference on (IEEE) (Anaheim, CA).
- Puig, E., Gonzalez, F., Hamilton, G., and Grundy, P. (2015). Assessment of crop insect damage using unmanned aerial systems: a machine learning approach, in **21st International Congress on Modelling and Simulation (MODSIM2015)**, (Gold Coast, QLD). Available online at: <https://eprints.qut.edu.au/95241/>.

ผลของการฉีดวัคซีนที่มีผลต่อการป้องกันโรคปอดอักเสบภายใต้ตัวแบบทางคณิตศาสตร์ กรณีศึกษาในจังหวัดภูเก็ต

Effect of Vaccination on Pneumonia Prevention Under Mathematical Model Case Studies in Phuket

อาชुरา หะแวอาแซ¹ กันตณ ชัยเสนา² ประไพพิมพ์ สุระเชษฐภคิน³ อนุวัตร จิรวัดนาพาณิช⁴

E-mail: s6212229104@pkru.ac.th

บทคัดย่อ

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาและวิเคราะห์เสถียรภาพของ ผลของการฉีดวัคซีนที่มีผลต่อการป้องกันโรคปอดอักเสบภายใต้ตัวแบบทางคณิตศาสตร์ โดยใช้วิธีการวิเคราะห์ตามวิธีมาตรฐาน ศึกษาจุดสมดุลเสถียรภาพของจุดสมดุล หาค่าตอบเชิงวิเคราะห์ โดยศึกษาผลการฉีดวัคซีนสำหรับตัวแบบเชิงคณิตศาสตร์และหาค่าตอบเชิงตัวเลข ผลวิจัยพบว่าจุดสมดุลที่ไม่มีโรคและจุดสมดุลที่มีโรค เป็น Local Asymptotically Stable (อัตราการติดเชื้อแบบไม่เชิงเส้นโดยวิเคราะห์เงื่อนไขที่ทำให้จุดสมดุลไม่มีเชื้อโรคและจุดสมดุลที่ติดเชื้อมีเสถียรภาพกำกับเฉพาะที่) และมีค่าระดับการติดเชื้อเป็น $R_0 = \frac{\eta\beta N\gamma}{(\gamma+\mu)(\theta+\mu)(\Omega+\mu)}$

และผลการฉีดวัคซีนเป็นปัจจัยที่มีผลต่อตัวแบบเชิงคณิตศาสตร์ ถ้าประชากรที่เสี่ยงต่อการติดเชื้อมีการฉีดวัคซีนป้องกันจำนวนมากจะส่งผลให้การแพร่ระบาดลดลง

คำสำคัญ: ตัวแบบเชิงคณิตศาสตร์ โรคปอดอักเสบ การฉีดวัคซีนป้องกัน

Abstract

The objective of this research is to develop and analyze the stability Effect of vaccination on pneumonia prevention under mathematical model Case studies in Phuket. Which analyzed the model using standard analytical methods. Study the equilibrium point study the stability of the equilibrium point. Analytical Answers By studying the vaccination rates in a mathematical model and finding numerical answers. The results showed that the disease-free equilibrium and the disease-associated equilibrium were Local Asymptotically Stable (Nonlinear infection rate by analyzing conditions performed Let the equilibrium point free of pathogens and the equilibrium point infected stabilize locally directed) and the infection level was $R_0 = \frac{\eta\beta N\gamma}{(\gamma+\mu)(\theta+\mu)(\Omega+\mu)}$

vaccination rates was a factor affecting the mathematical model. If a population at risk of infection has a large number of vaccinations, this will reduce the spread of the disease.

Keywords: mathematical model, pneumonia, prevention vaccination

ความเป็นมาของปัญหา

คณิตศาสตร์ได้เข้ามามีบทบาทเกี่ยวข้องในการดำรงชีวิตของมนุษย์ สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในหลากหลาย โดยเฉพาะทางการแพทย์สามารถประยุกต์ใช้ คณิตศาสตร์เพื่อจำลองการเกิดโรคและการ รักษาโรคต่างๆ รวมทั้งเป็นเครื่องมือช่วยทำความเข้าใจเกี่ยวกับสุขภาพหลายๆด้าน อาทิสภาพแวดล้อม ที่ทำให้เกิดโรคต่างๆ การป้องกันโรค การทดสอบปริมาณยา เป็นต้น (อนุวัตร จิรวัดนาพาณิชและคณะ, 2562)

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เป็นวิธีการหนึ่งของการอธิบายสถานการณ์ในชีวิตจริงในแบบภาษา คณิตศาสตร์ โดยการเปลี่ยนสถานการณ์ให้อยู่ในรูปของตัวแปรและสมการโดยจะให้ความสำคัญกับตัวแปรที่สำคัญแบบจำลองมีจุดมุ่งหมายเพื่อจะจับองค์ประกอบที่สำคัญของเหตุการณ์หนึ่งๆเราสามารถตรวจสอบความถูกต้องของกลไกคณิตศาสตร์หนึ่งที่ถูกสร้างขึ้นมาได้เพื่อจะตรวจสอบว่าแบบจำลองนั้น สะท้อนสถานการณ์ในชีวิตจริงหรือไม่ (แคทลียา ดวงเกตู, 2556)

โรคปอดอักเสบ (pneumonia) หมายถึง การติดเชื้อในเนื้อเยื่อพาราเรงคิม่าของปอด โดยเชื้อที่เป็นสาเหตุ ได้แก่ แบคทีเรียนิวโมคอคคัส ความรุนแรงของโรคปอดอักเสบนั้นมีการแสดงแตกต่างกัน ผู้ป่วยอาจมีอาการเพียงเล็กน้อยจนถึงเสียชีวิต

¹ นักศึกษาระดับปริญญาตรี หลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาคณิตศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยราชภัฏภูเก็ต

^{2,3} สาขาคณิตศาสตร์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏภูเก็ต

⁴ สาขาคณิตศาสตร์ คณะครุศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏภูเก็ต

อัตราการเป็นโรคและอัตราการเสียชีวิต มีแนวโน้มสูงขึ้น ส่วนใหญ่เป็นการติดเชื้อในกลุ่มผู้สูงอายุ 65 ปี ขึ้นไป โดยสาเหตุส่วนใหญ่เกิดจากแบคทีเรีย โดยสามารถติดต่อได้จากการหายใจเอาเชื้อที่แพร่กระจายอยู่ในอากาศเข้าไป หรือจากการไอ จามรดกัน รวมถึงการคลุกคลีใกล้ชิดกับผู้ป่วย โรคปอดอักเสบเป็นโรคเฝ้าระวังของปี 2565 โดยมีผู้ป่วยสะสม 151,687 ราย (กองระบาดวิทยา กรมควบคุมโรค, 2565) โดยจังหวัดภูเก็ตได้มีการอนุมัติการฉีดวัคซีนในปี 2566 และวัคซีนสามารถฉีดในผู้สูงอายุ ที่อายุมากกว่า 65 ปี, ผู้มีอายุตั้งแต่ 2-65 ปี และผู้มีอายุระหว่าง 19-64 ปี ที่สูบบุหรี่ หรือเป็นโรคหืด นอกจากนี้ วัคซีนยังจะช่วยป้องกันโรคปอดอักเสบแล้วยังช่วยลดความรุนแรงของโรค หากพบการติดเชื้อขึ้นในภายหลัง

จากเหตุข้างต้นผู้วิจัยได้ตระหนักและเห็นประโยชน์ที่ได้รับจึงดำเนินการวิจัย เรื่องผลของการฉีดวัคซีนสำหรับตัวแบบเชิงคณิตศาสตร์ของการป้องกันโรคปอดอักเสบ ซึ่งผู้วิจัยได้เพิ่มค่าพารามิเตอร์ของประสิทธิภาพการฉีดวัคซีนสำหรับตัวแบบเชิงคณิตศาสตร์ของการป้องกันโรคปอดอักเสบ เป็นปัจจัย สำคัญสำหรับการศึกษาในตัวแบบเชิงคณิตศาสตร์ เพื่อสร้างตัวแบบเชิงคณิตศาสตร์สำหรับป้องกันและ ควบคุมโรคปอดอักเสบที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้น

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาพัฒนาผลของการฉีดวัคซีนสำหรับตัวแบบเชิงคณิตศาสตร์ของการป้องกันโรคปอดอักเสบกรณีศึกษาในจังหวัดภูเก็ต
2. เพื่อวิเคราะห์เสถียรภาพผลของการฉีดวัคซีนสำหรับตัวแบบเชิงคณิตศาสตร์ของการป้องกันโรคปอดอักเสบ กรณีศึกษาในจังหวัดภูเก็ต

วิธีดำเนินการวิจัย

การศึกษาวิจัยในครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ศึกษาผลการฉีดวัคซีนสำหรับตัวแบบเชิงคณิตศาสตร์ของการป้องกันโรคปอดอักเสบที่สอดคล้องกับกลุ่มประชากรและลักษณะของการเกิดโรค ซึ่งมีวิธีการวิจัย 2 ขั้นตอนดังนี้

1. การพัฒนาตัวแบบเชิงคณิตศาสตร์ ผู้วิจัยได้แบ่งประชากรออกเป็น 4 กลุ่ม คือ กลุ่มคนที่เสี่ยงต่อการติดเชื้อ กลุ่มคนที่ติดเชื้อแต่ไม่แสดงอาการ กลุ่มคนที่ติดเชื้อแสดงอาการ และกลุ่มคนที่หายจากโรค ผู้วิจัยได้กำหนดตัวแปรดังนี้ $S(t)$ จำนวนคนที่เสี่ยงต่อการติดเชื้อ ณ เวลา t ใดๆ, $E(t)$ จำนวนคนที่ติดเชื้อแต่ไม่แสดงอาการ ณ เวลา t ใดๆ, $I(t)$ จำนวนคนที่ติดเชื้อ ณ เวลา t ใดๆ, $R(t)$ จำนวนคนที่หายจากโรค ณ เวลา t ใดๆ โดย $S(t) > 0$, $E(t) > 0$, $I(t) > 0$ และ $R(t) > 0$ เนื่องจากจำนวนประชากรมีค่าคงที่ไม่ขึ้นกับเวลา คือ $N(t) = S(t) + E(t) + I(t) + R(t)$ ซึ่งเป็นค่าคงที่

2. การวิเคราะห์ตัวแบบเชิงคณิตศาสตร์ การวิเคราะห์ตัวแบบเชิงคณิตศาสตร์เป็นการวิเคราะห์ตามวิธีการมาตรฐาน (Standart method) โดยศึกษาจุดสมดุลและศึกษาเสถียรภาพของจุดสมดุลเพื่อหาเงื่อนไขของพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของจุดสมดุล หาค่าระดับการติดเชื้อโดยใช้วิธี Next Generations Method หาค่าตอบเชิงวิเคราะห์และหาค่าตอบเชิงตัวเลข โดยวิธี Numerical Analysis ดังวิธีการต่อไปนี้

2.1 การวิเคราะห์ตามวิธีมาตรฐาน

การวิเคราะห์ตามวิธีมาตรฐานเป็นการศึกษาจุดสมดุล ค่าระดับการติดเชื้อ และเสถียรภาพของระบบ ดังนี้

2.1.1 การหาขอบเขตของค่าคงที่ เป็นการหาขอบเขตของค่าคงที่และช่วงคำตอบของตัวแปรต่างๆโดยการใช้เทคนิคการอินทิเกรตช่วยในการแสดงหาค่าตอบ $S(t)$, $E(t)$, $I(t)$ และ $R(t)$ ซึ่งมีขอบเขตของค่าคงที่ อยู่ในจำนวนจริงบวก

2.1.2 จุดสมดุล การหาจุดสมดุลดำเนินการโดยจัดสมการเชิงอนุพันธ์ไม่เชิงเส้นของตัวแบบเชิงคณิตศาสตร์ให้เท่ากับศูนย์ คือ $\frac{dS}{dt} = 0, \frac{dE}{dt} = 0, \frac{dI}{dt} = 0, \frac{dR}{dt} = 0$ จะได้ค่าจุดสมดุลที่ไม่มีเชื้อโรค (Disease Free Equilibrium Point: E_0) ใน

กรณีที่ไม่มีการติดเชื้อโรค โดยกำหนดให้ $E_0 = (S, E, I, R) = E_0 \left(\frac{\beta N}{\Omega + \mu}, 0, 0, \frac{\Omega \beta N}{\mu(\Omega + \mu)} \right)$ และจะได้ค่าจุดสมดุลเกิดการแพร่ระบาดของเชื้อโรค (Disease Free Equilibrium Point: E_1) ในกรณีที่มีการระบาดของเชื้อโรค โดยกำหนดให้ $I \neq 0$ จะได้ $E_1 = (S^*, E^*, I^*, R^*)$

2.1.3 การหาค่าระดับการติดเชื้อ (R_0) ค่าระดับการติดเชื้อเป็นค่าเฉลี่ยที่ผู้ป่วยหนึ่งคนสามารถทำให้คนกลุ่มเสี่ยงป่วยเป็นจำนวนกี่คนในช่วงเวลาที่เขายังป่วยอยู่ โดยใช้วิธี Next Generation Method โดยจัดการสมการเชิงอนุพันธ์ไม่เชิงเส้นในรูป $\frac{\partial X}{\partial t} = F(X) - V(X)$ เพื่อหาค่า R_0 จากเมตริกซ์ $P(FV^{-1})$ ซึ่ง $F(X)$ คือ เมตริกซ์ของผู้ป่วยที่เพิ่มขึ้น, $V(X)$ คือ เมตริกซ์ของผู้ป่วยที่เปลี่ยนสถานะจากกลุ่มหนึ่งไปอีกกลุ่มหนึ่ง ได้จากอนุพันธ์ย่อย ดังนี้

$$X = \begin{bmatrix} S \\ E \\ I \\ R \end{bmatrix}, F = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_1(E_0)}{\partial X_i} \end{bmatrix} \text{ และ } V = \begin{bmatrix} \frac{\partial V_i(E_0)}{\partial X_i} \end{bmatrix} \text{ โดยพิจารณา } R_0 \text{ ดังนี้}$$

1. $R_0 > 1$ แสดงว่า โรคมีการระบาดเพิ่มขึ้น (Epidemic)
2. $R_0 = 1$ แสดงว่า โรคเริ่มเสถียร (Endemic)
3. $R_0 < 1$ แสดงว่า โรคไม่มีการแพร่ระบาด

2.2 การวิเคราะห์เสถียรภาพ เป็นการหาค่าลักษณะเฉพาะ (Eigen Value) เพื่ออธิบายคำตอบของสมการเกี่ยวกับค่าความสมดุลสำหรับการตรวจสอบว่าเป็น Local Asymptotically Stable มี 2 กรณี ดังนี้

2.2.1 Local Asymptotically Stable ณ จุด E_0 ของจุดสมดุลที่ไม่มีโรค โดยการตรวจสอบค่าลักษณะเฉพาะของจาโคเบียนเมตริกซ์ ณ สภาวะที่ไม่มีโรค (E_0) ซึ่งจะได้สมการลักษณะเฉพาะจาก $\det(J_0 - \lambda I) = 0$ ซึ่ง J_0 คือ จาโคเบียนเมตริกซ์ ณ จุด E_0 และ I คือ เมตริกซ์เอกลักษณ์ โดยมีข้อกำหนดว่า λ ทุกค่าส่วนจริงจะเป็นลบซึ่งจะสอดคล้องตามเงื่อนไขของ Routh-Hurwitz ซึ่งจะส่งผลให้ค่า $R_0 < 1$

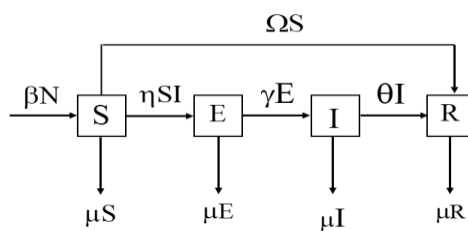
2.2.2 Local Asymptotically Stable ณ จุด E_1 ของจุดสมดุลที่มีโรค โดยการตรวจสอบค่าลักษณะเฉพาะของจาโคเบียนเมตริกซ์ ณ สภาวะที่มีการแพร่ระบาดของโรค (E_1) ซึ่งจะได้สมการลักษณะเฉพาะจาก $\det(J_1 - \lambda I) = 0$ ซึ่ง J_1 คือ จาโคเบียนเมตริกซ์ ณ จุด E_1 และ I คือ เมตริกซ์เอกลักษณ์ โดยมีข้อกำหนดว่า λ ทุกค่าส่วนจริงจะเป็นลบซึ่งจะสอดคล้องตามเงื่อนไขของ Routh-Hurwitz ซึ่งจะส่งผลให้ค่า $R_0 > 1$

2.3 การวิเคราะห์เชิงตัวเลข การวิเคราะห์เชิงตัวเลขเป็นการพิจารณาหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่ทำให้จุดสมดุลที่ไม่มีโรค (Disease Free Equilibrium Point: E_0) และจุดสมดุลที่เกิดการแพร่ระบาดของโรค (Endemic Equilibrium Point: E_1) ที่ทำให้ระบบสมการเชิงอนุพันธ์ไม่เชิงเส้นเป็น Local Asymptotically Stable เพื่อนำค่าพารามิเตอร์ไปคำนวณหาค่าตอบเชิงตัวเลขโดยจำลองแบบด้วยโปรแกรม Matlab (สุกัลยา ศรีสุริฉิน, 2559)

ผลการวิจัย

ตอนที่ 1 ผลการพัฒนาผลการฉีดวัคซีนสำหรับตัวแบบเชิงคณิตศาสตร์ของการป้องกันโรคปอดอักเสบ

จากตัวแปรข้างต้นผู้วิจัยได้สร้างแผนภาพผลการฉีดวัคซีนสำหรับตัวแบบเชิงคณิตศาสตร์ของการป้องกันโรคปอดอักเสบ



ภาพที่ 1 แผนภาพความสัมพันธ์และองค์ประกอบผลของการฉีดวัคซีนสำหรับตัวแบบเชิงคณิตศาสตร์ของการป้องกันโรคปอดอักเสบ

จากภาพที่ 1 สามารถเปลี่ยนตัวแบบเชิงคณิตศาสตร์เป็นระบบสมการเชิงอนุพันธ์แบบไม่เชิงเส้น

$$\frac{dS}{dt} = \beta N - \eta SI - \Omega S - \mu S \quad (1)$$

$$\frac{dE}{dt} = \eta SI - \gamma E - \mu E \quad (2)$$

$$\frac{dI}{dt} = \gamma E - \theta I - \mu I \quad (3)$$

$$\frac{dR}{dt} = \Omega S + \theta I - \mu R \quad (4)$$

โดยมีเงื่อนไขประชากรมนุษย์จำนวนคงที่ $N = S + E + I + R$ เมื่อกำหนดสัญลักษณ์พารามิเตอร์ ได้แก่ β เป็นอัตราการเกิด, μ เป็นอัตราการเสียชีวิต, η เป็นอัตราการสัมผัสเชื้อ, γ เป็นอัตราการฟักตัว, θ เป็นอัตราการหายจากโรค, Ω เป็นอัตราการฉีดวัคซีน และ N เป็นจำนวนประชากรทั้งหมด เนื่องจากค่าอนุพันธ์ของค่าคงที่ที่มีค่าเป็นศูนย์ และค่าจำนวนของประชากรแต่ละกลุ่มจะมีค่าไม่เกิน N โดยดำเนินการดังนี้

1. การวิเคราะห์ตามแบบมาตรฐาน

จาก Rate of change = Rate inflow-Rate outflow จะได้

$$F(X) = \beta N - \eta SI - \Omega S - \mu S + \eta SI - \gamma E - \mu E + \gamma E - \theta I - \mu I + \Omega S + \theta I - \mu R$$

ดังนั้น $\frac{dN}{dt} = \beta N - \mu S - \mu E - \mu I - \mu R$

เมื่อ $S = N, E = 0, I = 0, R = 0$

จะได้ $\frac{dN}{dt} = \beta N - \mu N - \mu(0) - \mu(0) - \mu(0)$

$$\frac{dN}{dt} = \beta N - \mu N$$

$$\frac{dN}{dt} = (\beta - \mu) N$$

แสดงว่า N เป็นค่าคงที่ เมื่อ $\beta = \mu$

1.1 การหาจุดสมดุล โดยจัดสมการอนุพันธ์แบบไม่เชิงเส้นของตัวแบบเชิงคณิตศาสตร์ให้เท่ากับศูนย์จะได้

$$\frac{dS}{dt} = 0, \frac{dE}{dt} = 0, \frac{dI}{dt} = 0, \frac{dR}{dt} = 0 \text{ ดังนี้}$$

$$\beta N - \eta SI - \Omega S - \mu S = 0$$

$$-\eta SI - \Omega S - \mu S = -\beta N$$

$$\eta SI + \Omega S + \mu S = \beta N$$

$$S(\eta I + \Omega + \mu) = \beta N$$

จะได้ $S^* = \frac{\beta N}{\eta I^* + \Omega + \mu}$ (5)

$$E^* = \frac{\eta \beta N I^* (\gamma + \mu)}{\eta I^* + \Omega + \mu}$$
 (6)

$$I^* = \frac{\gamma \eta \beta N (\gamma + \mu) (\theta + \mu) - \Omega - \mu}{\eta}$$
 (7)

$$R^* = \frac{\Omega S + \theta I}{\mu}$$
 (8)

1.1.1 การหาจุดสมดุลที่ไม่มีโรค (E_0) จากสมการ (1), (2), (3) และ (4) จะได้ค่าจุดสมดุลที่ไม่มีโรค (Disease Free Equilibrium Point: E_0) ในกรณีที่ไม่มีโรคติดเชื้อ โดยกำหนดให้ $I=0, S=N$ และ $R=0, E_0 = (S, E, I, R) = E_0 \left(\frac{\beta N}{\Omega + \mu}, 0, 0, \frac{\Omega \beta N}{\mu(\Omega + \mu)} \right)$

เสถียรของระบบ (stability of Systems) ที่จุด E_0 โดยดำเนินการหาสมการลักษณะเฉพาะ $\det(J_0 - \lambda I) = 0$ เพื่อหาค่า λ เมื่อ λ เป็นค่าลักษณะเฉพาะ (Eigen Values) และ I เป็นเมทริกซ์เอกลักษณ์ขนาด 4×4

$$J_0 = \begin{bmatrix} -\Omega - \mu & 0 & -\eta S & 0 \\ 0 & -\gamma - \mu & \eta S & 0 \\ 0 & \gamma & -\theta - \mu & 0 \\ \Omega & 0 & \theta & -\mu \end{bmatrix}$$

$$J_0 - \lambda I = \begin{bmatrix} -\Omega - \mu & 0 & -\eta S & 0 \\ 0 & -\gamma - \mu & \eta S & 0 \\ 0 & \gamma & -\theta - \mu & 0 \\ \Omega & 0 & \theta & -\mu \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \lambda & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \lambda \end{bmatrix}$$

$$\det(J_0 - \lambda I) = \begin{vmatrix} -\Omega - \mu - \lambda & 0 & -\eta S & 0 \\ \eta I & -\gamma - \mu - \lambda & \eta S & 0 \\ 0 & \gamma & -\theta - \mu - \lambda & 0 \\ \Omega & 0 & \theta & -\mu - \lambda \end{vmatrix}$$

$$= (-\mu - \lambda) \left[[(-\Omega - \mu - \lambda)(-\gamma - \mu - \lambda)(-\theta - \mu - \lambda)] - [\gamma\eta(-\Omega - \mu - \lambda)] \right]$$

$$= (-\mu - \lambda)(-\Omega - \mu - \lambda)(\lambda^2 + \lambda(\theta + \gamma + 2\mu) + \mu^2 + \gamma\mu + \theta\mu + \theta\gamma - \gamma\eta)$$

$$0 = (-\mu - \lambda)(-\Omega - \mu - \lambda)(\lambda^2 + \lambda(\theta + \gamma + 2\mu) + \mu^2 + \gamma\mu + \theta\mu + \theta\gamma - \gamma\eta)$$

จะได้

$$\lambda_1 = -\mu$$

$$\lambda_2 = -\Omega - \mu$$

$$\lambda_3 = \frac{-2\mu - \theta - \gamma - \sqrt{(2\mu + \theta + \gamma)^2 - 4(\mu^2 + \gamma\mu + \theta\mu + \theta\gamma - \gamma\eta)}}{2}$$

และ

$$\lambda_4 = \frac{-2\mu - \theta - \gamma + \sqrt{(2\mu + \theta + \gamma)^2 - 4(\mu^2 + \gamma\mu + \theta\mu + \theta\gamma - \gamma\eta)}}{2}$$

1.1.2 การหาจุดสมดุลเกิดการแพร่ระบาดของเชื้อโรค (E_1) จากสมการ (1), (2), (3) และ (4) จะได้ค่าจุดสมดุลที่เกิดการแพร่ระบาดของเชื้อโรค (Endemic Equilibrium Point : E_1) ในกรณีที่มีการแพร่ระบาดของเชื้อโรค โดยกำหนดให้ $I > 0$ และ $S = N$ ซึ่งได้จาก $E_1 = (S^*, E^*, I^*, R^*) = \left(\frac{\beta N}{(\eta I^* + \Omega + \mu)}, \frac{\eta \beta N I^* (\gamma + \mu)}{\eta I^* + \Omega + \mu}, \frac{\gamma \eta \beta N (\gamma + \mu) (\theta + \mu) - \Omega - \mu}{\eta}, \frac{\Omega S + \theta I^*}{\mu} \right)$ ดังนั้น สมการลักษณะเฉพาะที่จุด $E_1 = (S^*, E^*, I^*, R^*)$ โดยให้ $\det(J_1 - \lambda I) = 0$ เพื่อหาค่า λ เมื่อ λ เป็นค่าลักษณะเฉพาะ (Eigen Values) และ I เป็นเมทริกซ์เอกลักษณะขนาด 4×4 ดังนี้

$$J_1 = \begin{bmatrix} -\Omega - \eta I^* - \mu & 0 & -\eta S^* & 0 \\ \eta I^* & -\gamma - \mu & \eta S^* & 0 \\ 0 & \gamma & -\theta - \mu & 0 \\ \Omega & 0 & \theta & -\mu \end{bmatrix}$$

$$J_1 - \lambda I = \begin{bmatrix} -\Omega - \eta I^* - \mu & 0 & -\eta S^* & 0 \\ \eta I^* & -\gamma - \mu & \eta S^* & 0 \\ 0 & \gamma & -\theta - \mu & 0 \\ \Omega & 0 & \theta & -\mu \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \lambda & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \lambda \end{bmatrix}$$

$$J_1 - \lambda I = \begin{bmatrix} -\Omega - \eta I^* - \mu - \lambda & 0 & -\eta S^* & 0 \\ \eta I^* & -\gamma - \mu - \lambda & \eta S^* & 0 \\ 0 & \gamma & -\theta - \mu - \lambda & 0 \\ \Omega & 0 & \theta & -\mu - \lambda \end{bmatrix}$$

$$\det(J_1 - \lambda I) = \begin{vmatrix} -\Omega - \eta I^* - \mu - \lambda & 0 & -\eta S^* \\ \eta I^* & -\gamma - \mu - \lambda & \eta S^* \\ 0 & \gamma & -\theta - \mu - \lambda \end{vmatrix}$$

$$= (-\mu - \lambda) \left[(-\Omega - \eta I^* - \mu - \lambda)(-\gamma - \mu - \lambda)(-\theta - \mu - \lambda) + (-\eta S^*)(\eta I^*)(\gamma) \right] - [\eta S^* (-\Omega - \eta I^* - \mu - \lambda)]$$

1.2 การหาค่าระดับการติดเชื้อ (R_0) เป็นการหารัศมีที่โดดเด่นของการแพร่ระบาดของโรค โดยใช้วิธีการ Next Generation Method โดยจะได้สมการ (1) - (4) จะได้เมทริกซ์ในรูป $\frac{\partial X}{\partial t} = F(X) - V(X)$ เพื่อหาค่า spectral radius $P(FV^{-1})$ ซึ่ง $F(X)$ และ $V(X)$ ได้จากอนุพันธ์ย่อย ดังนี้

$$X = \begin{bmatrix} S \\ E \\ I \\ R \end{bmatrix}, F = \left[\frac{\partial V_i(E_0)}{\partial X_i} \right] \text{ และ } V = \left[\frac{\partial V_i(E_0)}{\partial X_i} \right]$$

เมื่อ $F(X)$ คือเมทริกซ์ของผู้ป่วยที่เพิ่มขึ้น และ $V(X)$ คือเมทริกซ์ของผู้ป่วยที่เปลี่ยนสถานะจากกลุ่มหนึ่งไปอีกกลุ่มหนึ่งโดยพิจารณาค่าระดับการติดเชื้อ (R_0) โดยพิจารณา ดังนี้

$$X = \begin{bmatrix} S \\ E \\ I \\ R \end{bmatrix}, F(X) = \begin{bmatrix} 0 \\ \eta SI \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, V(X) = \begin{bmatrix} -\beta N + \eta SI + \Omega S + \mu S \\ \gamma E + \mu E \\ -\gamma E + \theta I + \mu I \\ -\Omega S - \theta I + \mu R \end{bmatrix}$$

$$\text{จะได้ } F(E_0) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\eta \beta N}{\Omega + \mu} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, V(E_0) = \begin{bmatrix} \Omega + \mu & 0 & \frac{\eta \beta N}{\Omega + \mu} & 0 \\ 0 & \gamma + \mu & 0 & 0 \\ 0 & -\gamma & \theta + \mu & 0 \\ -\Omega & 0 & -\theta & \mu \end{bmatrix}$$

ดังนั้น

$$FV^{-1}(E_0) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\eta \beta N}{\Omega + \mu} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \frac{1}{\Omega + \mu} & \frac{\gamma \eta \beta N}{(\Omega + \mu)^2 (\gamma + \mu)(\theta + \mu)} & \frac{-\eta \beta N}{(\Omega + \mu)^2 (\theta + \mu)} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\gamma + \mu} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\gamma}{(\gamma + \mu)(\theta + \mu)} & \frac{1}{\theta + \mu} & 0 \\ \frac{\Omega}{\mu(\Omega + \mu)} & \frac{\gamma \theta}{\mu(\gamma + \mu)(\theta + \mu)} & \frac{\Omega \eta \beta N}{\mu(\Omega + \mu)^2 (\gamma + \mu)(\theta + \mu)} & \frac{\theta}{\mu(\theta + \mu)} + \frac{(-\Omega) \eta \beta N}{\mu(\Omega + \mu)^2 (\theta + \mu)} - \frac{1}{\mu} \end{bmatrix}$$

$$\text{จะได้ } FV^{-1}(E_0) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\eta \beta N \gamma}{(\gamma + \mu)(\theta + \mu)(\Omega + \mu)} & \frac{\eta \beta N}{(\theta + \mu)(\Omega + \mu)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\text{จาก } \det[FV^{-1}(E_0) - \lambda I_4] = \begin{vmatrix} -\lambda & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\eta \beta N \gamma}{(\gamma + \mu)(\theta + \mu)(\Omega + \mu)} - \lambda & \frac{\eta \beta N}{(\theta + \mu)(\Omega + \mu)} & 0 \\ 0 & 0 & -\lambda & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\lambda \end{vmatrix}$$

กำหนด $\det [FV^{-1}(E_0) - \lambda I_4] = 0$

จะได้ $0 = (-\lambda)(-\lambda)(-\lambda) \left(\frac{\eta\beta N\gamma}{(\gamma+\mu)(\theta+\mu)(\Omega+\mu)} - \lambda \right)$

โดย $\lambda_1 = 0, \lambda_2 = 0, \lambda_3 = 0$ และ $\lambda_4 = \left(\frac{\eta\beta N\gamma}{(\gamma+\mu)(\theta+\mu)(\Omega+\mu)} \right)$

ดังนั้น $\rho(FV^{-1}(E_0)) = \left(\frac{\eta\beta N\gamma}{(\gamma+\mu)(\theta+\mu)(\Omega+\mu)} \right)$

จะได้ค่าระดับการติดเชื้อ คือ $R_0 = \left(\frac{\eta\beta N\gamma}{(\gamma+\mu)(\theta+\mu)(\Omega+\mu)} \right)$

ตอนที่ 2 ผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลขผลของการฉีดวัคซีนสำหรับตัวแบบเชิงคณิตศาสตร์ของการป้องกันโรคปอดอักเสบ
 กรณีศึกษาในจังหวัดภูเก็ต

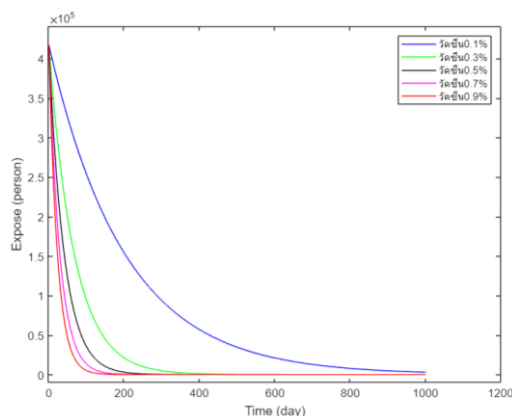
การวิจัยในครั้งนี้ผู้วิจัยได้วิเคราะห์เชิงตัวเลข โดยนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้มาจากหน่วยงานกระทรวงสาธารณสุข จังหวัดภูเก็ต
 ในปี พ.ศ 2563 เกี่ยวกับผลการฉีดวัคซีนป้องกันโรคปอดอักเสบ ซึ่งมีค่าต่างๆ ดังนี้

ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการสำรวจข้อมูลเกี่ยวกับการฉีดวัคซีนป้องกันโรคปอดอักเสบ

ข้อความ	สัญลักษณ์	ค่าพารามิเตอร์	หน่วย
อัตราการเกิดของประชากร	β	4.18111×10^{-5}	คนต่อวัน
อัตราการเสียชีวิตของประชากร	μ	1.69608×10^{-5}	คนต่อวัน
อัตราการฉีดวัคซีน	Ω	0 – 1	คนต่อวัน
อัตราการสัมผัสเชื้อ	η	4.2264×10^{-5}	คนต่อวัน
อัตราการฟักตัวของเชื้อ	γ	8.21918×10^{-3}	คนต่อวัน
อัตราการหายจากโรค	θ	2.53033×10^{-5}	คนต่อวัน
จำนวนประชากรมนุษย์ทั้งหมด	N	417,402	คน

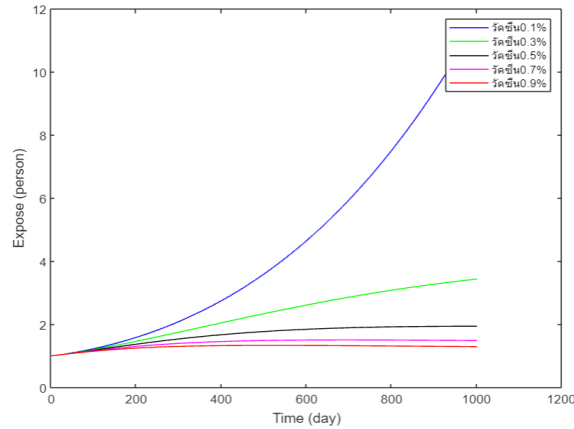
สำนักงานสาธารณสุขจังหวัดภูเก็ต

เมื่อพิจารณาเสถียรภาพของระบบ ณ จุดสมดุลที่ไม่มีโรค จะพบว่าค่าลักษณะเฉพาะทุกค่ามีส่วนจริงเป็นค่าลบ และสอดคล้องกับเงื่อนไขของ Routh-hurwitz ส่งผลให้คำตอบจะลู่เข้าสู่ $E_0 = N, 0, 0, 0$ ดังนั้นจุดสมดุลที่ไม่มีโรค E_0 จะเป็น Local Asymptotically (Fred Brauer, Pauline den Driessche and Jianhong Wu(Eds.) 2008) เมื่อพิจารณาเสถียรภาพของระบบ ณ จุดสมดุลที่มีโรค จะพบว่าค่าลักษณะเฉพาะทุกค่ามีส่วนจริงเป็นค่าลบ และสอดคล้องกับเงื่อนไขของ Routh-hurwitz ส่งผลให้คำตอบจะลู่เข้าสู่ $E_1 = (S^*, E^*, I^*, R^*)$ ดังนั้นจุดสมดุลที่มีโรค E_1 จะเป็น Local Asymptotically



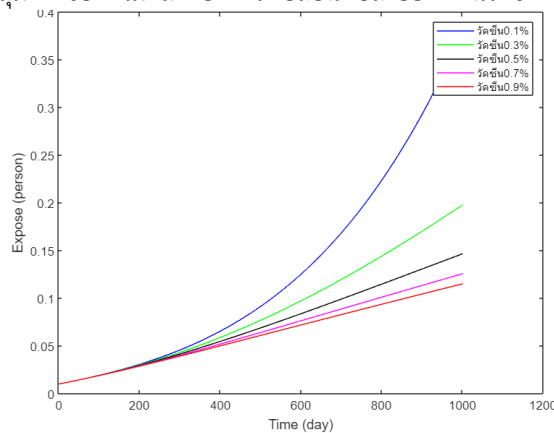
ภาพที่ 2 อัตราการเปลี่ยนแปลงของจำนวนประชากรกลุ่มเสี่ยง (S) ณ เวลา t ใดๆ ($\Omega = 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9$) ตามลำดับ ณ เสถียรภาพของจุดสมดุลมีโรค

จากภาพที่ 2 เมื่อเพิ่มอัตราการฉีดวัคซีนขึ้นป้องกันโรคปอดอักเสบ ลงในตัวแบบเชิงคณิตศาสตร์ให้มากขึ้นจะพบว่า อัตราการเปลี่ยนแปลงของจำนวนประชากรกลุ่มเสี่ยง (S) ณ เวลา t ใดๆ จะค่อยๆ ลดลงและเปลี่ยนแปลงอย่างช้าๆ ซึ่งถ้าประชากรได้รับการฉีดวัคซีนขึ้นป้องกันโรคปอดอักเสบเป็นจำนวนมากขึ้นจะส่งผลให้จำนวนประชากรกลุ่มเสี่ยงลดลงอย่างช้าๆ ซึ่งหมายถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงของจำนวนประชากรกลุ่มเสี่ยงเปลี่ยนไปเป็นกลุ่มติดเชื่อจะ และใช้เวลานานขึ้น หมายความว่ามีการแพร่ระบาดของโรคลดน้อยลง



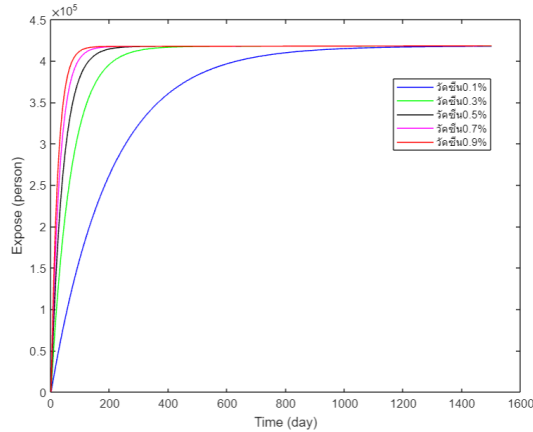
ภาพที่ 3 อัตราการเปลี่ยนแปลงของจำนวนประชากรกลุ่มติดเชื่อแต่ไม่แสดงอาการ (E) ณ เวลา t ใดๆ ($\Omega = 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9$) ตามลำดับ ณ เสถียรภาพของจุดสมดุลโรค

จากภาพที่ 3 เมื่อเพิ่มอัตราการฉีดวัคซีนขึ้นป้องกันโรคปอดอักเสบ ลงในตัวแบบเชิงคณิตศาสตร์ให้มากขึ้นจะพบว่า อัตราการเปลี่ยนแปลงของจำนวนประชากรกลุ่มติดเชื่อแต่ไม่แสดงอาการ (E) ณ เวลา t ใดๆ จะลดลงอย่างเห็นได้ชัด และยังพบว่าจุดสูงสุดของประชากรกลุ่มติดเชื่อแต่ไม่แสดงอาการ เปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัด



ภาพที่ 4 อัตราการเปลี่ยนแปลงของจำนวนประชากรกลุ่มติดเชื่อ (I) ณ เวลา t ใดๆ ($\Omega = 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9$) ตามลำดับ ณ เสถียรภาพของจุดสมดุลโรค

จากภาพที่ 4 เมื่อเพิ่มอัตราการฉีดวัคซีนขึ้นป้องกันโรคปอดอักเสบ ลงในตัวแบบเชิงคณิตศาสตร์ให้มากขึ้นจะพบว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของจำนวนประชากรกลุ่มติดเชื่อ (I) ณ เวลา t ใดๆ ลดลงอย่างเห็นได้ชัดซึ่งถ้าประชากรมีการฉีดวัคซีนขึ้นป้องกันโรคปอดอักเสบเป็นจำนวนมากขึ้น จะส่งผลให้จุดสูงสุดของกลุ่มติดเชื่อลดลงและการแพร่ระบาดของโรคจะลดลงด้วยเช่นกัน



ภาพที่ 5 อัตราการเปลี่ยนแปลงของจำนวนประชากรที่หายจากโรค (R) ณ เวลา t ใดๆ (Ω) = 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9 ตามลำดับ ณ เสถียรภาพของจุดสมดุลโรค

จากภาพที่ 5 เมื่อเพิ่มอัตราการฉีดวัคซีนป้องกันโรคปอดอักเสบ ลงในตัวแบบเชิงคณิตศาสตร์เกี่ยวกับการฉีดวัคซีนสำหรับการป้องกันโรคปอดอักเสบ จะส่งผลให้จำนวนประชากรกลุ่มติดเชื้อเปลี่ยนไปเป็นกลุ่มที่หายจากโรครวดเร็วขึ้น เนื่องจากจำนวนคนติดเชื้อน้อยลงจึงส่งผลให้เกิดการแพร่ระบาดลดลง

บทสรุป

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาผลของการฉีดวัคซีนสำหรับตัวแบบเชิงคณิตศาสตร์ของการป้องกันโรคปอดอักเสบ และวิเคราะห์เสถียรภาพของผลของการฉีดวัคซีนสำหรับตัวแบบเชิงคณิตศาสตร์ของการป้องกันโรคปอดอักเสบ ตัวแบบเชิงคณิตศาสตร์ ที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้ คือ ระบบสมการอนุพันธ์แบบไม่เชิงเส้น ซึ่งประกอบด้วย ประชากรที่เสี่ยงต่อการติดเชื้อ ประชากรที่ติดเชื้อแต่ไม่แสดงอาการ ประชากรที่ติดเชื้อ และประชากรที่หายจากโรค ซึ่งผู้วิจัยเพิ่มค่าพารามิเตอร์ (Ω) คือ อัตราการฉีดวัคซีนลงในตัวแบบเชิงคณิตศาสตร์ใช้วิธีการวิเคราะห์วิธีมาตรฐาน และวิเคราะห์เชิงตัวเลขสำหรับตรวจสอบการแพร่ระบาดของโรค

ผู้วิจัยได้พิจารณาจุดสมดุลที่ไม่มีโรคและจุดสมดุลที่เกิดการแพร่ระบาดของโรคโดยการวิเคราะห์จุดสมดุลและเสถียรภาพของจุดสมดุลด้วยวิธีการวิเคราะห์วิธีมาตรฐานซึ่งค่าเสถียรภาพของระบบ Local Asymptotically Stable ที่ได้ต้องเป็นไปตามเงื่อนไขของ Routh-Hurwitz เพื่อสามารถหาค่าพารามิเตอร์ R_0 ซึ่งมีความจำเป็นภายใต้เงื่อนไขเพื่อให้ Local Asymptotically Stability of Equilibrium Stable ที่มีเสถียรภาพในส่วนของจุดสมดุลที่ไม่มีโรคและจุดสมดุลที่เกิดการแพร่ระบาดของโรค โดยที่ $R_0 = \frac{\eta\beta N\gamma}{(\gamma + \mu)(\theta + \mu)(\Omega + \mu)}$ สามารถพิจารณาค่าระดับการติดเชื้อ (R_0) โดยค่า $R_0 < 1$ วิเคราะห์ได้ว่า ณ จุดสมดุลที่ไม่มีโรค จึงไม่เกิด

การแพร่ระบาดของโรค และค่า $R_0 > 1$ วิเคราะห์ได้ว่า ณ จุดสมดุลที่มีการติดเชื้อจึงเกิดการแพร่ระบาดของโรคจากการวิเคราะห์เชิงตัวเลขพบว่าจุดสมดุลทั้งสองเป็น Local Asymptotically Stable

ดังนั้นสามารถนำผลจากการวิจัยตัวแบบเชิงคณิตศาสตร์ SEIR สำหรับการควบคุมการแพร่ระบาดของโรคปอดอักเสบ โดยการฉีดวัคซีนป้องกันโรค เพื่อลดจำนวนผู้ป่วยและใช้เป็นข้อมูลทางวิชาการให้กับหน่วยงานที่เฝ้าระวังของสำนักงานระบาศาวิชา กรมควบคุมโรค กระทรวงสาธารณสุข รวมทั้งนำเสนอข้อมูลต่อหน่วยงานด้านสาธารณสุขดำเนินการมาตรการควบคุมและป้องกันโรคปอดอักเสบ โดยการฉีดวัคซีนป้องกันให้กับประชาชนทั่วไปที่เสี่ยงต่อการติดเชื้อ

เอกสารอ้างอิง

กรมควบคุมโรค. (2563). HDC-Report-กระทรวงสาธารณสุข. <<https://hdcservice.moph.go.th/hdc/main/index.php>>
 กรมควบคุมโรค. (2565). โรคปอดอักเสบ. สำหรับระบาดวิทยา กระทรวงสาธารณสุข.
 กระทรวงสาธารณสุขจังหวัดภูเก็ต. (2566). โรคปอดอักเสบ. (สืบค้นเมื่อ 28 ธันวาคม 2565)
 แคทลียา ดวงเกตุ. (2556). 20 คำถามสำคัญของคณิตศาสตร์. (พิมพ์ครั้งที่ 2). (น. 247-248). กรุงเทพฯ: มติชน.
 อนุวัตร จิรวัดนาณิช และ คณะ. (2562). ตัวแบบเชิงคณิตศาสตร์สำหรับการรณรงค์ป้องกันการแพร่ระบาดของโรคตาแดง (รายงานการวิจัย). ภูเก็ต: มหาวิทยาลัยราชภัฏภูเก็ต.



การพัฒนาและวิเคราะห์เสถียรภาพของตัวแบบทางคณิตศาสตร์เพื่อประเมินผลกระทบ
ของอัตราการฉีดวัคซีนสำหรับการป้องกันโรคโควิด-19: กรณีศึกษาจังหวัดภูเก็ต
Development and Stability Analysis of a Mathematical Model to Assess the Impact
of Vaccination Rates for the Prevention of COVID-19: A Case Study in Phuket

ปริญญรัตน์ ลีลาพันธ์สิทธิ¹ อนุรักษ์ วีระประเสริฐสกุล² อนุวัตร จิรวัดพัฒนาณิช³
E-mail: s6212229102@pkru.ac.th

บทคัดย่อ

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาและวิเคราะห์เสถียรภาพของผลการฉีดวัคซีนสำหรับตัวแบบเชิงคณิตศาสตร์ของการ
ป้องกันโรคโควิด-19 ในจังหวัดภูเก็ต วิเคราะห์ด้วยวิธีมาตรฐาน ศึกษาจุดสมดุล ศึกษาเสถียรภาพของจุดสมดุล หาค่าตอบเชิง
วิเคราะห์ ศึกษาผลการฉีดวัคซีนสำหรับตัวแบบเชิงคณิตศาสตร์และหาค่าตอบเชิงตัวเลข ผลวิจัยพบว่าจุดสมดุลที่ไม่มีโรคและจุดสมดุล
ที่มีโรคเป็น Local Asymptotically Stable และมีค่าระดับการติดเชื้อ $R_0 = \frac{\nu\mu N\varepsilon}{(\omega+\theta)(\varepsilon+\omega)(\sigma+\omega+\beta)}$ และอัตราการฉีดวัคซีนเป็นปัจจัยที่มี
ผลต่อตัวแบบเชิงคณิตศาสตร์ ถ้าประชากรที่เสี่ยงต่อการติดเชื้อมีการฉีดวัคซีนป้องกันเป็นจำนวนมาก จะส่งผลให้การแพร่ระบาดของ
โรคลดลง

คำสำคัญ: ตัวแบบเชิงคณิตศาสตร์ โรคโควิด-19 วัคซีนป้องกัน

Abstract

The purpose of this research was to develop and analyze the stability of mathematical model for
COVID-19 prevention through vaccination in Phuket. The model was analyzed using standard methods for study
the balance point, the stability of the equilibrium point, analytical solutions, study effect of vaccination on the
mathematical model and find a numerical solutions. The results showed that the equilibrium point without
disease and the equilibrium point with disease were local asymptotically stable and the level of infection was
 $R_0 = \frac{\nu\mu N\varepsilon}{(\omega+\theta)(\varepsilon+\omega)(\sigma+\omega+\beta)}$ and vaccination rate are factors affecting the mathematical model. If populations at
high risk of infection are vaccinated in large numbers, the spread of the disease will decrease.

Keywords: mathematical model, COVID-19, vaccination

ความเป็นมาของปัญหา

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เป็นวิธีการหนึ่งของการอธิบายสถานการณ์ในชีวิตจริงในแบบภาษาคณิตศาสตร์ โดยการเปลี่ยน
สถานการณ์จริงให้อยู่ในรูปของตัวแปรและสมการ โดยจะให้ความสำคัญกับตัวแปรที่สำคัญ แบบจำลองมีจุดมุ่งหมายเพื่อจะจับ
องค์ประกอบที่สำคัญของเหตุการณ์ต่างๆ เราสามารถตรวจสอบความถูกต้องของกลไกคณิตศาสตร์หนึ่งที่ถูกสร้างขึ้นมาได้เพื่อจะ
ตรวจสอบว่าแบบจำลองนั้นสะท้อนสถานการณ์ในชีวิตจริงหรือไม่ (แคทลียา ดวงเกตุ, 2556)

จากการศึกษาตัวแบบเชิงคณิตศาสตร์แสดงให้เห็นถึงบทบาทและประโยชน์ของตัวแบบเชิงคณิตศาสตร์ที่มีส่วนช่วยในการ
แก้ไขวิกฤตการณ์ที่กำลังจะเกิดขึ้นจากโรคภัยต่างๆโดยจำลองประชากรที่เสี่ยงต่อการติดเชื้อ ตัวเชื้อโรค ตัวพาหนะนำโรค และผู้ติดเชื้อ
โดยแปลงข้อมูลให้อยู่ในรูปสมการทางคณิตศาสตร์ เพื่ออธิบายลักษณะของการระบาดและการดำเนินของโรคโดยผู้ที่วิจัยไม่จำเป็นต้อง
ไปศึกษากับมนุษย์โดยตรงซึ่งอาจเกิดอันตรายต่อชีวิตของผู้วิจัยและผู้ป่วยได้อีก ทั้งยังช่วยลดงบประมาณสำหรับการเสริมมาตรการ
การรักษาและการป้องกันโรคตามความต้องการ (ธีรวัฒน์ นาคะบุตร, 2546)

การระบาดของเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 หรือ โควิด-19 (Covid-19) ได้เริ่มต้นเมื่อปลายปี พ.ศ. 2562 และลุกลามไปทั่วโลก
สร้างความหวาดกลัวและส่งผลกระทบต่อสุขภาพ สังคมและเศรษฐกิจของประชากร และเมื่อต้นเดือนมกราคม พ.ศ. 2563 มีการระบาด
ใหญ่ (pandemic) ซึ่งเป็นการติดเชื้อทั่วโลกอย่างรวดเร็ว ตามประกาศขององค์การอนามัยโลก เมื่อวันที่ 11 มีนาคม พ.ศ. 2563 (กรม
ควบคุมโรค กระทรวงสาธารณสุข, 2563ก) จากสถิติเมื่อวันที่ 15 เมษายน พ.ศ. 2563 ประชากรทั่วโลกมีผู้ติดเชื้อ 1,982,939 คน และ

¹ นักศึกษาระดับปริญญาตรี หลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาคณิตศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยราชภัฏภูเก็ต

² สาขาคณิตศาสตร์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏภูเก็ต

³ สาขาคณิตศาสตร์ คณะครุศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏภูเก็ต

ตาย 126,761 คน ในเขตพื้นที่จังหวัดภูเก็ตคนที่ติดเชื้อโควิด-19 ส่วนใหญ่มีประวัติใกล้ชิดผู้ป่วย ทำกิจกรรมร่วมกัน ส่วนมากผู้ที่ได้รับเชื้อจะไม่รู้ตัว บางรายอาจมีไข้หรือปวดเมื่อยตามเนื้อตามตัวซึ่งทำให้เข้าใจผิดไปได้ เนื่องจากอาการป่วยจะใกล้เคียงกับไข้หวัดธรรมดา โดยจังหวัดภูเก็ตจะเริ่มมีการฉีดวัคซีนป้องกันตั้งแต่เด็กไปจนถึงผู้ใหญ่ แต่ยังคงมีประชากรในจังหวัดภูเก็ตส่วนหนึ่งที่เป็นพาหะของโรค และสามารถแพร่เชื้อต่อไปได้เรื่อย ๆ เนื่องจากเพิ่งเริ่มมีการฉีดวัคซีนเมื่อปี พ.ศ. 2564

จากเหตุข้างต้นผู้วิจัยได้ตระหนักและเห็นประโยชน์ที่ได้รับจากวิจัยเรื่องประเมินผลกระทบของอัตราการฉีดวัคซีนสำหรับการป้องกันโรคโควิด-19 จึงได้ศึกษาเกี่ยวกับการฉีดวัคซีนเพื่อควบคุมการแพร่ระบาดของโรคโควิด-19 ในจังหวัดภูเก็ต ให้เป็นปัจจัยสำคัญสำหรับการศึกษาในตัวแบบเชิงคณิตศาสตร์

วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1. เพื่อพัฒนาตัวแบบเชิงคณิตศาสตร์สำหรับควบคุมการแพร่ระบาดของโรคโควิด-19 โดยการฉีดวัคซีน
2. เพื่อวิเคราะห์เสถียรภาพของตัวแบบเชิงคณิตศาสตร์สำหรับควบคุมการแพร่ระบาดของไวรัส โดยการฉีดวัคซีน

วิธีดำเนินการวิจัย

การศึกษาวิจัยในครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ศึกษาผลการฉีดวัคซีนสำหรับตัวแบบเชิงคณิตศาสตร์ของการป้องกันโรคโควิด-19 ในจังหวัดภูเก็ต ซึ่งมีวิธีการวิจัย 3 ขั้นตอนดังนี้

1. การพัฒนาตัวแบบเชิงคณิตศาสตร์ ผู้วิจัยได้แบ่งประชากรออกเป็น 4 กลุ่ม คือ กลุ่มคนที่เสี่ยงต่อการติดเชื้อ กลุ่มคนที่ติดเชื้อแต่ไม่แสดงอาการ กลุ่มคนที่ติดเชื้อแสดงอาการ และกลุ่มคนที่หายจากโรค ผู้วิจัยได้กำหนดตัวแปรดังนี้ $S(t)$ จำนวนคนที่เสี่ยงต่อการติดเชื้อ ณ เวลา t ใดๆ, $E(t)$ จำนวนคนที่ติดเชื้อแต่ไม่แสดงอาการ ณ เวลา t ใดๆ, $I(t)$ จำนวนคนที่ติดเชื้อ ณ เวลา t ใดๆ, $R(t)$ จำนวนคนที่หายจากโรค ณ เวลา t ใดๆ โดยที่ $S(t) > 0$, $E(t) > 0$, $I(t) > 0$ และ $R(t) > 0$ เนื่องจากจำนวนประชากรมีค่าคงที่ไม่ขึ้นกับเวลา คือ $N(t) = S(t) + E(t) + I(t) + R(t)$

2. การตรวจสอบตัวแบบเชิงคณิตศาสตร์ การตรวจสอบตัวแบบเชิงคณิตศาสตร์การควบคุมการแพร่ระบาดของไวรัสโดยการฉีดวัคซีน เป็นการตรวจสอบความถูกต้องของตัวแบบโดยผู้เชี่ยวชาญที่เกี่ยวข้อง

3. การวิเคราะห์ตัวแบบเชิงคณิตศาสตร์ การวิเคราะห์ตัวแบบเชิงคณิตศาสตร์เป็นการวิเคราะห์ตามวิธีการมาตรฐาน (Standard method) โดยศึกษาจุดสมดุลและศึกษาเสถียรภาพของจุดสมดุลเพื่อหาเงื่อนไขของพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของจุดสมดุล หาค่าระดับการติดเชื้อโดยใช้วิธี Next Generations Method หาค่าตอบเชิงวิเคราะห์และหาค่าตอบเชิงตัวเลข โดยวิธี Numerical Analysis ดังวิธีการต่อไปนี้

3.1 การวิเคราะห์ตามวิธีมาตรฐาน

การวิเคราะห์ตามวิธีมาตรฐานเป็นการศึกษาจุดสมดุล ค่าระดับการติดเชื้อ และเสถียรภาพของระบบ ดังนี้

3.1.1 การหาขอบเขตของค่าคงที่ เป็นการหาขอบเขตของค่าคงที่และช่วงคำตอบของตัวแปรต่างๆ โดยการใช้เทคนิคการอินทิเกรตช่วยในการแสดงหาค่าตอบ $S(t)$, $E(t)$, $I(t)$ และ $R(t)$ ซึ่งมีขอบเขตของค่าคงที่ อยู่ในจำนวนจริงบวก

3.1.2 จุดสมดุล การหาจุดสมดุลดำเนินการโดยจัดสมการเชิงอนุพันธ์ไม่เชิงเส้นของตัวแบบเชิงคณิตศาสตร์ให้เท่ากับศูนย์ คือ $\frac{dS}{dt} = 0, \frac{dE}{dt} = 0, \frac{dI}{dt} = 0, \frac{dR}{dt} = 0$ จะได้ค่าจุดสมดุลที่ไม่มีเชื้อโรค (Disease Free Equilibrium Point : E_0) ในกรณีที่ไม่มีการติดเชื้อโรค โดยกำหนดให้ $E_0 = (S, E, I, R) = E_0 \left(\frac{\mu N}{\omega + \theta}, 0, 0, \frac{\theta \mu N}{\omega(\omega + \theta)} \right)$ และจะได้ค่าจุดสมดุลเกิดการแพร่ระบาดของ เชื้อโรค (Disease Free Equilibrium Point : E_1) ในกรณีที่มีการระบาดของเชื้อโรค โดยกำหนดให้ $I \neq 0$ จะได้ $E_1 = (S^*, E^*, I^*, R^*)$

3.1.3 การหาค่าระดับการติดเชื้อ ค่าระดับการติดเชื้อเป็นค่าเฉลี่ยที่ผู้ป่วยหนึ่งคนสามารถทำให้คนกลุ่มเสี่ยงป่วยเป็นจำนวนกี่คนในช่วงเวลาที่เขายังป่วยอยู่ โดยใช้วิธี Next Generation Method โดยจัดการสมการเชิงอนุพันธ์ไม่เชิงเส้นในรูป $\frac{dX}{dt} = F(X) - V(X)$ เพื่อหาค่า R_0 จากเมตริกซ์ $P(FV^{-1})$ ซึ่ง $F(X)$ คือ เมตริกซ์ของผู้ป่วยที่เพิ่มขึ้น, $V(X)$ คือ เมตริกซ์ของผู้ป่วยที่เปลี่ยนสถานะจากกลุ่มหนึ่งไปอีกกลุ่มหนึ่ง ได้จากอนุพันธ์ย่อย ดังนี้

$$X = \begin{bmatrix} S \\ E \\ I \\ R \end{bmatrix}, F = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_1(E_0)}{\partial X_i} \end{bmatrix} \text{ และ } V = \begin{bmatrix} \frac{\partial V_1(E_0)}{\partial X_i} \end{bmatrix} \text{ โดยพิจารณา } R_0 \text{ ดังนี้}$$

- 1) $R_0 > 1$ แสดงว่า โรคมีการระบาดเพิ่มขึ้น (Epidemic)
- 2) $R_0 = 1$ แสดงว่า โรคเริ่มเสถียร (Endemic)
- 3) $R_0 < 1$ แสดงว่า โรคไม่มีการแพร่ระบาด

3.2 การวิเคราะห์เสถียรภาพ เป็นการหาค่าลักษณะเฉพาะ (Eigen Value) เพื่ออธิบายคำตอบของสมการเกี่ยวกับค่าความสมดุลสำหรับการตรวจสอบว่าเป็น Local Asymptotically Stable มี 2 กรณี ดังนี้

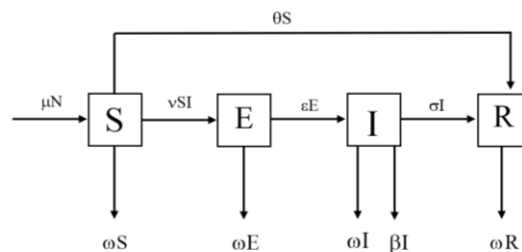
3.2.1 Local Asymptotically Stable ณ จุด E_0 ของจุดสมดุลที่ไม่มีโรค โดยการตรวจสอบค่าลักษณะเฉพาะของจาโคเบียนเมทริกซ์ ณ สภาวะที่ไม่มีโรค (E_0) ซึ่งจะได้สมการลักษณะเฉพาะจาก $\det(J_0 - \lambda I) = 0$ ซึ่ง J_0 คือ จาโคเบียนเมทริกซ์ ณ จุด E_0 และ I คือ เมทริกซ์เอกลักษณ์ โดยมีข้อกำหนดว่า λ ทุกค่าส่วนจริงจะเป็นลบซึ่งจะสอดคล้องตามเงื่อนไขของ Routh-Hurwitz ซึ่งจะส่งผลให้ค่า $R_0 < 1$

3.2.2 Local Asymptotically Stable ณ จุด E_1 ของจุดสมดุลที่มีโรค โดยการตรวจสอบค่าลักษณะเฉพาะของจาโคเบียนเมทริกซ์ ณ สภาวะที่มีการแพร่ระบาดของโรค (E_1) ซึ่งจะได้สมการลักษณะเฉพาะจาก $\det(J_1 - \lambda I) = 0$ ซึ่ง J_1 คือ จาโคเบียนเมทริกซ์ ณ จุด E_1 และ I คือ เมทริกซ์เอกลักษณ์ โดยมีข้อกำหนดว่า λ ทุกค่าส่วนจริงจะเป็นลบซึ่งจะสอดคล้องตามเงื่อนไขของ Routh-Hurwitz ซึ่งจะส่งผลให้ค่า $R_0 > 1$

3.3 การวิเคราะห์เชิงตัวเลข การวิเคราะห์เชิงตัวเลขเป็นการพิจารณาหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่ทำให้จุดสมดุลที่ไม่มีโรค (Disease Free Equilibrium Point: E_0) และจุดสมดุลที่เกิดการแพร่ระบาดของโรค (Endemic Equilibrium Point: E_1) ที่ทำให้ระบบสมการเชิงอนุพันธ์ไม่เชิงเส้นเป็น Local Asymptotically Stable เพื่อนำค่าพารามิเตอร์ไปคำนวณหาคำตอบเชิงตัวเลขโดยจำลองแบบด้วยโปรแกรม MATLAB (สุกัลยา ศรีสุริฉิน, 2559)

ผลการวิจัย

ตอนที่ 1 ผลการพัฒนาตัวแบบเชิงคณิตศาสตร์จากการเพิ่มตัวแปรการฉีดวัคซีนเพื่อป้องกันการระบาดของโรคโควิด-19 จากตัวแปรข้างต้นผู้วิจัยได้สร้างแผนภาพผลการฉีดวัคซีนสำหรับตัวแบบเชิงคณิตศาสตร์ของการป้องกันโรคโควิด-19



ภาพที่ 1 แผนภาพความสัมพันธ์และองค์ประกอบผลของการฉีดวัคซีนสำหรับตัวแบบเชิงคณิตศาสตร์ของการป้องกันโรคโควิด-19

จากภาพที่ 1 สามารถเปลี่ยนตัวแบบเชิงคณิตศาสตร์เป็นระบบสมการเชิงอนุพันธ์แบบไม่เชิงเส้น

$$\frac{dS}{dt} = \mu N - vSI - \omega S - \theta S \quad (1)$$

$$\frac{dE}{dt} = vSI - \epsilon E - \omega E \quad (2)$$

$$\frac{dI}{dt} = \epsilon E - \sigma I - \omega I - \beta I \quad (3)$$

$$\frac{dR}{dt} = \sigma I + \theta S - \omega R \quad (4)$$

โดยมีเงื่อนไขประชากรมนุษย์จำนวนคงที่ $N = S + E + I + R$ เมื่อกำหนดสัญลักษณ์พารามิเตอร์ เป็นอัตราการเกิดของประชากร, ω เป็นอัตราการเสียชีวิตของประชากร, v เป็นอัตราการสัมผัสเชื้อ, ε เป็นอัตราการฟักตัวของเชื้อ, σ เป็นอัตราภูมิคุ้มกัน, β เป็นอัตราการตายที่เกิดจากโรคโควิด-19 และ N เป็นจำนวนประชากรทั้งหมด เนื่องจากค่าอนุพันธ์ของค่าคงที่จะมีค่าเป็นศูนย์ และค่าจำนวนของประชากรแต่ละกลุ่มจะมีค่าไม่เกิน N โดยดำเนินการดังนี้

1. การวิเคราะห์ตามแบบมาตรฐาน

จาก Rate of change = Rate inflow-Rate outflow

$$\begin{aligned} \text{จะได้} \quad \frac{dN}{dt} &= \frac{dS}{dt} + \frac{dE}{dt} + \frac{dI}{dt} + \frac{dR}{dt} \\ &= \mu N - vSI - \omega S - \theta S + vSI - \varepsilon E - \omega E + \varepsilon E - \sigma I - \omega I - \beta I + \sigma I + \theta S - \omega R \end{aligned}$$

$$\text{ดังนั้น} \quad \frac{dN}{dt} = \mu N - \omega S - \omega E - \omega I - \beta I - \omega R$$

$$\text{เมื่อ} \quad S = N, E = 0, I = 0, R = 0$$

$$\text{จะได้} \quad \frac{dN}{dt} = \mu N - \omega N - \omega(0) - \beta(0) - \omega(0)$$

$$\frac{dN}{dt} = \mu N - \omega N$$

$$\frac{dN}{dt} = (\mu - \omega) N$$

แสดงว่า N เป็นค่าคงที่ เมื่อ $\mu = \omega$

1.1 การหาจุดสมดุล โดยจัดสมการอนุพันธ์แบบไม่เชิงเส้นของตัวแบบเชิงคณิตศาสตร์ให้เท่ากับศูนย์ดังนี้

$$\frac{dS}{dt} = 0, \frac{dE}{dt} = 0, \frac{dI}{dt} = 0, \frac{dR}{dt} = 0 \quad \text{จะได้}$$

$$S^* = \frac{\mu N}{vI^* + \omega + \theta} \quad (5)$$

$$E^* = \frac{v\mu NI(\varepsilon + \omega)}{VI + \omega + \theta} \quad (6)$$

$$I^* = \frac{\varepsilon v \mu N (\varepsilon + \omega) (\sigma + \omega + \beta) - \omega + \theta}{v} \quad (7)$$

$$R^* = \frac{\sigma I^* + \theta \mu N \omega}{VI^* + \omega + \theta} \quad (8)$$

1.1.1 การหาจุดสมดุลที่ไม่มีโรค (E_0) จากสมการ (1), (2), (3) และ (4) จะได้ค่าจุดสมดุลที่ไม่มีโรค (Disease Free Equilibrium Point : E_0) ในกรณีที่ไม่มีโรคติดเชื้อ โดยกำหนดให้ $I = 0, S = N$ และ $R = 0$

$E_0 = (S, E, I, R) = E_0 \left(\frac{\mu N}{\omega + \theta}, 0, 0, \frac{\theta \mu N}{\omega(\omega + \theta)} \right)$ เสถียรของระบบ (stability of Systems) ที่จุด E_0 โดยดำเนินการหาสมการ

ลักษณะเฉพาะ $\det(J_0 - \lambda I) = 0$ เพื่อหาค่า λ เมื่อ λ เป็นค่าลักษณะเฉพาะ (Eigen Values) และ I เป็นเมทริกซ์เอกลักษณ์ขนาด

$$J_0 = \begin{bmatrix} -\omega - \theta & 0 & -vS & 0 \\ vI & -\varepsilon - \omega & vS & 0 \\ 0 & \varepsilon & -\sigma - \omega - \beta & 0 \\ \theta & 0 & \sigma & -\omega \end{bmatrix}, J_0 - \lambda I = \begin{bmatrix} -\omega - \theta & 0 & -vS & 0 \\ vI & -\varepsilon - \omega & vS & 0 \\ 0 & \varepsilon & -\sigma - \omega - \beta & 0 \\ \theta & 0 & \sigma & -\omega \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \lambda & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \lambda \end{bmatrix}$$

$$\det(J_0 - \lambda I) = \begin{bmatrix} -\omega - \theta - \lambda & 0 & -vS & 0 \\ vI & -\varepsilon - \omega - \lambda & vS & 0 \\ 0 & \varepsilon & -\sigma - \omega - \beta - \lambda & 0 \\ \theta & 0 & \sigma & -\omega - \lambda \end{bmatrix}$$

$$\det(J_0 - \lambda I) = (-\omega - \lambda)(-\theta - \lambda - \omega)(\beta\varepsilon + \beta\lambda + \varepsilon\lambda + \lambda^2 - \varepsilon v + \varepsilon\sigma + \lambda\sigma + \beta\omega + \varepsilon\omega + 2\lambda\omega + \sigma\omega + \omega^2)$$

$$\text{จะได้} \quad (-\omega - \lambda) = 0 \quad \text{หรือ} \quad (-\theta - \lambda - \omega) = 0 \quad \text{หรือ} \quad (\beta\varepsilon + \beta\lambda + \varepsilon\lambda + \lambda^2 - \varepsilon v + \varepsilon\sigma + \lambda\sigma + \beta\omega + \varepsilon\omega + 2\lambda\omega + \sigma\omega + \omega^2) = 0$$

จะได้ค่าสมการลักษณะเฉพาะดังนี้

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น} \quad \lambda_1 &= -\omega, \lambda_2 = (-\theta - \omega), \\ \lambda_3 &= \frac{1}{2} \left(-\beta - \varepsilon - \sigma - \sqrt{\beta^2 - 2\beta\varepsilon + \varepsilon^2 + 4\varepsilon\nu + 2\beta\sigma - 2\varepsilon\sigma + \sigma^2} - 2\omega \right), \\ \lambda_4 &= \frac{1}{2} \left(-\beta - \varepsilon - \sigma + \sqrt{\beta^2 - 2\beta\varepsilon + \varepsilon^2 + 4\varepsilon\nu + 2\beta\sigma - 2\varepsilon\sigma + \sigma^2} - 2\omega \right) \end{aligned}$$

1.1.2 การหาจุดสมดุลเกิดการแพร่ระบาดของเชื้อโรค (E_1) จากสมการ (1),(2),(3) และ (4) จะได้ค่าจุดสมดุลที่เกิดจากการแพร่ระบาดของเชื้อโรค (Endemic Equilibrium Point : E_1) ในกรณีที่มีการแพร่ระบาดของเชื้อโรค โดยกำหนดให้ $I > 0$ และ $S = N$ ซึ่งได้จาก $E_1 = (S^*, E^*, I^*, R^*) = \left(\frac{\mu N}{\nu I^* + \omega + \theta}, \frac{\nu \mu N I(\varepsilon + \omega)}{\nu I + \omega + \theta}, \frac{\varepsilon \nu \mu N (\varepsilon + \omega)(\sigma + \omega + \beta) - \omega + \theta}{\nu}, \frac{\sigma I^* + \theta \mu N \omega}{\nu I^* + \omega + \theta} \right)$ ดังนั้น สมการลักษณะเฉพาะที่จุด $E_1 = (S^*, E^*, I^*, R^*)$ โดยให้ $\det(J_1 - \lambda I_3) = 0$ เพื่อหาค่า λ เมื่อ λ เป็นค่าลักษณะเฉพาะ (Eigen Values) และ I_3 เป็นเมทริกซ์เอกลักษณ์ขนาด 3×3 ดังนี้

$$J_1 = \begin{bmatrix} -\nu I^* - \omega - \theta & 0 & -\nu S^* & 0 \\ \nu I^* & -\varepsilon - \omega & \nu S & 0 \\ 0 & \varepsilon & -\sigma - \omega - \beta & 0 \\ \theta & 0 & \sigma & -\omega \end{bmatrix}, J_1 - \lambda I = \begin{bmatrix} -\nu I^* - \omega - \theta - \lambda & 0 & -\nu S^* & 0 \\ \nu I^* & -\varepsilon - \omega - \lambda & \nu S & 0 \\ 0 & \varepsilon & -\sigma - \omega - \beta - \lambda & 0 \\ \theta & 0 & \sigma & -\omega - \lambda \end{bmatrix}$$

$$\det(J_1 - \lambda I) = (-\omega - \lambda) \left[\left[(-\nu I^* - \omega - \theta - \lambda)(-\varepsilon - \omega - \lambda)(-\sigma - \omega - \beta - \lambda) + (-\nu S^*)(\nu I^*)(\varepsilon) \right] - \left[\varepsilon \nu S (-\nu I^* - \omega - \theta \lambda) \right] \right]$$

$$\text{จัดในรูปของ } \lambda^3 + \lambda^2 + \lambda + C = 0$$

เมื่อ

$$a_1 = (-\beta - \varepsilon - \theta - \nu - \sigma - 3\omega)$$

$$a_2 = (-\beta\varepsilon - \beta\theta - \varepsilon\theta - \beta\nu - \varepsilon\nu + S\varepsilon\nu - \varepsilon\sigma - \theta\sigma - \nu\sigma - 2\beta\omega - 2\varepsilon\omega - 2\nu\varepsilon - 2\sigma\omega - 3\omega^2)$$

$$a_3 = -(\beta\varepsilon\theta - \beta\varepsilon\nu + S\varepsilon\theta\nu - \varepsilon\theta\sigma - \varepsilon\nu\sigma - \beta\varepsilon\omega - \beta\theta\omega - \varepsilon\theta\omega - \beta\nu\omega - \varepsilon\nu\omega + S\varepsilon\nu\omega - \varepsilon\sigma\omega - \theta\sigma\omega - \nu\sigma\omega - \beta\omega^2 - \varepsilon\omega^2 - \theta\omega^2 - \nu\omega^2 - \sigma\omega^2 - \omega^3)$$

1.2 การหาค่าระดับการติดเชื้อ (R_0) เป็นการหารัศมีที่โดดเด่นของการแพร่ระบาดของโรค โดยใช้วิธีการ Next Generation Method โดยจะได้สมการ (1) - (4) จะได้เมทริกซ์ในรูป $\frac{\partial X}{\partial t} = F(X) - V(X)$ เพื่อหาค่า spectral radius $\rho(FV^{-1})$ ซึ่ง $F(X)$ และ $V(X)$ ได้จากอนุพันธ์ย่อย ดังนี้

$$X = \begin{bmatrix} S \\ E \\ I \\ R \end{bmatrix}, F = \begin{bmatrix} \frac{\partial V_1(E_0)}{\partial X_1} \\ \frac{\partial V_2(E_0)}{\partial X_2} \\ \frac{\partial V_3(E_0)}{\partial X_3} \\ \frac{\partial V_4(E_0)}{\partial X_4} \end{bmatrix} \quad \text{และ} \quad V = \begin{bmatrix} \frac{\partial V_1(E_0)}{\partial X_1} \\ \frac{\partial V_2(E_0)}{\partial X_2} \\ \frac{\partial V_3(E_0)}{\partial X_3} \\ \frac{\partial V_4(E_0)}{\partial X_4} \end{bmatrix}$$

เมื่อ $F(X)$ คือเมทริกซ์ของผู้ป่วยที่เพิ่มขึ้น และ $V(X)$ คือเมทริกซ์ของผู้ป่วยที่เปลี่ยนสถานะจากกลุ่มหนึ่งไปอีกกลุ่มหนึ่งโดยพิจารณาค่าระดับการติดเชื้อ (R_0) โดยพิจารณา ดังนี้

$$F(X) = \begin{bmatrix} 0 \\ \nu SI \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, V(X) = \begin{bmatrix} -\mu N + \nu SI + \omega S + \theta S \\ \varepsilon E + \omega E \\ -\varepsilon E + \sigma I + \omega I + \beta I \\ -\sigma I + \omega R - \theta S \end{bmatrix}$$

$$\text{ให้} \quad E_0 = (S, E, I, R) = (N, 0, 0, N)$$

$$\text{จะได้} \quad F(E_0) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\nu \mu N}{(\omega + \theta)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, V(E_0) = \begin{bmatrix} \omega + \theta & 0 & \frac{\nu \mu N}{\omega + \theta} & 0 \\ 0 & \varepsilon + \omega & 0 & 0 \\ 0 & -\varepsilon & \sigma + \omega + \beta & 0 \\ -\theta & 0 & -\sigma & \omega \end{bmatrix}$$

ดังนั้น

$$FV^{-1}(E_0) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{v\mu N}{\omega+\theta} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{1}{(\omega+\theta)} & \frac{-\varepsilon v\mu N}{(\omega+\theta)^2(\varepsilon+\omega)(\sigma+\omega+\beta)} & \frac{-v\mu N}{(\omega+\theta)^2(\sigma+\omega+\beta)} & 0 \\ 0 & \frac{1}{(\varepsilon+\omega)} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\varepsilon}{(\varepsilon+\omega)(\sigma+\omega+\beta)} & \frac{1}{(\sigma+\omega+\beta)} & 0 \\ \frac{\theta}{\omega(\omega+\theta)} & \frac{\varepsilon\sigma}{\omega(\varepsilon+\omega)(\sigma+\omega+\beta)} & \frac{-\theta\varepsilon v\mu N}{(\omega+\theta)^2(\varepsilon+\omega)(\sigma+\omega+\beta)} & \frac{\sigma}{\omega(\sigma+\omega+\beta)} - \frac{-\theta v\mu N}{(\omega+\theta)^2(\sigma+\omega+\beta)} & \frac{1}{\omega} \end{bmatrix}$$

จะได้

$$FV^{-1}(E_0) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{v\mu N\varepsilon}{(\omega+\theta)(\varepsilon+\omega)(\sigma+\omega+\beta)} & \frac{v\mu N}{(\omega+\theta)(\sigma+\omega+\beta)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

จาก

$$\det[FV^{-1}(E_0)] = \begin{bmatrix} 0-\lambda & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{v\mu N\varepsilon}{(\omega+\theta)(\varepsilon+\omega)(\sigma+\omega+\beta)} - \lambda & \frac{v\mu N}{(\omega+\theta)(\sigma+\omega+\beta)} & 0 \\ 0 & 0 & 0-\lambda & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0-\lambda \end{bmatrix}$$

จะได้ $\det[FV^{-1}(E_0) - \lambda I] = (-\lambda)(-\lambda) \left(\frac{v\mu N\varepsilon}{(\omega+\theta)(\varepsilon+\omega)(\sigma+\omega+\beta)} - \lambda \right)$

ดังนั้น $\lambda_1 = 0, \lambda_2 = 0, \lambda_3 = 0, \lambda_4 = \frac{v\mu N\varepsilon}{(\omega+\theta)(\varepsilon+\omega)(\sigma+\omega+\beta)}$

จากบทนิยาม $p(FV^{-1}(E_0)) = \max \left\{ 0, 0, 0, \frac{v\mu N\varepsilon}{(\omega+\theta)(\varepsilon+\omega)(\sigma+\omega+\beta)} \right\}$

ดังนั้น $p(FV^{-1}(E_0)) = \frac{v\mu N\varepsilon}{(\omega+\theta)(\varepsilon+\omega)(\sigma+\omega+\beta)}$

จะได้ค่าระดับการติดเชื่อ คือ $R_0 = \frac{v\mu N\varepsilon}{(\omega+\theta)(\varepsilon+\omega)(\sigma+\omega+\beta)}$

ตอนที่ 2 ผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลขผลของการฉีดวัคซีนสำหรับตัวแบบเชิงคณิตศาสตร์ของการป้องกันโรคโควิด-19 กรณีศึกษาในจังหวัดภูเก็ต

การวิจัยในครั้งนี้ผู้วิจัยได้วิเคราะห์เชิงตัวเลข โดยนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากหน่วยงานกระทรวงสาธารณสุขจังหวัดภูเก็ตในปี พ.ศ.2564 เกี่ยวกับการฉีดวัคซีนป้องกันโรคโควิด-19 ซึ่งมีค่าต่างๆ ดังนี้

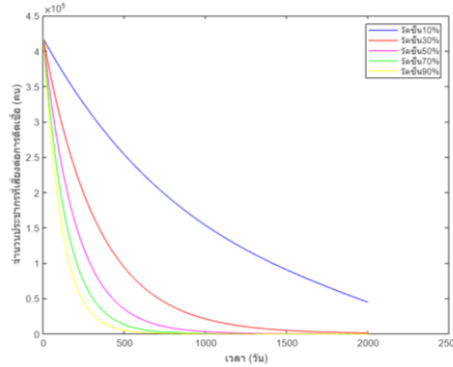
ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการสำรวจข้อมูลเกี่ยวกับการฉีดวัคซีนป้องกันโรคโควิด-19

ข้อความ	สัญลักษณ์	ค่าพารามิเตอร์	หน่วย
จำนวนประชากรมนุษย์ทั้งหมด	N	417,161	คน
อัตราการเกิดของประชากร	μ	2.17058×10^{-5}	คนต่อวัน
อัตราการเสียชีวิตของประชากร	ω	1.12962×10^{-5}	คนต่อวัน
อัตราการฉีดวัคซีน	θ	2.34843×10^{-3}	คนต่อวัน
อัตราการสัมผัสเชื้อ	v	1.22964×10^{-4}	คนต่อวัน
อัตราการฟักตัวของเชื้อ	ε	1.369863×10^{-2}	คนต่อวัน
อัตราการหายจากธรรมชาติ	σ	1.369863×10^{-4}	คนต่อวัน
อัตราการตายจากโรคโควิด-19	β	9.26025×10^{-7}	คนต่อวัน

*สำนักงานสาธารณสุขจังหวัดภูเก็ต

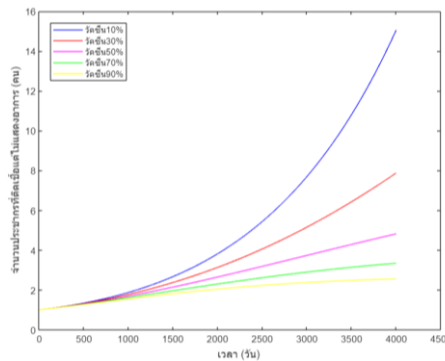
เมื่อพิจารณาเสถียรภาพของระบบ ณ จุดสมดุลที่ไม่มีโรค จะพบว่าค่าลักษณะเฉพาะทุกค่ามีส่วนจริงเป็นค่าลบ และสอดคล้องกับเงื่อนไขของ Routh-hurwitz ส่งผลให้คำตอบจะลู่เข้าสู่ $E_0 = N, 0, 0, 0$ ดังนั้นจุดสมดุลที่ไม่มีโรค E_0 จะเป็น Local Asymptotically (Fred Brauer, Pauline den Driessche and Jianhong Wu(Eds.)2008)

เมื่อพิจารณาเสถียรภาพของระบบ ณ จุดสมดุลที่มีโรค จะพบว่าค่าลักษณะเฉพาะทุกค่ามีส่วนจริงเป็นค่าลบ และสอดคล้องกับเงื่อนไขของ Routh-hurwitz ส่งผลให้คำตอบจะลู่เข้าสู่ $E_1 = (S^*, E^*, I^*, R^*)$ ดังนั้นจุดสมดุลที่มีโรค E_1 จะเป็น Local Asymptotically



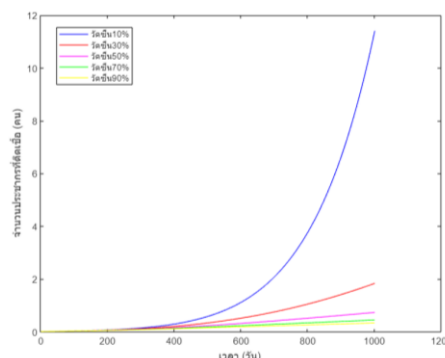
ภาพที่ 2 อัตราการเปลี่ยนแปลงของจำนวนประชากรกลุ่มเสี่ยง (S) ณ เวลา t ใดๆ $(\theta) = 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9$ ตามลำดับ ณ เสถียรภาพของจุดสมดุลมีโรค

จากภาพที่ 2 เมื่อเพิ่มอัตราการฉีดวัคซีนลงในตัวแบบเชิงคณิตศาสตร์ให้มากขึ้นจะพบว่า อัตราการเปลี่ยนแปลงของกลุ่มประชากรกลุ่มเสี่ยงจะค่อย ๆ ลดลงและเปลี่ยนแปลงอย่างช้า ๆ ซึ่งถ้าประชากรได้รับการฉีดวัคซีนเป็นจำนวนมากขึ้นจะส่งผลให้จำนวนประชากรกลุ่มเสี่ยงลดลงอย่างช้า ๆ และใช้เวลานานขึ้น นั้นหมายความว่ามีการแพร่ระบาดของโรคลดน้อยลง



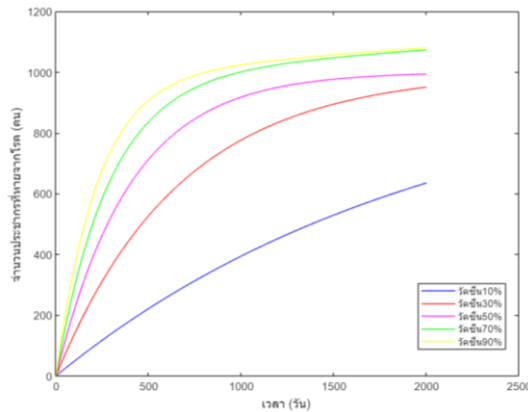
ภาพที่ 3 อัตราการเปลี่ยนแปลงของจำนวนประชากรกลุ่มติดเชื้อแต่ไม่แสดงอาการ (E) ณ เวลา t ใดๆ $(\theta) = 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9$ ตามลำดับ ณ เสถียรภาพของจุดสมดุลมีโรค

จากภาพที่ 3 เมื่อเพิ่มอัตราการฉีดวัคซีนลงในตัวแบบเชิงคณิตศาสตร์ให้มากขึ้นจะพบว่า อัตราการเปลี่ยนแปลงของกลุ่มประชากรกลุ่มติดเชื้อแต่ไม่แสดงอาการจะลดลงอย่างเห็นได้ชัด และยังพบว่าจุดสูงสุดของประชากรกลุ่มติดเชื้อแต่ไม่แสดงอาการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัดเจน



ภาพที่ 4 อัตราการเปลี่ยนแปลงของจำนวนประชากรกลุ่มติดเชื้อ (I) ณ เวลา t ใดๆ $(\theta) = 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9$ ตามลำดับ ณ เสถียรภาพของจุดสมดุลมีโรค

จากภาพที่ 4 เมื่อเพิ่มอัตราการฉีดวัคซีนลงในตัวแบบเชิงคณิตศาสตร์ให้มากขึ้นจะพบว่า อัตราการเปลี่ยนแปลงของกลุ่มประชากรกลุ่มติดเชื้อ จะลดลงอย่างเห็นได้ชัด และพบว่าจำนวนคนติดเชื้อ ณ จุดสูงสุดของกราฟของประชากรกลุ่มติดเชื้อเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัดเจน ดังภาพที่ 5



ภาพที่ 5 อัตราการเปลี่ยนแปลงของจำนวนประชากรกลุ่มที่หายจากโรค (R) ณ เวลา t ใด ๆ (θ) = 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9 ตามลำดับ ณ เสถียรภาพของจุดสมดุลโรค

จากภาพที่ 5 เมื่อเพิ่มอัตราการฉีดวัคซีนลงในตัวแบบเชิงคณิตศาสตร์ จะส่งผลให้จำนวนประชากรกลุ่มติดเชื้อเปลี่ยนไปเป็นกลุ่มที่หายป่วยจากโรครวดเร็วขึ้น เนื่องจากคนติดเชื้อน้อยลงจึงส่งผลให้เกิดการแพร่ระบาดลง

จากการศึกษาพบว่าอัตราการฉีดวัคซีนป้องกันเป็นผลปัจจัยหนึ่งต่อตัวแบบเชิงคณิตศาสตร์เกี่ยวกับการฉีดวัคซีนป้องกันโรคโควิด-19 โดยพบว่าถ้าประชากรที่เสี่ยงต่อการติดเชื้อมีการฉีดวัคซีนป้องกันน้อยจะส่งผลให้การแพร่ระบาดของโรคเพิ่มขึ้นและถ้าประชากรที่เสี่ยงต่อการติดเชื้อมีการฉีดวัคซีนป้องกันเป็นจำนวนมากจะส่งผลให้การแพร่ระบาดของโรคลดลง

สรุปผลการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาผลของการฉีดวัคซีนสำหรับตัวแบบเชิงคณิตศาสตร์ของการป้องกันโรคโควิด-19 และวิเคราะห์เสถียรภาพของผลของการฉีดวัคซีนสำหรับตัวแบบเชิงคณิตศาสตร์ของการป้องกันโรคโควิด-19 ตัวแบบเชิงคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้ คือ ระบบสมการอนุพันธ์แบบไม่เชิงเส้น ซึ่งประกอบด้วย ประชากรที่เสี่ยงต่อการติดเชื้อ ประชากรที่ติดเชื้อแต่ไม่แสดงอาการ ประชากรที่ติดเชื้อ และประชากรที่หายจากโรค ซึ่งผู้วิจัยเพิ่มค่าพารามิเตอร์ (θ) คือ อัตราการฉีดวัคซีนลงในตัวแบบเชิงคณิตศาสตร์ใช้วิธีการวิเคราะห์วิธีมาตรฐาน และวิเคราะห์เชิงตัวเลขสำหรับตรวจสอบการแพร่ระบาดของโรค

ผู้วิจัยได้พิจารณาจุดสมดุลที่ไม่มีโรคและจุดสมดุลที่เกิดการแพร่ระบาดของโรคโดยการวิเคราะห์จุดสมดุลและเสถียรภาพของจุดสมดุลด้วยวิธีการวิเคราะห์วิธีมาตรฐานซึ่งค่าเสถียรภาพของระบบ Local Asymptotically Stable ที่ได้ต้องเป็นไปตามเงื่อนไขของ Routh-Hurwitz เพื่อสามารถหาค่าพารามิเตอร์ R_0 ซึ่งมีความจำเป็นภายใต้เงื่อนไขเพื่อให้ Local Asymptotically Stability of Equilibrium Stable ที่มีเสถียรภาพในส่วนของจุดสมดุลที่ไม่มีโรคและจุดสมดุลที่เกิดการแพร่ระบาดของโรค โดยที่ $R_0 = \frac{\nu\mu N\varepsilon}{(\omega + \theta)(\varepsilon + \omega)(\sigma + \omega + \beta)}$ สามารถพิจารณาค่าระดับการติดเชื้อ (R_0) โดยค่า $R_0 < 1$ วิเคราะห์ได้ว่า ณ จุดสมดุลที่ไม่มีโรคจึงไม่เกิดการแพร่ระบาดของโรค และค่า $R_0 > 1$ วิเคราะห์ได้ว่า ณ จุดสมดุลที่มีการติดเชื้อจึงเกิดการแพร่ระบาดของโรค จากการวิเคราะห์เชิงตัวเลขพบว่าจุดสมดุลทั้งสองเป็น Local Asymptotically Stable

จากการวิจัยพบว่าประสิทธิภาพการฉีดวัคซีนป้องกันเป็นผลปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของตัวแบบเชิงคณิตศาสตร์ SEIR สำหรับการควบคุมการแพร่ระบาดของโรค ถ้าประชากรที่เสี่ยงต่อการติดเชื้อโควิด-19 มีการฉีดวัคซีนป้องกันจำนวนมาก จะส่งผลให้การแพร่ระบาดของโรคลดลง แต่อย่างไรก็ตามในปัจจุบันสถานการณ์โรคโควิด-19 ในประเทศไทยค่า (R_0) ยังคงมีการเปลี่ยนแปลงอยู่เสมอ เนื่องจากการวิวัฒนาการของสายพันธุ์ไวรัสโรคโควิด-19 การสร้างภูมิคุ้มกันในร่างกายลดน้อยลง และยังมีการพบปะสังสรรค์ การเดินทางไปหาผู้กัก การอยู่ร่วมกันในสังคมแออัด ดังนั้น เราจึงต้องมีการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ตลอดเวลา ตามสถานการณ์ในปัจจุบัน

ข้อเสนอแนะ

1. ตัวแบบเชิงคณิตศาสตร์ที่ได้จากการศึกษาในครั้งนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับโรคชนิดอื่น ที่มีลักษณะการแพร่ระบาดของโรคคล้ายกับโรคโควิด-19 ได้
2. สามารถวิจัยและศึกษาองค์ประกอบอื่นๆ ที่มีผลกระทบต่อควบคุมการแพร่ระบาดของโรคโควิด-19 โดยการเพิ่มค่าพารามิเตอร์อื่นๆ ได้ ได้แก่ การณรงค์การให้ความรู้ การสวมหน้ากากอนามัย เป็นต้น
3. สามารถพัฒนาตัวแบบเชิงคณิตศาสตร์ของการแพร่ระบาดของโรคโควิด-19 โดยการเพิ่มค่าพารามิเตอร์จากกลุ่มที่หายป่วยแล้วกลับไปยังกลุ่มเสี่ยงอีกครั้งหนึ่ง เนื่องจากผู้ป่วยโควิด-19 ที่รักษาหายแล้วมีโอกาสติดเชื้อได้อีก

เอกสารอ้างอิง

- กระทรวงสาธารณสุขจังหวัดภูเก็ต. (2565). **โควิด-19**. (ข้อมูลเมื่อ 28 ธันวาคม 2565)
- ธีรวัฒน์ นาคะบุตร. (2546). **ตัวแบบเชิงคณิตศาสตร์**. นครปฐม: สถาบันราชภัฏนครปฐม.
- แคทลียา ดวงเกตุ. (2556). **20 คำถามสำคัญของคณิตศาสตร์** (พิมพ์ครั้งที่2). (น.247-248). กรุงเทพฯ: มติชน.
- กรมควบคุมโรค กระทรวงสาธารณสุข. (2563-2565). **รายงานสถานการณ์การติดเชื้อไวรัสโคโรนา2019**. <<https://ddc.moph.go.th/covid19-dashboard/?dashboard=province>>
- กรมควบคุมโรค กระทรวงสาธารณสุข. (2563ก). **คู่มือการป้องกันและควบคุมโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา2019 สำหรับประชาชน**. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์ชุมนุมสหกรณ์การเกษตรแห่งประเทศไทย
- อิทธิพล นวาระสุจิต และ คณะ. (2565). **ตัวแบบเชิงคณิตศาสตร์ของโรคโควิด-19 ในประเทศไทย**. วารสารการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครสวรรค์
- อนุวัตร จิรวัฒนพานิช, อนุรักษ์ วีระประเสริฐสกุล, สุดาทิพย์ หาญเชิงชัย และ จุฬาลักษณ์ ใจอ่อน. (2559). **ตัวแบบเชิงคณิตศาสตร์ SEIR สำหรับการควบคุมการแพร่ระบาดของโรคอีสุกอีใสโดยการรณรงค์ให้ความรู้**. วารสารวิชาการ มหาวิทยาลัยราชภัฏภูเก็ต, 13(2), 254-275.
- Fred Brauer, Pauline den Driessche and Jianhong Wu. (2008). **Mathematical Epidemiology**. 2563, <<http://link.springer.com/book/10.1007%2F978-3-540-789911-6>>
- Contributions to the mathematical theory of epidemics--III. Further studies of the problem of endemicity. 1933
- Kermack, W. O., and McKendrick, A. G. (1927). A Contribution to the Mathematical Theory of Epidemics. **Containing Papers of a Mathematical and Physical Character**, 115(772), 700-721. <<https://doi.org/10.1098/rspa.1927.0118>>

การพัฒนาแบบการจัดการด้านสิ่งแวดล้อมเพื่อผู้สูงอายุ โดยการมีส่วนร่วมแบบบูรณาการ
ของครอบครัวและชุมชนในเขตอำเภอเมือง จังหวัดมหาสารคาม
Development of Environmental Management Model the Elderly System Based on
Integrated Participation of Families and Communities in Maha Sarakham Province

นิวัตร สุวรรณ¹ นิภูษณีย์ บรรเทา²

E-mail: niwa_su@yahoo.com

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาสภาพแวดล้อมภายในและภายนอกบ้าน และพัฒนาแบบการจัดการด้านสิ่งแวดล้อมเพื่อผู้สูงอายุ โดยการมีส่วนร่วมแบบบูรณาการของครอบครัวและชุมชนในเขตอำเภอเมือง จังหวัดมหาสารคาม สุ่มตัวอย่างจำนวน 380 คน เครื่องมือที่ใช้ในการเก็บรวบรวมข้อมูลเป็นแบบสอบถามที่จะใช้ในการสำรวจกลุ่มตัวอย่างผู้สูงอายุหรือผู้อยู่อาศัยที่พักอาศัยในครัวเรือนที่เป็นเป้าหมาย และแบบประเมินการจัดการสภาพแวดล้อมและที่พักอาศัยสำหรับผู้สูงอายุ สถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลเป็นค่าเฉลี่ย ร้อยละ ผลการศึกษาผู้สูงอายุเฉลี่ยเท่ากับ 69 ปี และผู้สูงอายุส่วนใหญ่เป็นหญิงร้อยละ 75.26 และเป็นชายร้อยละ 24.74 ลักษณะการอยู่อาศัยของผู้สูงอายุส่วนใหญ่อยู่ร่วมกับผู้อื่นร้อยละ 95.79 มีผู้ดูแลร้อยละ 97.37 และผู้สูงอายุอยู่เพียงลำพังร้อยละ 4.21 ไม่มีคนดูแลร้อยละ 2.63 ซึ่งกลุ่มผู้สูงอายุมักจะมีการเปลี่ยนแปลงทางร่างกายและจิตใจทำให้ประสบปัญหาต่อสุขภาพได้ง่าย สำหรับผลการศึกษาระดับความคิดเห็นต่อแนวคิดการจัดการสภาพแวดล้อมและที่พักอาศัยสำหรับผู้สูงอายุพบว่า ผู้สูงอายุมีระดับความคิดเห็นต่อมีน้ำสำหรับอุปโภคบริโภคสุขลักษณะและปลอดภัย มีระดับความพึงพอใจอยู่ในระดับมากที่สุด ($\bar{x} = 4.555$) รองลงมาคือมีน้ำสำหรับบริโภคสุขลักษณะและปลอดภัยอยู่ในระดับมากที่สุด ($\bar{x} = 4.555$) บริเวณบ้านมีแสงสว่าง (ไฟฟ้า) เพียงพออยู่ในระดับมากที่สุด ($\bar{x} = 4.532$) และคำถามที่อยู่ระดับต่ำสุด มีระดับความพึงพอใจปานกลาง คือ ชุมชนมีอุปกรณ์สำหรับออกกำลังกาย ($\bar{x} = 3.64$) ตามลำดับ

คำสำคัญ: รูปแบบการจัดการด้านสิ่งแวดล้อม ผู้สูงอายุ โดยการมีส่วนร่วม บูรณาการของครอบครัวและชุมชน

Abstract

The research of this study is to environmental inside and outside the house and Development of Environmental Management Model by the Elderly System based on Integrated Participation of Families and Communities in Maha Sarakham Province. A sampling of 380 elderly. The research tools used for collecting the data were a sampling survey questionnaire of the elderly and occupants in targeted areas and an evaluation form of environmental and residential management for the elderly. The data were analyzed by percentage and average. The result found that the average age of the subjects was 69 years. The elderly mostly is women 75.26 and man 24.74 percentage. Nature living of elderly mostly is share with others 95.79 percentage have intendant 97.37 percentage and elderly live sole 4.21 and unattended 2.63 percentage. There are several ideas to escalate the standard of the environment and safe residence for elderly, comment level of water for consumption hygienic practice satisfied which ranked the highest ($\bar{x} = 4.555$) followed by water for consume hygienic practice satisfied which ranked the highest ($\bar{x} = 4.555$), house area have enough light which ranked the highest ($\bar{x} = 4.532$) and question is Minimum reservoir level which ranked the moderate is communities have equipment for exercise ($\bar{x} = 3.64$) respectively.

Keywords: development of environmental management model, elderly, participation, integrated of families and communities

^{1,2} อาจารย์ประจำสาขาวิชาสถิติประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม

ความเป็นมาของปัญหา

ประเทศไทยจะเข้าสู่ “สังคมผู้สูงอายุ โดยสมบูรณ์” ในปี พ.ศ. 2573 เนื่องจากมีสัดส่วนผู้สูงอายุสูงถึง 22.7% ของประชากรทั้งหมด 68.3 ล้านคน การลดขนาดของบุคคลในครอบครัวเล็กลงเป็นสาเหตุให้ผู้สูงอายุอยู่ตามลำพัง ฉะนั้นกระบวนการเตรียมความพร้อมด้านสุขภาพรวมถึงการออกแบบที่อยู่อาศัยภายในบ้านที่เหมาะสมจึงเป็นสิ่งสำคัญที่เอื้อต่อสุขภาพและคุณภาพชีวิตที่ดีของผู้สูงอายุ การดูแลด้านสิ่งแวดล้อม (Assessing Environmental Care) เช่น การให้คำแนะนำ หรือการปรับปรุงทางกายภาพของบ้าน การประยุกต์ใช้วัสดุที่มีอยู่ในท้องถิ่น รวมถึงการสร้างกรอบแนวคิดในการปรับปรุงสภาพแวดล้อมให้มีความเหมาะสมตามบริบทของพื้นที่เพื่อลดอันตรายและอุบัติเหตุต่างๆ การออกแบบเพื่อมวลชน (Universal Design) การพัฒนาความสามารถของผู้ดูแลผู้สูงอายุ (Care Manager) โดยเฉพาะญาติสายตรงหรือญาติใกล้ชิดให้ตระหนักในด้านความปลอดภัยในการจัดสิ่งแวดล้อมในบ้านที่เอื้อต่อสุขภาพผู้สูงอายุและเพื่อลดความเสี่ยงอันตรายที่จะเกิดขึ้นกับผู้สูงอายุ (จอมชัย, ปิยะ และณรงค์ศักดิ์, 2563)

ปัจจุบันโลกกำลังก้าวเข้าสู่ “ศตวรรษแห่งผู้สูงอายุ” (Population aging century) เริ่มตั้งแต่คริสต์ศตวรรษใหม่ คือนับตั้งแต่ปี ค.ศ. 2001 – 2100 (พ.ศ. 2544 – 2643) จำนวนประชากรผู้สูงอายุทั่วโลกมีสัดส่วนเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จากแนวโน้มผู้สูงอายุและอายุขัยเฉลี่ยที่มีแนวโน้มสูงขึ้น นำมาซึ่งภาวะเสี่ยงและปัญหาด้านสุขภาพ โดยเฉพาะการเจ็บป่วยด้วยโรคเรื้อรัง เนื่องจากวัยสูงอายุมีธรรมชาติการเปลี่ยนแปลงที่เสื่อมลงทั้งทางด้านร่างกาย จิตใจ และสังคม (Ebersole & Hess, 2010) มีอุบัติการณ์การเกิดโรคมมากกว่าวัยอื่นๆ ถึง 4 เท่า (Elipoulos, 2005) นำไปสู่ภาวะทุพพลภาพ และการเจ็บป่วยเรื้อรัง โดยพบว่าโรคเรื้อรังที่ผู้สูงอายุส่วนใหญ่เป็น 3 อันดับแรก ได้แก่ โรคเบาหวาน โรคความดันโลหิตสูง และโรคหัวใจ ร้อยละ 7.0 (สำนักงานสถิติแห่งชาติ, 2562)

การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางประชากรไทยไปสู่สังคมผู้สูงอายุเช่นนี้ ทำให้สังคมไทยในวันข้างหน้าอาจต้องประสบกับปัญหาใหญ่ คือ ปัญหาการขาดผู้ดูแล เพราะเมื่อผู้สูงอายุมีอายุยืนยาวขึ้นจำนวนผู้สูงอายุก็จะยิ่งมากขึ้น ความต้องการการช่วยเหลือดูแลย่อมต้องมากเพิ่มขึ้นเป็นเงาตามตัว แต่ตัวเลขอัตราส่วนเกื้อหนุนกลับชี้ว่า จำนวนคนวัยแรงงานที่มีความสามารถในการให้การดูแลเกื้อหนุนผู้สูงอายุจะลดน้อยลง จากจำนวนถึง 6.5 คน ในปี 2548 เหลือเพียง 2 คนในปี 2578 (ปีพม่า และ ปราโมทย์, 2549) นอกจากผู้สูงอายุขาดคนดูแลแล้ว ผู้สูงอายุบางคนอาจต้องทำหน้าที่ดูแลผู้สูงอายุด้วยกันหรือสมาชิกในครอบครัวคนอื่นๆ อีกด้วย เมื่อมีแนวโน้มว่าสถาบันครอบครัวจะสามารถให้การเกื้อหนุนผู้สูงอายุได้น้อยลง ในขณะที่เครือข่ายทางสังคมไม่ว่าจะเป็นเพื่อนบ้าน ญาติ กลุ่มหรือสมาชิกในชุมชนก็ไม่ปฏิบัติบทบาทในการดูแลผู้สูงอายุได้อย่างเข้มแข็งเพียงพอ วิธีการดำรงชีวิตของผู้สูงอายุย่อมเกิดปัญหา และสังคมโดยรวมก็คงได้รับผลกระทบอย่างปฏิเสธไม่ได้

สิ่งแวดล้อมภายในที่อยู่อาศัยที่ไม่เหมาะสมอันจะก่อให้เกิดอันตราย (Lan et al., 2009) หรืออุปสรรคทางสิ่งแวดล้อมเช่น ความยุ่งเหยิงเกะกะ (Julie & Joseph, 2004) พื้นที่ที่มีความสิ้นเปลืองที่ไม่เรียบเก๋อี่ต่ำเกินไปไม่มีราวจับ (Erik et al., 2004; Lan et al., 2009) ตลอดจนสิ่งแวดล้อมภายนอกที่อยู่อาศัยหรือพื้นที่สาธารณะในชุมชน เช่นลักษณะทางกายภาพของถนน (Borst et al., 2008) ลักษณะสิ่งแวดล้อมที่กล่าวมาอาจจะส่งผลกระทบต่อการดำรงชีวิตในแง่ลบต่อผู้สูงอายุได้ทั้งสิ้น ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องมีการปรับเปลี่ยนจัดการสิ่งแวดล้อมให้เหมาะสม และให้ความช่วยเหลือในกิจวัตรประจำวันของผู้สูงอายุให้มากขึ้น (O'Meara and Smith, 2006) ครอบคลุมทั้งระบบ และมีความครอบคลุมในการดูแลมิติต่างๆ ในการดำเนินชีวิตประจำวันโดยคำนึงถึงความปลอดภัยทางกายภาพ ความสามารถเข้าถึงหรือใช้ได้ง่ายสามารถสร้างแรงกระตุ้นต่อผู้สูงอายุได้ และดูแลรักษาอย่างเป็นต้น (ไตรรัตน์, 2553)

โดยงานวิจัยนี้นำเสนอเกี่ยวกับการศึกษาและการพัฒนารูปแบบการจัดการด้านสิ่งแวดล้อมที่เอื้อต่อสุขภาพผู้สูงอายุ การจัดการด้านสิ่งแวดล้อมที่จำเป็นสำหรับผู้สูงอายุ โดยการมีส่วนร่วมแบบบูรณาการของครอบครัวและชุมชนในเขตอำเภอเมือง จังหวัดมหาสารคาม การศึกษาที่ได้สามารถใช้เป็นแนวทางในการวางแผนจัดการด้านสิ่งแวดล้อมเพื่อผู้สูงอายุในเขตเทศบาลเมืองมหาสารคาม จังหวัดมหาสารคาม เพื่อให้ผู้สูงอายุอยู่ในสภาพแวดล้อมที่ดีและถูกต้องต่อไป

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาสภาพแวดล้อมภายในและภายนอกบ้านผู้สูงอายุ โดยการมีส่วนร่วมแบบบูรณาการของครอบครัวและชุมชนในเขตอำเภอเมือง จังหวัดมหาสารคาม
2. เพื่อพัฒนารูปแบบการจัดการด้านสิ่งแวดล้อมเพื่อผู้สูงอายุโดยการมีส่วนร่วมแบบบูรณาการของครอบครัวและชุมชนในเขตอำเภอเมือง จังหวัดมหาสารคาม
3. เพื่อประเมินรูปแบบการจัดการด้านสิ่งแวดล้อมเพื่อผู้สูงอายุโดยการมีส่วนร่วมแบบบูรณาการของครอบครัวและชุมชนในเขตอำเภอเมือง จังหวัดมหาสารคาม

วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้เป็นการวิจัยเชิงสำรวจเพื่อศึกษาสภาพแวดล้อมภายในและภายนอกบ้านผู้สูงอายุ การพัฒนาและการประเมินระบบการจัดการด้านสิ่งแวดล้อมสำหรับผู้สูงอายุมีส่วนร่วมแบบบูรณาการของครอบครัวและชุมชน ดำเนินดังนี้

1. ประเภทของการวิจัย โดยมี 3 ระยะ ดังนี้

1.1 ระยะที่ 1 การศึกษาสภาพแวดล้อมภายในและภายนอกบ้าน และการพัฒนาด้านสิ่งแวดล้อมของผู้สูงอายุโดยการมีส่วนร่วมแบบบูรณาการของครอบครัวและชุมชนในเขตอำเภอเมือง จังหวัดมหาสารคาม โดยได้ดำเนินการ ดังนี้

- 1.1.1 ทบทวนเอกสาร แนวคิด ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการจัดการด้านสิ่งแวดล้อมสำหรับผู้สูงอายุ
- 1.1.2 สำรวจ วิเคราะห์สภาพปัญหา และอุปสรรคของการจัดการด้านสิ่งแวดล้อมสำหรับผู้สูงอายุ
- 1.1.3 จัดประชุมสรุปผลการพัฒนาด้านสิ่งแวดล้อมสำหรับผู้สูงอายุ และคืนข้อมูลให้ชุมชน
- 1.1.4 การสร้างเครื่องมือในการเก็บรวบรวมข้อมูล คือ

1) แบบสอบถามความคิดเห็นต่อระบบการจัดการด้านสิ่งแวดล้อมสำหรับผู้สูงอายุ ซึ่งผู้วิจัยได้พัฒนาขึ้นเอง ประกอบด้วยด้านข้อมูลทั่วไปจำนวน 10 ข้อ ด้านสภาพแวดล้อมภายในและภายนอกบ้านผู้สูงอายุ จำนวน 9 ข้อ และการพัฒนารูปแบบการจัดการด้านสิ่งแวดล้อม 20 ข้อ รวมทั้งหมด 39 ข้อ

2) แบบสอบถาม มี 3 ส่วน ดังนี้ ส่วนที่ 1 สัมภาษณ์เกี่ยวกับข้อมูลทั่วไปของตอบแบบสอบถาม ส่วนที่ 2 แบบสอบถามเกี่ยวกับสภาพแวดล้อมภายในและภายนอกบ้านผู้สูงอายุ และส่วนที่ 3 แบบสอบถามการพัฒนารูปแบบการจัดการด้านสิ่งแวดล้อม

1.2 ระยะที่ 2 การพัฒนารูปแบบการจัดการด้านสิ่งแวดล้อมสำหรับผู้สูงอายุโดยการมีส่วนร่วมแบบบูรณาการของครอบครัวและชุมชนในเขตอำเภอเมือง จังหวัดมหาสารคาม มีการดำเนินงานเป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้

1.2.1 ขั้นตอนที่ 1 การพัฒนารูปแบบการจัดการด้านสิ่งแวดล้อมสำหรับผู้สูงอายุ ซึ่งดำเนินการโดยนำผลการวิเคราะห์ข้อมูลในระยะเวลาที่ 1 แนวคิดของ Kemmis & McTaggart และแนวคิดทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนารูปแบบการจัดการด้านสิ่งแวดล้อมสำหรับผู้สูงอายุ มาเป็นข้อมูลประกอบในการกร่างรูปแบบการดูแลด้านสิ่งแวดล้อมของผู้สูงอายุ ซึ่งได้ร่างรูปแบบการพัฒนารูปแบบการจัดการด้านสิ่งแวดล้อมสำหรับผู้สูงอายุ ซึ่งรูปแบบประกอบด้วย 8 องค์ประกอบหลัก คือ 1) หลักการและนโยบาย 2) วัตถุประสงค์ 3) กลวิธีการดูแลด้านสิ่งแวดล้อม 4) โครงสร้างการดูแลด้านสิ่งแวดล้อม 5) เครื่องมือที่ใช้ในการดูแลสิ่งแวดล้อมของผู้สูงอายุ 6) การดำเนินงานดูแลด้านสิ่งแวดล้อม 7) แนวทางการใช้รูปแบบการดูแลด้านสิ่งแวดล้อม และ 8) เงื่อนไขแห่งความสำเร็จ

1.2.2 ขั้นตอนที่ 2 การสนทนากลุ่มเพื่อวิพากษ์รูปแบบเพื่อประเมินรูปแบบการดูแลด้านสิ่งแวดล้อม ของผู้สูงอายุ โดยให้ผู้ทรงคุณวุฒิที่มีความรู้ ความสามารถด้านการดูแลด้านสิ่งแวดล้อมของผู้สูงอายุ ประเมินความเหมาะสมของสภาพที่พิกาศัยของผู้สูงอายุ

1.2.3 ขั้นตอนที่ 3 ทดลองใช้รูปแบบที่พัฒนาขึ้นซึ่งดำเนินการโดยนำผลการประเมินรูปแบบการดูแลด้านสิ่งแวดล้อมของผู้สูงอายุ มาทดลองใช้กับพื้นที่ตำบลแก้งเลิงจาน อำเภอเมือง จังหวัดมหาสารคาม

1.3 ระยะที่ 3 การประเมินรูปแบบการพัฒนารูปแบบการจัดการด้านสิ่งแวดล้อมสำหรับผู้สูงอายุโดยการมีส่วนร่วมแบบบูรณาการของครอบครัวและชุมชน ในเขตอำเภอเมือง จังหวัดมหาสารคาม แบ่งการดำเนินงานเป็น 2 ขั้นตอน ดังนี้

1.3.1 ขั้นตอนที่ 1 ขั้นตอนนี้เป็นการประเมินรูปแบบการพัฒนารูปแบบการจัดการด้านสิ่งแวดล้อมสำหรับผู้สูงอายุจากผู้ทรงคุณวุฒิที่มีความเชี่ยวชาญ และมีประสบการณ์การทำงานด้านการดูแลด้านสิ่งแวดล้อมของผู้สูงอายุ เช่น นักวิชาการจากมหาวิทยาลัย/วิทยาลัย นักวิชาการจากสำนักงานสาธารณสุขจังหวัด และประเมินรูปแบบที่สร้างขึ้นโดยใช้แบบประเมินความเหมาะสม และความเป็นไปได้ในการปฏิบัติจริง

1.3.2 ขั้นตอนที่ 2 ปรับปรุงแก้ไขตามข้อเสนอแนะข้อสังเกตของผู้ทรงคุณวุฒิ และตรวจสอบผลสรุปการประเมินความเหมาะสม และความเป็นไปได้ในการปฏิบัติจริงเพื่อสรุปและนำเสนอเป็นรูปแบบการพัฒนารูปแบบการจัดการด้านสิ่งแวดล้อมสำหรับผู้สูงอายุ ในเขตอำเภอเมือง จังหวัดมหาสารคาม

2. ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง

พื้นที่ศึกษา คือ อำเภอเมือง จังหวัดมหาสารคาม พื้นที่แบ่งออกเป็น 31 ชุมชน มีจำนวนบ้านรวมทั้งอำเภอ 20,364 หลังคาเรือนจากครัวเรือนทั้งหมด มีจำนวนประชากรทั้งหมด 54,421 คน มีจำนวนผู้สูงอายุ 6,043 คน และสุ่มตัวอย่างผู้สูงอายุ โดยกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการวิจัยมีจำนวน 380 คน ผู้วิจัยกำหนดขนาดของกลุ่มตัวอย่างโดยคำนวณจากสูตรของ ทาโรยามาเน (Taro Yamane) คือ

$$n = \frac{N}{1 + N(e)^2}$$

เมื่อ n = ขนาดของกลุ่มตัวอย่าง
 N = ขนาดของประชากร
 E = ความคลาดเคลื่อนของการสุ่ม
 ตัวอย่างเท่าที่จะยอมรับเมื่อระดับนัยสำคัญ 0.05

$$n = \frac{6,043}{1 + 6,043(0.05)^2} = 375.17 \text{ หรือประมาณ } 380 \text{ คน}$$

3. เครื่องมือที่ใช้ในการเก็บข้อมูล

เครื่องมือที่ใช้ในการเก็บรวบรวมข้อมูลดัดแปลงจากคู่มือการจัดสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมและปลอดภัยสำหรับผู้สูงอายุ ส่วนที่ 1 เป็นคำถามเกี่ยวกับข้อมูลทั่วไปของผู้ตอบแบบสอบถาม จำนวน 10 ข้อ ส่วนที่ 2 แบบสอบถามเกี่ยวกับสภาพแวดล้อมภายในและภายนอกบ้านผู้สูงอายุ จำนวน 9 ข้อ และตอนที่ 3 แบบสอบถามการพัฒนารูปแบบการจัดการด้านสิ่งแวดล้อม 20 ข้อ

4. การเก็บรวบรวมข้อมูล

การวิจัยเรื่องนี้เป็นการศึกษาเชิงสำรวจ (Exploratory Research) เพื่อศึกษาการศึกษาการพัฒนารูปแบบการจัดการด้านสิ่งแวดล้อมสำหรับผู้สูงอายุโดยการมีส่วนร่วมแบบบูรณาการของครอบครัวและชุมชนในเขตอำเภอเมือง จังหวัดมหาสารคาม โดยมีแหล่งข้อมูล ดังนี้

4.1 แหล่งข้อมูลทุติยภูมิ (Secondary Data) ได้จากการศึกษาค้นคว้าจากข้อมูล เอกสาร แนวคิดทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับพฤติกรรมบริการโรคสื่อสิ่งพิมพ์และสื่ออิเล็กทรอนิกส์ของผู้สูงอายุ

4.2 แหล่งข้อมูลปฐมภูมิ (Primary Data) ได้จากการใช้แบบสอบถามเก็บข้อมูลเกี่ยวกับเกี่ยวกับสภาพแวดล้อมของผู้สูงอายุ และการพัฒนารูปแบบการจัดการด้านสิ่งแวดล้อมสำหรับผู้สูงอายุโดยการมีส่วนร่วมแบบบูรณาการของครอบครัวและชุมชนในเขตอำเภอเมือง จังหวัดมหาสารคาม

การดำเนินการรวบรวมข้อมูลจากกลุ่มตัวอย่างด้วยแบบสอบถามที่ใช้เป็นเครื่องมือในการวิจัย ซึ่งผ่านการทดสอบความเชื่อมั่น (Reliability) ของแบบสอบถามด้วยการหาค่าครอนแบคอัลฟา (Cronbach's Alpha) เท่ากับ 0.928 แล้วจึงนำไปใช้กับกลุ่มตัวอย่างที่กำหนดไว้

5. การวิเคราะห์ข้อมูล

การวิเคราะห์ข้อมูลผู้วิจัยนำข้อมูลที่ได้อาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Statistical Package for the Social Sciences (SPSS) โดยใช้การวิเคราะห์ข้อมูลดังนี้

การวิเคราะห์สถิติเชิงพรรณนา (Descriptive Statistic) เป็นการอธิบายข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับกลุ่มตัวอย่าง ได้แก่ จำนวนความถี่ (Frequency) ค่าร้อยละ (Percentage) ค่าเฉลี่ย และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) โดยใช้เกณฑ์การให้ค่าเฉลี่ยคะแนนรายด้านและรายข้อ ดังนี้ (บุญชม, 2535)

4.51 - 5.00	หมายถึง	เห็นด้วยอยู่ในระดับมากที่สุด
3.51 - 4.50	หมายถึง	เห็นด้วยอยู่ในระดับมาก
2.51 - 3.50	หมายถึง	เห็นด้วยอยู่ในระดับปานกลาง
1.51 - 2.50	หมายถึง	เห็นด้วยอยู่ในระดับเล็กน้อย
1.00 - 1.50	หมายถึง	เห็นด้วยอยู่ในระดับไม่เลย

ผลการวิจัย

การพัฒนา รูปแบบการจัดการด้านสิ่งแวดล้อมเพื่อผู้สูงอายุโดยการมีส่วนร่วมแบบบูรณาการของครอบครัวและชุมชนในเขตอำเภอเมือง จังหวัดมหาสารคาม พบว่า

1. **ระยะที่ 1** การศึกษาสภาพแวดล้อมภายในและภายนอกบ้าน และการพัฒนาด้านสิ่งแวดล้อมของผู้สูงอายุโดยการมีส่วนร่วมแบบบูรณาการของครอบครัวและชุมชนในเขตอำเภอเมือง จังหวัดมหาสารคาม

1.1 ข้อมูลทั่วไป

ผู้สูงอายุเป็นเพศหญิง 286 คน คิดเป็นร้อยละ 75.26 และ เป็นเพศชาย 94 คน คิดเป็นร้อยละ 24.74 ผู้สูงอายุมีอายุเฉลี่ย 69 ปี โดยส่วนใหญ่อายุ 60 – 69 ปี 205 คน คิดเป็นร้อยละ 59.95 รองลงมา คือ อายุ 70 – 79 ปี 115 คน คิดเป็นร้อยละ 30.26 และอายุ 80 ปีขึ้นไป 60 คน คิดเป็นร้อยละ 15.79 ลักษณะการอยู่อาศัยของผู้สูงอายุ คือ อยู่รวมกับผู้อื่น 364 คน คิดเป็นร้อยละ 95.79 และอยู่อาศัยเพียงลำพัง 16 คน คิดเป็นร้อยละ 4.21 ลักษณะการอยู่อาศัย คือ มีผู้ดูแล 370 คน คิดเป็นร้อยละ 97.37 และไม่มีผู้ดูแล 10 คน คิดเป็นร้อยละ 2.63 ตามลำดับ (ดังตารางที่ 1)

ตารางที่ 1 แสดงจำนวนร้อยละของผู้ตอบแบบสอบถาม

ข้อมูลทั่วไปผู้ตอบแบบสอบถาม	จำนวน	ร้อยละ
เพศ		
ชาย	94	24.74
หญิง	286	75.26
อายุ		
60 – 69 ปี	205	59.95
70 – 79 ปี	115	30.26
80 ปีขึ้นไป	60	15.79
ลักษณะการอยู่อาศัยของผู้สูงอายุ		
อยู่รวมกับผู้อื่น	364	95.79
อยู่เพียงลำพัง	16	4.21
ความเป็นอยู่ของผู้สูงอายุ		
มีผู้ดูแล	370	97.37
ไม่มีผู้ดูแล	10	2.63
รวม	380	100

1.2 สภาพแวดล้อมภายในและภายนอกบ้านผู้สูงอายุ

1.2.1 สภาพแวดล้อมด้านอาคารที่พักอาศัย

อาคารที่พักอาศัยของผู้สูงอายุ ส่วนมากมีลักษณะสองชั้น 285 คิดเป็นร้อยละ 75 ขึ้นเดียวไม่ยกสูง 65 คร่าวเรือน คิดเป็นร้อยละ 17.1 และชั้นเดียวยกสูง 30 คร่าวเรือน คิดเป็นร้อยละ 7.89 ลักษณะทางเดินเข้าบ้านส่วนมากไม่มีพื้นต่างระดับ 327 คร่าวเรือน คิดเป็นร้อยละ 86.05 และมีพื้นต่างระดับ 53 คร่าวเรือน คิดเป็นร้อยละ 13.95 ตามลำดับ (ดังแสดงตารางที่ 2)

ตารางที่ 2 แสดงสภาพแวดล้อมด้านอาคารที่พักอาศัย

ข้อมูลทั่วไปอาคารที่พักอาศัย	จำนวน	ร้อยละ
ลักษณะอาคาร		
ชั้นเดียวไม่ยกสูง	65	17.1
ชั้นเดียวยกสูง	30	7.89
สองชั้น	285	75.00
ธรณีประตู		
มี	37	9.74
ไม่มี	343	90.26

ตารางที่ 2 (ต่อ)

ข้อมูลทั่วไปอาคารที่พักอาศัย	จำนวน	ร้อยละ
ทางเดินเข้าบ้านพื้นต่างระดับ		
มี	53	13.95
ไม่มี	327	86.05
เครื่องมือที่ขอความช่วยเหลือ		
มี	224	58.95
ไม่มี	156	41.05
การวางสิ่งเกาะทางเดิน		
มี	171	45.00
ไม่มี	209	55.00
ปลั๊กไฟ สายไฟ		
ชำรุด	33	8.68
ไม่ชำรุด	347	91.32
ระบบน้ำเพื่ออุปโภคบริโภค		
เพียงพอ	341	89.74
ไม่เพียงพอ	39	10.26
สิ่งอำนวยความสะดวก		
เพียงพอ	358	94.21
ไม่เพียงพอ	22	5.79
รวม	380	100

1.2.2 สภาพแวดล้อมด้านห้องพักอาศัย

บริเวณห้องนอนส่วนมากมีลักษณะชั้นล่าง 314 ครัวเรือน คิดเป็นร้อยละ 82.63 รองลงมาคือชั้นบน 44 ครัวเรือน คิดเป็นร้อยละ 11.58 และเป็นกระท่อม 22 ครัวเรือน คิดเป็นร้อยละ 5.79 ลักษณะการนอนส่วนมากนอนดี/เหมาะสม 301 ครัวเรือน คิดเป็นร้อยละ 79.21 รองลงมาคือพอใช้ 74 ครัวเรือน คิดเป็นร้อยละ 14.21 และนอนไม่สะดวก 10 ครัวเรือน คิดเป็นร้อยละ 2.63 การเข้าออกที่นอนดี/เหมาะสม 301 ครัวเรือน คิดเป็นร้อยละ 79.21 รองลงมาคือพอใช้ 74 ครัวเรือน คิดเป็นร้อยละ 14.21 และไม่สะดวก 5 ครัวเรือน คิดเป็นร้อยละ 1.32 ตามลำดับ (ดังแสดงตารางที่ 3)

ตารางที่ 3 แสดงสภาพแวดล้อมด้านห้องพักอาศัย

ข้อมูลทั่วไปห้องพักอาศัย	จำนวน	ร้อยละ
บริเวณห้องนอน		
ชั้นล่าง	314	82.63
ชั้นบน	44	11.58
กระท่อม	22	5.79
ลักษณะการนอน		
ไม่สะดวก	10	2.63
พอใช้	54	14.21
ดี/เหมาะสม	316	83.16
การเข้าออกที่นอน		
ไม่สะดวก	5	1.32
พอใช้	74	19.47
ดี/เหมาะสม	301	79.21

ตารางที่ 3 (ต่อ)

ข้อมูลทั่วไปห้องพักอาศัย	จำนวน	ร้อยละ
เสียงรบกวนเวลานอน		
ไม่มี	107	28.16
มีบางครั้งคราว	222	58.42
เป็นประจำ	51	13.42
เปิดหน้าต่างระบายอากาศ		
อากาศถ่ายเท	314	82.63
อากาศไม่ถ่ายเท	66	17.37
การรับแสงสว่าง		
เพียงพอ	326	85.79
ไม่เพียงพอ	54	14.21
สิ่งอำนวยความสะดวก		
เพียงพอ	343	90.26
ไม่เพียงพอ	37	3.74
รวม	380	100

1.2.3 สภาพแวดล้อมด้านห้องน้ำ

ลักษณะโครงสร้างของห้องอาบน้ำ/ห้องส้วมส่วนมากมีลักษณะอยู่ในห้องเดียวกันไม่มีการแยกพื้นที่ชัดเจน 158 ครั้วเรือน คิดเป็นร้อยละ 41.58 รองลงมาคืออยู่ในห้องเดียวกันแยกพื้นที่ชัดเจน 115 ครั้วเรือน คิดเป็นร้อยละ 30.26 และแยกห้องกัน 107 ครั้วเรือน คิดเป็นร้อยละ 28.16 สถานที่ตั้งของห้องอาบน้ำ/ห้องส้วมส่วนมากมีลักษณะภายในบ้าน 172 ครั้วเรือน คิดเป็นร้อยละ 45.26 ภายนอกบ้าน 155 ครั้วเรือน คิดเป็นร้อยละ 40.79 และภายในห้องนอน 53 ครั้วเรือน คิดเป็นร้อยละ 13.95 ลักษณะโถสุขภัณฑ์ส่วนมากมีลักษณะนั่งยองไม่มีราวจับ 139 ครั้วเรือน คิดเป็นร้อยละ 36.58 นั่งราบไม่มีราวจับ 94 ครั้วเรือน คิดเป็นร้อยละ 24.74 นั่งราบมีราวจับ 92 ครั้วเรือน คิดเป็นร้อยละ 24.21 ไปจนถึงไม่มีราวจับในห้องน้ำ 248 ครั้วเรือน คิดเป็นร้อยละ 65.26 และมีราวจับในห้องน้ำ 132 ครั้วเรือน คิดเป็นร้อยละ 34.74 ตามลำดับ (ดังแสดงตารางที่ 4)

ตารางที่ 4 แสดงสภาพแวดล้อมด้านห้องน้ำ

ข้อมูลทั่วไปห้องน้ำ	จำนวน	ร้อยละ
ลักษณะห้องอาบน้ำ/ห้องส้วม		
แยกห้องกัน	107	28.16
ห้องเดียวกันไม่แยกพื้นที่	158	41.58
ห้องเดียวกันแยกพื้นที่	115	30.26
สถานที่ตั้ง		
ภายในห้องนอน	53	13.95
ภายในบ้าน	172	45.26
ภายนอกบ้าน	155	40.79
ลักษณะโถสุขภัณฑ์		
นั่งยองไม่มีราวจับ	139	36.58
นั่งยองมีราวจับ	55	14.47
นั่งราบมีราวจับ	92	24.21
นั่งราบไม่มีราวจับ	94	24.74
ลักษณะการติดตั้งโถสุขภัณฑ์		
ยกสูงจากพื้น	205	53.95
ระดับเดียวกันกับพื้น	175	46.05

ตารางที่ 4 (ต่อ)

ข้อมูลทั่วไปห้องน้ำ	จำนวน	ร้อยละ
ภาชนะ/อุปกรณ์ที่ใช้รองน้ำ		
อ่างน้ำก่อกปูนสำเร็จรูป	99	26.05
โถ่งน้ำ	66	17.37
ถังน้ำพลาสติก	19	50.79
การชำระล้างร่างกาย/การใช้น้ำ		
อ่างอาบน้ำ	61	16.05
ภาชนะรองน้ำ	236	62.11
ฝักบัว	83	21.84
การทำความสะอาดพื้น		
มี	140	36.84
ไม่มี	240	63.16
พรมเช็ดเท้า/ผ้าเช็ดตัว		
มี	277	72.89
ไม่มี	103	27.11
ราวจับ		
มี	132	34.74
ไม่มี	248	65.26
รวม	380	100

1.2.4 สภาพแวดล้อมด้านห้องครัว

สถานที่ตั้งห้องส่วนมากมีลักษณะภายนอกบ้าน 205 ครัวเรือน คิดเป็นร้อยละ 53.95 และครัวภายในบ้าน 175 ครัวเรือน คิดเป็นร้อยละ 46.05 การจัดเก็บสิ่งของภายในห้องเป็นระเบียบ 270 ครัวเรือน คิดเป็นร้อยละ 71.05 และไม่เป็นระเบียบ 110 ครัวเรือน คิดเป็นร้อยละ 28.95 การจัดวางพื้นที่ประกอบอาหารเป็นระเบียบ 273 ครัวเรือน คิดเป็นร้อยละ 71.84 และไม่เป็นระเบียบ 107 ครัวเรือน คิดเป็นร้อยละ 28.16 ตามลำดับ (ดังแสดงตารางที่ 5)

ตารางที่ 5 แสดงสภาพแวดล้อมด้านห้องครัว

ข้อมูลทั่วไปห้องครัว	จำนวน	ร้อยละ
สถานที่ตั้ง		
ภายในบ้าน	175	46.05
ภายนอกบ้าน	205	53.95
การจัดเก็บสิ่งของภายในห้อง		
เป็นระเบียบ	270	71.05
ไม่เป็นระเบียบ	110	28.95
การจัดวางพื้นที่ประกอบอาหาร		
เป็นระเบียบ	273	71.84
ไม่เป็นระเบียบ	107	28.16
พื้นที่ในการวางเตา		
วางพื้น	96	25.26
วางบนพื้นที่สูง	284	74.74
เปิดหน้าต่างระบายอากาศ		
เปิด	309	81.32
ไม่ปิด	71	18.68

ตารางที่ 5 (ต่อ)

ข้อมูลทั่วไปห้องครัว	จำนวน	ร้อยละ
บริเวณพื้นที่ต่างระดับห้องครัว		
มี	223	58.68
ไม่มี	157	41.32
สิ่งอำนวยความสะดวก		
เพียงพอ	314	82.63
ไม่เพียงพอ	66	17.37
รวม	380	100

1.2.5 สภาพแวดล้อมด้านบันได

ลักษณะสภาพแวดล้อมบันไดคือ มีบันได 234 ครัวเรือน คิดเป็นร้อยละ 61.58 และไม่มีบันได 146 ครัวเรือน คิดเป็นร้อยละ 38.42 ลักษณะบันไดมีที่พัก 227 ครัวเรือน คิดเป็นร้อยละ 59.74 และไม่มีที่พัก 154 ครัวเรือน คิดเป็นร้อยละ 40.53 ตามลำดับ (ดังแสดงตารางที่ 6)

ตารางที่ 6 แสดงสภาพแวดล้อมด้านบันได

ข้อมูลทั่วไปบันได	จำนวน	ร้อยละ
บันได		
มีบันได	234	61.58
ไม่มีบันได	146	38.42
ลักษณะบันได		
มีที่พัก	227	59.74
ไม่มีที่พัก	154	40.53
การวางสิ่งของบริเวณบันได		
มี	136	35.79
ไม่มี	244	64.21
ราวบันได		
มี	230	60.53
ไม่มี	150	39.47
สิ่งอำนวยความสะดวก		
เพียงพอ	290	76.32
ไม่เพียงพอ	90	23.68
รวม	380	100

1.2.6 สภาพแวดล้อมบริเวณทางเดิน

สภาพแวดล้อมลักษณะทางเดินส่วนมากมีลักษณะคอนกรีต 212 ครัวเรือน คิดเป็นร้อยละ 55.79 ดิน 76 ครัวเรือน คิดเป็นร้อยละ 20 คอนกรีตตัวหนอน 41 ครัวเรือน คิดเป็นร้อยละ 10.79 และหิน 51 ครัวเรือน คิดเป็นร้อยละ 13.42 สภาพของพื้นทางเดินไม่มีพื้นที่เสี่ยง 188 ครัวเรือน คิดเป็นร้อยละ 49.47 ขรุขระ(มีหินกรวด) 98 ครัวเรือน คิดเป็นร้อยละ 25.79 มีหลุมมีบ่อ 49 คิดเป็นร้อยละ 12.89 และมีน้ำขัง/พื้นลื่น 45 ครัวเรือน คิดเป็นร้อยละ 11.84 ตามลำดับ (ดังแสดงตารางที่ 7)

ตารางที่ 7 แสดงสภาพแวดล้อมบริเวณทางเดิน

ข้อมูลทั่วไปบริเวณทางเดิน	จำนวน	ร้อยละ
ลักษณะทางเดิน		
คอนกรีต	212	55.79
คอนกรีตตัวหนอน	41	10.79
ดิน	76	20.00
หิน	51	13.42
ตารางที่ 7 (ต่อ) สภาพของพื้นทางเดิน		
ไม่มีพื้นที่เสี่ยง	188	49.47
มีน้ำขัง/พื้นลื่น	45	11.84
มีหลุมบ่อ	49	12.89
ขรุขระ(มีหินกรวด)	98	25.79
สิ่งกีดขวางบริเวณทางเดิน		
มี	136	35.79
ไม่มี	244	64.21
รวม	380	100

1.2.7 สภาพแวดล้อมบริเวณรอบบ้าน

บริเวณรอบบ้านมีการสะสมสิ่งของที่ไม่ใช่แล้วไม่มี 227 คร่าวเรือน คิดเป็นร้อยละ 59.74 และมี 153 คร่าวเรือน คิดเป็นร้อยละ 40.26 วัสดุรอบบ้านที่เสี่ยงต่อการเกิดอุบัติเหตุไม่มี 256 คร่าวเรือน คิดเป็นร้อยละ 67.37 และมี 124 คร่าวเรือน คิดเป็นร้อยละ 32.63 ตามลำดับ (ดังแสดงตารางที่ 8)

ตารางที่ 8 แสดงสภาพแวดล้อมบริเวณรอบบ้าน

ข้อมูลทั่วไปบริเวณรอบบ้าน	จำนวน	ร้อยละ
การสะสมของสิ่งที่ไม่ใช่แล้ว		
มี	153	40.26
ไม่มี	227	59.74
วัสดุที่เสี่ยงต่อการเกิดอุบัติเหตุ		
มี	124	32.63
ไม่มี	256	67.37
บริเวณหน้าบ้านมีทางเดินลาดชัน		
มี	118	31.05
ไม่มี	262	68.95
การตัดแต่งไม้กีดขวางทางเดิน		
มี	125	32.89
ไม่มี	255	67.11
สัตว์เลี้ยง		
มี	216	56.84
ไม่มี	134	35.26
ต้นไม้บริเวณบ้าน		
มี	249	65.53
ไม่มี	131	34.47
รวม	380	100

2. ระยะที่ 2 การพัฒนารูปแบบการจัดการด้านสิ่งแวดล้อมเพื่อผู้สูงอายุโดยการมีส่วนร่วมแบบบูรณาการของครอบครัวและชุมชนในเขตอำเภอเมือง จังหวัดมหาสารคาม

ตารางที่ 9 แสดงการพัฒนารูปแบบการจัดการสิ่งแวดล้อมเพื่อผู้สูงอายุ

คำถาม	\bar{x}	S.D.	แปลผล
1. ที่อยู่อาศัย ถูกอนามัยและปลอดภัยต่อสุขภาพ	4.268	0.655	มาก
2. พื้นที่ภายในบ้านเหมาะสม และมีระดับของพื้นผิวที่รองรับการเคลื่อนไหว	4.263	0.696	มาก
3. ในบ้านมีพื้นที่ว่างเพียงพอเหมาะสม	4.502	0.614	มากที่สุด
4. พื้นทีในบ้านไม่เสียงอันตราย และสัมผัสเชื้อโรค	4.313	0.669	มาก
5. มีน้ำสำหรับอุปโภคถูกสุขลักษณะและปลอดภัย	4.555	0.543	มากที่สุด
6. มีน้ำสำหรับบริโภคถูกสุขลักษณะและปลอดภัย	4.555	0.558	มากที่สุด
7. อุปกรณ์ในการเก็บรักษาอาหาร มีการป้องกันแมลงและพาหะนำโรค	4.411	0.637	มาก
8. ในบริเวณบ้านมีแสงสว่าง (ไฟฟ้า) เพียงพอ	4.532	0.583	มากที่สุด
9. มีรถสำหรับอำนวยความสะดวก ในการเดินทาง	4.413	0.859	มาก
10. ในบ้านมีอุปกรณ์ป้องกันการเกิดไฟไหม้ หรือไฟฟ้าช็อต	3.945	1.173	มาก
11. มีการคัดแยกขยะเพื่อที่จะกำจัดได้ง่ายขึ้น	3.837	1.213	มาก
12. ไม่เผาขยะกลางแจ้ง เพื่อก่อให้เกิดควันและมลพิษทางอากาศ	3.918	0.989	มาก
13. ไม่นำขยะหรือสิ่งปฏิกูลทิ้งลงท่อระบายน้ำ	4.389	0.819	มาก
14. ชุมชนมีพื้นที่สำหรับทำกิจกรรมของผู้สูงอายุ	3.182	1.326	ปานกลาง
15. ชุมชนมีอุปกรณ์สำหรับออกกำลังกาย	3.137	1.326	ปานกลาง
16. ชุมชนมีอุปกรณ์สำหรับดูแลสุขภาพ	3.232	1.262	ปานกลาง
17. ชุมชนไม่เป็นแหล่งมั่วสุมของอบายมุข	3.611	0.997	มาก
18. ชุมชนจัดกิจกรรมส่งเสริมการรักษาสิ่งแวดล้อม	3.942	0.800	มาก
19. มีส่วนร่วมในการดูแลรักษาความสะอาดในชุมชน เช่น เก็บขยะ กวาดถนน ตัดหญ้า เป็นต้น	3.850	1.004	มาก
20. ถนนในเขตชุมชนขรุขระ เสี่ยงต่อการเกิดอุบัติเหตุ	3.621	1.042	มาก
รวม	4.024	0.889	มาก

จากตารางที่ 9 พบว่า ระบบการจัดการสิ่งแวดล้อมเพื่อผู้สูงอายุ คือ มีน้ำสำหรับอุปโภคถูกสุขลักษณะและปลอดภัย มีระดับความพึงพอใจมากที่สุด ($\bar{x} = 4.555$, S.D. = 0.543) รองลงมา คือ มีน้ำสำหรับบริโภคถูกสุขลักษณะและปลอดภัย มีระดับความพึงพอใจมากที่สุด ($\bar{x} = 4.555$, S.D. = 0.558) บริเวณบ้านมีแสงสว่าง (ไฟฟ้า) เพียงพอ มีระดับความพึงพอใจมากที่สุด ($\bar{x} = 4.532$, S.D. = 0.583) ไปจนถึงข้อคำถามที่อยู่ระดับต่ำสุด มีระดับความพึงพอใจปานกลาง คือ ชุมชนมีอุปกรณ์สำหรับออกกำลังกาย ($\bar{x} = 3.137$, S.D. = 1.326) ซึ่งจะเห็นได้ว่าในภาพรวมแล้วระบบการจัดการสิ่งแวดล้อมเพื่อผู้สูงอายุอยู่ในระดับดีมาก ($\bar{x} = 4.024$, S.D. = 0.889)

3. ระยะที่ 3 การประเมินรูปแบบการพัฒนารูปแบบการจัดการด้านสิ่งแวดล้อมเพื่อผู้สูงอายุโดยการมีส่วนร่วมแบบบูรณาการของครอบครัวและชุมชน ในเขตอำเภอเมือง จังหวัดมหาสารคาม

พบว่า จากการสนทนากลุ่ม อ่างอิงผู้เชี่ยวชาญ 7 คน ภายหลังจากศึกษาในระยะที่ 3 แล้ว ผู้เชี่ยวชาญให้ความเห็นในประเด็นคุณภาพของแบบประเมินการพัฒนารูปแบบการจัดการด้านสิ่งแวดล้อมเพื่อผู้สูงอายุโดยการมีส่วนร่วมแบบบูรณาการของครอบครัวและชุมชนในเขตอำเภอเมืองจังหวัดมหาสารคามด้านเนื้อหา ภาษาที่เข้าใจง่าย และเป็นประโยชน์ต่อผู้ดูแลที่นำไปใช้ได้จริง ผู้เชี่ยวชาญได้ตรวจสอบยืนยันรูปแบบว่ามีความสอดคล้องกับรูปแบบการจัดการด้านสิ่งแวดล้อมเพื่อผู้สูงอายุ โดยสอดคล้องกับแนวคิดของบลูม ผลการสัมภาษณ์ผู้เชี่ยวชาญทั้ง 7 คน คิดเป็นร้อยละ 100 มีความพึงพอใจในรูปแบบการการจัดการด้านสิ่งแวดล้อมเพื่อผู้สูงอายุในระดับมากขึ้นไป และมีความพึงพอใจโดยรวมมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.78 ดังนั้น รูปแบบการการจัดการด้านสิ่งแวดล้อมเพื่อผู้สูงอายุ โดยบทบาทผู้ดูแลนี้สามารถนำไปใช้จัดการด้านสิ่งแวดล้อมเพื่อผู้สูงอายุได้

อภิปรายผล

1. **ระยะที่ 1** การศึกษาสภาพแวดล้อมภายในและภายนอกบ้าน และการพัฒนาด้านสิ่งแวดล้อมของผู้สูงอายุ พบว่า ผลการศึกษาผู้สูงอายุมีอายุเฉลี่ยเท่ากับ 69 ปี และผู้สูงอายุส่วนใหญ่เป็นหญิงร้อยละ 75.26 และเป็นชายร้อยละ 24.74 ลักษณะการอยู่อาศัยของผู้สูงอายุส่วนใหญ่อยู่ร่วมกับผู้อื่นร้อยละ 95.79 มีผู้ดูแลร้อยละ 97.37 และผู้สูงอายุอยู่เพียงลำพังร้อยละ 4.21 ไม่มีคนดูแลร้อยละ 2.63 ซึ่งกลุ่มผู้สูงอายุจะมีการเปลี่ยนแปลงทางร่างกายและจิตใจอย่างวิเศษต่างๆ เริ่มเสื่อมถอยลงทำให้ประสบปัญหาต่อสุขภาพได้ง่าย (ชูเกียรติ และคณะ, 2548)

ผลการสำรวจและประเมินสภาพแวดล้อมและที่พักอาศัยของผู้สูงอายุ ตามมาตรฐานสำหรับที่พักอาศัย และสภาพแวดล้อมของผู้สูงอายุ ในด้านต่างๆ ได้แก่ด้านลักษณะที่ที่พักอาศัยเหมาะสมสำหรับผู้สูงอายุพบว่า ที่พักอาศัยผู้สูงอายุส่วนมากผ่านมาตรฐานสำหรับที่พักอาศัย และสภาพแวดล้อมของผู้สูงอายุ และผ่านมาตรฐานขั้นต่ำน้อยที่สุดคือ การติดตั้งราวจับและราวพยุงตัวบริเวณทางเดินในบ้านห้องน้ำ ห้องส้วม ห้องนอน ห้องครัว ยังไม่ผ่านมาตรฐานเลย (ไตรรัตน์, 2553)

1.1 ห้องนอน พบว่า พบว่าส่วนมากผ่านมาตรฐานขั้นต่ำ คิดเป็นร้อยละ 80 (304 ครัวเรือน) โดยบริเวณห้องนอนส่วนใหญ่จะมีลักษณะอยู่ชั้นล่างร้อยละ 82.63 ลักษณะการนอนดี/เหมาะสม ร้อยละ 79.21 การเข้าออกที่นอนดี/เหมาะสมร้อยละ 79.21 ตามลำดับ โดยภาพรวมแล้วห้องนอนผู้สูงอายุมีความเหมาะสม สอดคล้องกับการศึกษาของ นอรินี และประวีตร (2559)

1.2 ห้องน้ำ พบว่า ห้องน้ำผู้สูงอายุยังไม่ผ่านมาตรฐานขั้นต่ำ คิดเป็นร้อยละ 41 (156 ครัวเรือน) โดยห้องน้ำผู้สูงอายุส่วนใหญ่จะมีลักษณะอยู่ในห้องเดียวกันไม่มีการแยกพื้นที่ชัดเจนร้อยละ 41.58 สถานที่ตั้งภายในบ้านร้อยละ 45.26 และภายนอกบ้าน 155 ครัวเรือน คิดเป็นร้อยละ 40.79 ลักษณะโถสุขภัณฑ์นั่งยองไม่มีราวจับร้อยละ 36.58 และไม่มีราวจับในห้องน้ำร้อยละ 65.26 ตามลำดับ โดยภาพรวมแล้วห้องน้ำผู้สูงอายุยังต้องมีการปรับปรุง สอดคล้องกับการศึกษาของ นอรินี และประวีตร (2559)

1.3 ห้องครัว พบว่า ห้องครัวผู้สูงอายุผ่านมาตรฐานขั้นต่ำ คิดเป็นร้อยละ 60 (228 ครัวเรือน) โดยสถานที่ตั้งห้องครัวส่วนใหญ่อยู่ภายนอกบ้านร้อยละ 53.95 การจัดเก็บสิ่งของภายในห้องเป็นระเบียบร้อยละ 71.05 การจัดวางพื้นที่ประกอบอาหารเป็นระเบียบร้อยละ 71.84 ตามลำดับ โดยภาพรวมแล้วห้องครัวผู้สูงอายุยังต้องมีการปรับปรุงในเรื่องของพื้นที่ต่างระดับในห้องครัวควรไม่สูงเกินไป สอดคล้องกับการศึกษาของ นอรินี และประวีตร (2559)

1.4 บันได พบว่า บันไดบ้านผู้สูงอายุผ่านมาตรฐานขั้นต่ำ คิดเป็นร้อยละ 58 (220 ครัวเรือน) โดยลักษณะสภาพแวดล้อมบันไดส่วนใหญ่บ้านมีบันไดร้อยละ 61.58 ลักษณะบันไดมีที่พักร้อยละ 59.74 ตามลำดับ สอดคล้องกับการศึกษาของ นอรินี และประวีตร (2559)

1.5 บริเวณทางเดิน พบว่า บริเวณทางเดินบ้านผู้สูงอายุผ่านมาตรฐานขั้นต่ำ คิดเป็นร้อยละ 51 (194 ครัวเรือน) โดยสภาพแวดล้อมลักษณะทางเดินส่วนใหญ่มีลักษณะเป็นคอนกรีตร้อยละ 55.79 สภาพของพื้นทางเดินไม่มีพื้นที่เสี่ยงร้อยละ 49.47 ตามลำดับ โดยภาพรวมแล้วบริเวณทางเดิน มีความเหมาะสมแต่ก็ยังต้องมีการปรับปรุงบ้างในหลุมบ่อพื้นผิวขรุขระ สอดคล้องกับการศึกษาของ นอรินี และประวีตร (2559)

1.6 บริเวณบ้าน พบว่า บริเวณบ้านผู้สูงอายุผ่านมาตรฐานขั้นต่ำ คิดเป็นร้อยละ 63 (239 ครัวเรือน) โดยบริเวณรอบบ้านไม่มีการสะสมสิ่งของที่ไม่ใช่แล้วคิดเป็นร้อยละ 59.74 วัสดุรอบบ้านที่เสี่ยงต่อการเกิดอุบัติเหตุไม่มีร้อยละ 67.37 ตามลำดับ โดยภาพรวมแล้วบริเวณบ้าน ยังต้องมีการปรับปรุงบ้างในเรื่องของสัตว์เลี้ยงในบริเวณบ้านเพราะสัตว์บางชนิดอาจทำให้ผู้สูงอายุประสบอุบัติเหตุได้ เช่นเดียวกันบริเวณไม่ควรจะมีต้นไม้เยอะเกินไป เพื่อเข้ากับบริบทและความสะดวกสบายของผู้สูงอายุ สอดคล้องกับการศึกษาของ นอรินี และประวีตร (2559)

ลักษณะสิ่งแวดล้อมที่กล่าวมาทั้งหมดอาจจะส่งผลกระทบต่อการดำรงชีวิตในแง่ลบต่อผู้สูงอายุได้ทั้งสิ้นหากไม่ผ่านมาตรฐานขั้นต่ำ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องมีการปรับเปลี่ยน จัดการสิ่งแวดล้อมให้เหมาะสม และให้ความช่วยเหลือในกิจวัตรประจำวันของผู้สูงอายุให้มากขึ้น (O'Meara & Smith, 2006) หากสิ่งแวดล้อมภายในที่อยู่อาศัยมีความไม่เหมาะสมอันจะก่อให้เกิดอันตราย (Lan et al., 2009) หรืออุปสรรคทางสิ่งแวดล้อม เช่น ความยุ่งเหยิงเกะกะ (Julie & Joseph, 2004) พื้นที่ที่มีความลื่นปรวมที่ปูไม่เรียบเก้อต่างเกินไปไม่มีราวจับ (Erik et al., 2004; Lan et al., 2009) บันไดที่ชันไม่มีราวลูกกรงในห้องน้ำ และความไม่เพียงพอของแสงบริเวณทางเดินในห้องน้ำ ห้องนอน และห้องโถงต่างๆ ภายในบ้าน (Baraff et al., 1997) ตลอดจนสิ่งแวดล้อมภายนอกที่อยู่อาศัยหรือพื้นที่สาธารณะในชุมชน เช่นลักษณะทางกายภาพของถนน (Borst et al., 2008) ดังนั้นควรจัดการสิ่งแวดล้อมให้เหมาะสม และให้ความช่วยเหลือในกิจวัตรประจำวันของผู้สูงอายุให้มากขึ้น (O'Meara and Smith, 2006) ครอบคลุมทั้งระบบและมีความครอบคลุมในการดูแลมิติต่างๆ ในการดำเนินชีวิตประจำวัน โดยคำนึงถึงความปลอดภัยทางกายภาพ ความสามารถเข้าถึงหรือใช้ได้ง่าย สามารถสร้างแรงกระตุ้นต่อผู้สูงอายุได้ และดูแลรักษาง่าย เป็นต้น

2. **ระยะที่ 2** การพัฒนารูปแบบการจัดการด้านสิ่งแวดล้อมเพื่อผู้สูงอายุ พบว่า การห่วงใยและใส่ใจของคนในครอบครัวเป็นเรื่องจำเป็นอย่างยิ่งสำหรับผลการศึกษาระดับความคิดเห็นต่อแนวคิดพัฒนาระบบการจัดการสภาพแวดล้อมและที่พักอาศัยเพื่อผู้สูงอายุพบว่า ผู้สูงอายุมีระดับความคิดเห็นต่อน้ำสำหรับอุปโภคบริโภคสุขลักษณะและปลอดภัย มีระดับความพึงพอใจมากที่สุด อยู่ในระดับมากที่สุด ($\bar{x} = 4.555$) รองลงมาคือมีน้ำสำหรับบริโภคสุขลักษณะและปลอดภัย อยู่ในระดับมากที่สุด ($\bar{x} = 4.555$) บริเวณบ้านมีแสงสว่าง (ไฟฟ้า) เพียงพอ อยู่ในระดับมากที่สุด ($\bar{x} = 4.532$) และคำถามที่อยู่ระดับต่ำสุด มีระดับความพึงพอใจปานกลาง คือ ชุมชนมีอุปกรณ์สำหรับออกกำลังกาย ($\bar{x} = 3.64$) ตามลำดับเห็นได้ว่าการดูแลมิติต่างๆ ในการดำเนินชีวิตประจำวันโดยคำนึงถึงความปลอดภัยทางกายภาพ ความสามารถเข้าถึงหรือใช้ได้ง่าย และสามารถสร้างแรงกระตุ้นต่อผู้สูงอายุได้และดูแลรักษาง่าย เป็นต้น (ไตรรัตน์, 2553)

3. **ระยะที่ 3** การประเมินรูปแบบการพัฒนารูปแบบการจัดการด้านสิ่งแวดล้อมเพื่อผู้สูงอายุ ผลการสนทนากลุ่มพบว่า ผู้เชี่ยวชาญ ร้อยละ 100 มีความพึงพอใจในรูปแบบการจัดการด้านสิ่งแวดล้อมเพื่อผู้สูงอายุ ในระดับมากขึ้นไป และมีความพึงพอใจโดยรวมมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.78 สอดคล้องกับการศึกษาของสมุสลิ เอี่ยมสมัย รัตนา เหมือนสิทธิ์ และจรรยาศรี ทองมาก (2555) พบว่าผลการนำแบบประเมินการพัฒนารูปแบบการจัดการด้านสิ่งแวดล้อมเพื่อผู้สูงอายุโดยการมีส่วนร่วมแบบบูรณาการของครอบครัวและชุมชนในเขตอำเภอเมือง จังหวัดมหาสารคาม ปรับปรุงแก้ไขแล้วไปใช้ พบว่า ผู้สูงอายุที่มีความพึงพอใจ ภาพรวมอยู่ในระดับมาก

สรุปผลการวิจัย

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาสภาพแวดล้อมภายในและภายนอกบ้าน พัฒนาและประเมินรูปแบบการจัดการด้านสิ่งแวดล้อมเพื่อผู้สูงอายุ โดยการมีส่วนร่วมแบบบูรณาการของครอบครัวและชุมชนในเขตอำเภอเมือง จังหวัดมหาสารคาม สุ่มตัวอย่างจำนวน 380 คน เครื่องมือที่ใช้ในการเก็บรวบรวมข้อมูลเป็นแบบสอบถามที่จะใช้ในการสำรวจกลุ่มตัวอย่างผู้สูงอายุหรือผู้อยู่อาศัยที่พักอาศัยในครัวเรือนที่เป็นเป้าหมาย และแบบประเมินการจัดการสภาพแวดล้อมและที่พักอาศัยสำหรับผู้สูงอายุ สถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลเป็นค่าเฉลี่ย ร้อยละ ผลการศึกษาผู้สูงอายุเฉลี่ยเท่ากับ 69 ปี และผู้สูงอายุส่วนใหญ่เป็นหญิงร้อยละ 75.26 และเป็นชายร้อยละ 24.74 ลักษณะการอยู่อาศัยของผู้สูงอายุส่วนใหญ่อยู่ร่วมกับผู้อื่นร้อยละ 95.79 มีผู้ดูแลร้อยละ 97.37 และผู้สูงอายุอยู่เพียงลำพังร้อยละ 4.21 ไม่มีคนดูแลร้อยละ 2.63 ซึ่งกลุ่มผู้สูงอายุมักจะมีการเปลี่ยนแปลงทางร่างกายและจิตใจทำให้ประสบปัญหาต่อสุขภาพได้ง่าย สำหรับผลการศึกษาระดับความคิดเห็นต่อแนวคิดการจัดการสภาพแวดล้อมและที่พักอาศัยเพื่อผู้สูงอายุพบว่า ผู้สูงอายุมีระดับความคิดเห็นต่อน้ำสำหรับอุปโภคบริโภคสุขลักษณะและปลอดภัย มีระดับความพึงพอใจอยู่ในระดับมากที่สุด ($\bar{x} = 4.555$) รองลงมาคือมีน้ำสำหรับบริโภคสุขลักษณะและปลอดภัยอยู่ในระดับมากที่สุด ($\bar{x} = 4.555$) บริเวณบ้านมีแสงสว่าง (ไฟฟ้า) เพียงพออยู่ในระดับมากที่สุด ($\bar{x} = 4.532$) และคำถามที่อยู่ระดับต่ำสุด มีระดับความพึงพอใจปานกลาง คือ ชุมชนมีอุปกรณ์สำหรับออกกำลังกาย ($\bar{x} = 3.64$) ตามลำดับ

ผลการประเมินรูปแบบการพัฒนารูปแบบการจัดการด้านสิ่งแวดล้อมเพื่อผู้สูงอายุ พบว่าผู้เชี่ยวชาญ ร้อยละ 100 มีความพึงพอใจในรูปแบบการจัดการด้านสิ่งแวดล้อมเพื่อผู้สูงอายุ ในระดับมากขึ้นไป และมีความพึงพอใจโดยรวมมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.78 การนำแบบประเมินการพัฒนารูปแบบการจัดการด้านสิ่งแวดล้อมเพื่อผู้สูงอายุโดยการมีส่วนร่วมแบบบูรณาการของครอบครัวและชุมชนในเขตอำเภอเมือง จังหวัดมหาสารคามปรับปรุงแก้ไขแล้วไปใช้ พบว่า ผู้สูงอายุที่มีความพึงพอใจ ภาพรวมอยู่ในระดับมาก

ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะในการนำผลการวิจัยไปใช้

1. จัดตั้งชมรมการจัดการสภาพแวดล้อมของผู้สูงอายุในพื้นที่และสนับสนุนกิจกรรมเกี่ยวกับผู้สูงอายุ โดยการมีส่วนร่วมแบบบูรณาการของครอบครัวและชุมชน
2. ควรส่งเสริมการจัดการสภาพแวดล้อมของผู้สูงอายุ โดยการมีส่วนร่วมแบบบูรณาการของครอบครัวและชุมชนโดย จัดทำคู่มือ และวิดิทัศน์ ประกอบการจัดการสภาพแวดล้อมของผู้สูงอายุ เผยแพร่แก่หน่วยงานที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ โรงพยาบาลส่งเสริมสุขภาพตำบล สำนักงานสาธารณสุขอำเภอ สำนักงานสาธารณสุขจังหวัดตลอดจนผู้สนใจ

ข้อเสนอแนะสำหรับการทำวิจัยครั้งต่อไป

1. ควรมีการศึกษาวិชาการการจัดการสภาพแวดล้อมและที่พักอาศัยของผู้สูงอายุเฉพาะกลุ่ม ได้แก่ กลุ่มผู้สูงอายุวัยต้น กลุ่มติดบ้าน กลุ่มติดเตียงหรือกลุ่มที่แบ่งเป็นพึ่งพาผู้อื่นระดับมาก พึ่งพาผู้อื่นระดับปานกลาง ดูแลช่วยเหลือตนเองโดยเจาะเป็นประเด็นเชิงลึก ในทั้งส่วนของสภาพปัญหาและความต้องการ
2. ควรศึกษารูปแบบการจัดการสภาพแวดล้อมผู้สูงอายุ เพื่อพัฒนาสภาพแวดล้อมผู้สูงอายุที่ติดเตียงเพื่อให้เกิดรูปแบบที่มีความหลากหลาย น่าสนใจ สามารถนำไปใช้กับกลุ่มผู้สูงอายุที่ช่วยตนเองไม่ได้

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบุคลากร หน่วยงานต่างๆที่เกี่ยวข้อง รวมทั้งประชาชนทุกครัวเรือนในพื้นที่ที่ให้การสนับสนุนให้ข้อมูล และมีส่วนร่วมในการดำเนินงานวิจัยอย่างดียิ่ง งานวิจัยฉบับนี้ได้รับโอกาสจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ สถาบันวิจัยและพัฒนา และคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม ที่ได้อนุมัติทุนอุดหนุนการวิจัย อีกทั้งผู้ที่เกี่ยวข้องภายในหน่วยงานที่สนับสนุน ส่งเสริมในการดำเนินงานวิจัยฉบับนี้ล้วนด้วยดี ผู้วิจัยใคร่ขอขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี้ คุณค่าประโยชน์ทางวิชาการ และสาระความรู้อันจะส่งผลในการพัฒนาคุณภาพชีวิต คุณภาพด้านวิชาการของผู้วิจัยและผู้ที่เกี่ยวข้องของผลงานวิจัยนี้ ขอมอบคุณงามความดีนี้แด่คุณบิดามารดา ครูบาอาจารย์และผู้มีพระคุณทุกท่าน

เอกสารอ้างอิง

- จอมชัย คงณีกาญจน์, ปิยะ ศิริลักษณ์ และ ณรงค์ศักดิ์ หนูสอน. (2563). การจัดการสิ่งแวดล้อมที่เอื้อต่อสุขภาพผู้สูงอายุ. **วารสารวิทยาลัยพยาบาลบรมราชชนนีนูตรดิตถ์**, 12(1).
- ไตรรัตน์ จารุทัศน์. (2553). **คู่มือการจัดการสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมและปลอดภัยสำหรับผู้สูงอายุ** กรุงเทพฯ: สำนักส่งเสริมและพิทักษ์ผู้สูงอายุ สำนักงานส่งเสริมสวัสดิภาพและพิทักษ์เด็ก เยาวชนผู้ด้อยโอกาส คนพิการและผู้สูงอายุกระทรวงพัฒนาสังคมและความมั่นคงของมนุษย์.
- นอริณี ตะหวา และ ปวีตร ชัยวิสิทธิ์. (2559). การจัดการสภาพแวดล้อมและที่พักอาศัยสำหรับผู้สูงอายุในเขตอำเภอเมือง จังหวัดนครศรีธรรมราช. **สมาคมสถาบันอุดมศึกษาเอกชนแห่งประเทศไทยในพระราชูปถัมภ์ สมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ สยามบรมราชกุมารี**, 5(1).
- บุญชม ศรีสะอาด. (2553). **วิจัยเบื้องต้น**. พิมพ์ครั้งที่ 8. กรุงเทพฯ: สุวีริยาสาส์น.
- ปัทมา ว่าพัฒนางศ์ และ ปราโมทย์ ประสาทกุล. (2549). **ประชากรไทยในอนาคต**. <www.ipsr.mahidol.ac.th> (สืบค้นเมื่อ 20 ธันวาคม 2565).
- สำนักงานสถิติจังหวัดมหาสารคาม. (2562). **บทความเกี่ยวกับผู้สูงอายุ**. <<http://mahasarakham.nso.go.th/images/documents/others/mkm-geninfowithgis.pdf>> (สืบค้นเมื่อ 20 ธันวาคม 2565).
- Borst, H.C, Miedemaa, H.M.E., Vries, S.I., Grahama, J.M.A .and Dongena, J.E.F. (2008). Relationships between treet characteristics and perceived attractiveness for walking reported by elderly people. **Journal of Environmental Psychology**, 28, 353–361.
- Erik, R.L., Leif, M. and Anders, F. (2004). Correlates of falling during 24 h among elderly Danish community residents. **Preventive Medicine**, 39, 389–398.
- Julie, T.L. and Joseph, M.L. (2004). Falls in the elderly population. **Physical Medicine Rehabilitation Clinics of North America**, 16, 109–128.
- Lan, T.Y., Wu, S.C., Chang, W.C. and Chen, C.Y. (2009). Home environmental problems and physical function in Taiwanese older adults. **Archives of Gerontology and Geriatrics**, 49, 335–338.
- O’Meara, D.M. and Smith, R.M. (2006). The effects of unilateral grab rail assistance on the sit-to-stand performance of older aged adults. **Human Movement Science**, 25, 257–274.



การพัฒนาผลิตภัณฑ์ไส้ั่วเสริมโปรตีนจากจิ้งหรีด สำหรับนักเรียนโรงเรียนตำรวจตระเวนชายแดนฮิลมาพาร์เบิล

Development of Thai Northern Style Sausage with Protein Supplementation from Cricket for Students of Hilmarpaber Border Patrol Polic Academy

สุภาวดี สำราญ¹ ปานฤทัย พุททองศรี² ชมภูนาฏ ชมภูพันธ์³ สรินทร คุ่มเขต⁴
ชัยพลกฤษ หงส์ลัดดาพร⁵ กานต์ จันทร์ระ⁶ ยุทธศิลป์ ชัยสิทธิ์⁷

E-mail: Sumransupawadee@gmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการเสริมโปรตีนด้วยจิ้งหรีด 3 ระดับ คือ ร้อยละ 50 80 และ 100 ของน้ำหนัก ส่วนผสมทั้งหมด ต่อคุณภาพทางกายภาพ เคมี จุลินทรีย์ และประสาทสัมผัส พบว่า การเสริมโปรตีนจากจิ้งหรีดในระดับร้อยละ 100 ส่งผลต่อค่าความแข็ง (Hardness) ของไส้ั่วอย่างมีนัยสำคัญ ค่าความสว่าง (L*) ค่าสีแดง (a*) และค่าสีเหลือง (B*) ลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อระดับการเสริมโปรตีนจากจิ้งหรีดเพิ่มขึ้น ส่วนปริมาณไขมัน ความชื้น ลดลง ส่วนปริมาณเยื่อใยอาหารเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญตามอัตราส่วนของจิ้งหรีดที่เพิ่มขึ้นเช่นกัน นอกจากนี้การเสริมโปรตีนจากจิ้งหรีดร้อยละ 80 เป็นปริมาณที่เมื่อเสริมเข้าไปแล้วยังคงคุณลักษณะที่ดีของผลิตภัณฑ์ เป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนไส้ั่ว มพช. 294/2547 และมีคะแนนความชอบด้านประสาทสัมผัสอยู่ในระดับชอบถึงชอบมาก อีกทั้งไม่มีผลต่อปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมด ยีสต์และรา ส่วนอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์ไส้ั่วเสริมโปรตีนจากจิ้งหรีดร้อยละ 80 ในบรรจุภัณฑ์โพลีโพรพิลีนปิดสนิทที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส พบว่า ปริมาณความชื้นคงที่ตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา ซึ่งสอดคล้องกับค่าความแข็งระดับคงที่ในระหว่างการเก็บรักษา เมื่อนำไปถ่ายทอดเทคโนโลยีให้กับนักเรียนโรงเรียนตำรวจตระเวนชายแดนฮิลมาพาร์เบิล พบว่า ความพึงพอใจระดับมากที่สุด ($p \leq .05$)

คำสำคัญ: ไสั่ว เสริมโปรตีนจิ้งหรีด อายุการเก็บรักษา โรงเรียนตำรวจตระเวนชายแดน

Abstract

The research of this objective was to study the effect of the third level cricket protein supplement: 50%, 80% and 100% of the total weight. In terms of physical, chemical, microbial and sensory quality, it was found that adding 100% cricket protein would affect the hardness. The brightness (L *), red (a *) and yellow (B *) decreased significantly with the increase of cricket protein supplement level. Fat and water content decreased, fiber content increased significantly, and the proportion of crickets also increased. In addition, adding 80% cricket protein is a quantity that still has good characteristics when added. it maintains the good qualities of the product which reached the Community Product Standard (CPS 294/2547). and sensory preference is at a very popular level. It will not affect the total amount of microorganisms, yeast and mold. The shelf life of cricket protein is 80%. In the sealed polypropylene package at 35 °C it was found that the humidity was constant throughout the storage period. It corresponds to a constant hardness value during storage. When the technology was transferred to the students of the Hilma Park Border Patrol Police School, the highest satisfaction was found ($P \leq .05$).

Keywords: Thai northern style sausage, protein supplement, cricket, shelf life, students of Hilmarpable border patrol police academy

¹ วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเลย

² เคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเลย

^{3,4} นาฏศิลป์ คณะครุศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏ

⁵ สัตวศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเลย

⁶ วิศวกรรมจัดการการผลิต คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเลย

⁷ วิศวกรรม คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเลย

ความเป็นมาของปัญหา

จิ้งหรีดเป็นแมลงที่มีโปรตีนสูงถึง 18.6 กรัม (นันทิยา จงใจเทศ และ คณะ, 2548) สามารถนำมาแปรรูปเป็นอาหารได้หลากหลายชนิดและเป็นที่ต้องการของผู้บริโภคทั้งในและต่างประเทศ ปัจจุบันเป็นแมลงเศรษฐกิจ จากการให้ข้อมูลโดยการสัมภาษณ์ นายเชษฐา ชาวประเสริฐ นายอำเภอปากชม (2562) ที่ศึกษาความเป็นไปได้โครงการเลี้ยงจิ้งหรีดแปลงใหญ่อำเภอปากชม จังหวัดเลย พบว่า มีการส่งเสริมให้ชุมชนเลี้ยงจิ้งหรีดเป็นอาชีพหลักและอาชีพเสริม จากสภาพภูมิอากาศและภูมิประเทศทำให้จิ้งหรีดที่เลี้ยงในพื้นที่ที่มีตัวขนาดใหญ่และเจริญเติบโตได้ปริมาณสูง

โรงเรียนตำรวจตระเวนชายแดนฮิวมาพาร์เบิล เป็นโรงเรียนระดับประถมศึกษาในพื้นที่อำเภอปากชมที่ได้รับการส่งเสริมและสนับสนุนให้มีการเพาะเลี้ยงจิ้งหรีดในโรงเรียน เพื่อนำมาเป็นอาหารกลางวันให้กับนักเรียนและจำหน่ายในรูปแบบสดให้กับผู้ประกอบการและประชาชนใกล้เคียง จากการลงพื้นที่ของทีมนักวิจัยในการสำรวจโรงเรียนเพื่อวิเคราะห์แหล่งวัตถุดิบและผลผลิตทางการเกษตรที่สามารถนำมาบูรณาการการเรียนการสอนรูปแบบ Problem-based Learning โดยการนำปัญหามาเป็นตัวกระตุ้นให้ผู้เรียนเกิดการเรียนรู้ใช้ปัญหาเป็นฐานว่า “เราสามารถนำจิ้งหรีดมาเป็นเครื่องมือในการบูรณาการเรียนการสอนในแต่ละกลุ่มสาระได้อย่างไร” ในกลุ่มสาระการเรียนรู้พื้นฐานอาชีพและกลุ่มสาระทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี คณะผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหารแปรรูปที่มีส่วนผสมของจิ้งหรีดด้วยการพัฒนาผลิตภัณฑ์ที่มีส่วนผสมอาหารฟังก์ชัน (Functional Food) ซึ่งเป็นอาหารที่มีการเติมส่วนผสมใหม่หรือเพิ่มส่วนผสมที่มีอยู่แล้ว เพื่อเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการและความสามารถของกลไกในร่างกายในการดูแลสุขภาพ หรือป้องกันโรค เช่น ขนมอบ ที่มีการเพิ่มหรือเสริมสารอาหารเข้าไปเพื่อให้ขนมอบเหล่านั้นคุณค่าทางโภชนาการเพิ่มขึ้น

ไส้อั่ว เป็นอาหารพื้นบ้านภาคเหนือที่รู้จักกันดี นิยมรับประทานกับข้าวเหนียว หรือรับประทานคู่กับน้ำพริก โดยจัดเป็นไส้กรอกชนิดคดหยาบ ปัจจุบันเป็นอาหารหลักของงานชนโตก แบบพื้นเมืองล้านนาที่ใช้ต้อนรับแขกเมือง ทำมาจากเนื้อหมูบด ผสมพริกแห้ง กระเทียม ขมิ้น ข่า ใบมะกรูด หอมแดง และเครื่องปรุงรส แล้วรอกลงไปนึ่งในไต้หมูที่เกลจานบางแล้ว บิดให้เป็นท่อนพอประมาณ จากนั้นนำไปย่างให้เกรียม จะทำให้มีกลิ่นหอมชวนรับประทาน (รัตนา พรหมพิชัย, 2542) ปัจจุบันพบว่าแมลงเป็นแหล่งอาหารใหม่ของมวลมนุษยชาติ ในอนาคตอีก 30 ปีข้างหน้า โลกจะประสบกับวิกฤตการณ์ขาดแคลนอาหาร เนื่องจากจำนวนประชากรที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่พื้นที่การเกษตรสำหรับใช้ผลิตอาหารลดน้อยลงจากผลของภาวะโลกร้อน ส่งผลให้ระดับน้ำทะเลเพิ่มสูงขึ้นทุก ๆ ปี และการผลิตอาหารแบบเดิมซึ่งอยู่ในรูปแบบของฟาร์มปศุสัตว์ เช่น วัว หมู ไก่ นั้นล้วนแต่ต้องใช้ทรัพยากรทั้งพื้นที่ เวลา และปล่อยก๊าซเรือนกระจกออกมาเป็นปริมาณที่ไม่น้อย นักวิทยาศาสตร์ได้มองหาแหล่งอาหารใหม่เพื่อทดแทนเนื้อสัตว์ในรูปแบบต่าง ๆ และพบว่าแมลงคือแหล่งอาหารใหม่ที่สามารถตอบโจทย์ดังกล่าวได้เป็นอย่างดี จากการเทียบปริมาณทรัพยากรที่วัวหรือแมลงใช้ในการผลิตโปรตีน พบว่าวัวนั้นต้องใช้อาหารมากกว่าแมลงถึง 25 เท่า ใช้น้ำมากกว่า 300 เท่า และปล่อยก๊าซเรือนกระจกมากกว่า 60 เท่า นอกจากนี้เมื่อนำแมลงมาทำเป็นผง พบว่า ผงแมลง 100 กรัม ให้โปรตีนได้สูงที่สุดถึง 50-60% ของน้ำหนักรวม ในขณะที่เนื้อสัตว์ชนิดอื่นๆ ให้โปรตีนได้เพียง 30 - 40% ของน้ำหนักรวมเท่านั้น องค์การสหประชาชาติ (The United Nations) จึงได้ประกาศให้แมลงเป็น Superfood หรือ แหล่งอาหารที่มีประโยชน์และมีคุณค่าสารอาหารระดับสูง และรณรงค์ให้ประชากรในโลกหันมาบริโภคแมลงกันมากขึ้น (กรุงเทพฯธุรกิจ, 2564) ดังนั้นหากมีการพัฒนาการผลิตผลิตภัณฑ์ให้มีการเสริมโปรตีนจากจิ้งหรีดอีกทั้งยังเป็นผลิตภัณฑ์ที่คุ้นเคยได้แก่ ไส้อั่ว ให้นักเรียนโรงเรียนตำรวจตระเวนชายแดนฮิวมาพาร์เบิล ในระดับช่วงชั้นที่ 2 (ป.4-ป.6) ในกลุ่มสาระการเรียนรู้การงานพื้นฐานอาชีพ ให้สามารถเรียนรู้กระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ไส้อั่วเสริมโปรตีนจากจิ้งหรีดซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่นักเรียนสามารถทำเพื่อการบริโภคได้ง่าย อีกทั้งอาจนำไปต่อยอดเป็นผลิตภัณฑ์จำหน่ายเป็นรายได้เสริม รวมไปถึงนักเรียนมีองค์ความรู้ในด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหารและสามารถควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ให้มีความปลอดภัยทางอาหาร

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาปริมาณที่เหมาะสมของการเสริมโปรตีนจากจิ้งหรีดในไส้อั่วต่อคุณลักษณะทางกายภาพ และเคมี
2. เพื่อศึกษาอายุการเก็บรักษาและการยอมรับทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์ไส้อั่วเสริมโปรตีนจากจิ้งหรีด
3. เพื่อถ่ายทอดเทคโนโลยีการผลิตผลิตภัณฑ์ไส้อั่วเสริมโปรตีนจากจิ้งหรีดให้กับนักเรียน รร.ตชด.ฮิวมาพาร์เบิล

วิธีดำเนินการวิจัย

1. ประเภทของการวิจัย เป็นการวิจัยแบบผสมผสาน ได้แก่ วิจัยเชิงปฏิบัติการและการวิจัยเชิงคุณภาพ
2. กลุ่มเป้าหมายในการถ่ายทอดเทคโนโลยี ได้แก่ โรงเรียนตำรวจตระเวนชายแดนฮิวมาพาร์เบิล บ้านเหมืองทอง อำเภอปากชม จังหวัดเลย

3. ตัวอย่างและการเตรียมตัวอย่าง

ตัวอย่างสำหรับการทดลองเป็นจังหวัดที่เลี้ยงในพื้นที่แบบโรงเรือนระบบปิดโดยทำการศึกษาสูตรและปริมาณของจังหวัดที่มีการเสริมสารประกอบฟังก์ชันที่สกัดจากผลผลิตทางการเกษตร ที่มีผลต่อคุณลักษณะทางกายภาพ เคมี อายุการเก็บรักษา รวมถึงการประเมินผลการทดสอบด้านประสาทสัมผัส

4. เครื่องมือที่ใช้ในการเก็บข้อมูล อุปกรณ์เครื่องมือปฏิบัติการทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร และแบบประเมินผลความพึงพอใจด้านต่างๆ อาทิ การทดสอบทางประสาทสัมผัส ความพึงพอใจต่อการถ่ายทอดเทคโนโลยี

5. แผนการทดลองทางสถิติ การทดสอบทางเคมีและกายภาพมีการวางแผนการทดลองแบบ Completely Randomized Design (CRD) การทดสอบทางประสาทสัมผัสมีการวางแผนการทดลองแบบ วางแผนการทดลองแบบ Randomized Complete Block Design; RCBD เปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยวิธี Duncan’s New Multiple Range Test; DMRT ที่ระดับนัยสำคัญ 95%

6. ทำการศึกษาสูตรและปริมาณของโปรตีนจากจังหวัดที่เสริมเข้าไปในไส้ั่ว ที่มีผลต่อคุณลักษณะทางกายภาพ เคมี กำหนดปริมาณร้อยละ 50 80 และ 100 ของน้ำหนักส่วนผสมทั้งหมด โดยจังหวัดที่ใช้ในการทดลองเป็นจังหวัดที่ได้จากการเลี้ยงแบบโรงเรือนระบบปิดในโรงเรียนตำรวจตระเวนชายแดนฮิวมาพาร์เบิล อ.ปากชม จ.เลย

วิธีการศึกษา มีทั้งหมด 7 ขั้นตอนดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 การเตรียมวัตถุดิบจังหวัด นำจังหวัดที่ผ่านกระบวนการทำความสะอาด นึ่งให้สุก และบดแบบหยาบ

ขั้นตอนที่ 2 การผลิตไส้ั่วเสริมโปรตีนจากจังหวัด นำจังหวัดที่ผ่านกระบวนการในขั้นตอนที่ 1 ที่เตรียมไว้มาเสริมในไส้ั่ว โดยเสริมโปรตีนจากจังหวัดในอัตราส่วนร้อยละ 50 80 และ 100 ของน้ำหนักส่วนผสมทั้งหมด

ขั้นตอนที่ 3 การทำไส้ั่วเสริมโปรตีนจากจังหวัด ทำได้โดยผสมส่วนที่ 1 จากนั้น โขลกเครื่องแกงรวมกันให้ละเอียด ใส่เครื่องแกงลงคลุกเคล้ากับเนื้อหมูผสมกับจังหวัด โดยใช้อัตราส่วนเนื้อหมูดต่อจังหวัด จำนวน 3 สูตร ได้แก่ 50 : 50, 20 : 80, 0 : 100 จากนั้นผสมให้เข้ากันกับผักชีต้นหอมซอย ใบมะกรูดซอย คลุกเคล้าให้เข้ากันหลังจากคลุกเคล้าเรียบร้อยแล้ว मारอกใส่ไส้คอลลาเจน โดยใช้กรวยช่วยในการกรอกหมูใส่ไส้คอลลาเจนเมื่อกรอกไส้จนเต็มแล้ว มัดปากไส้ด้วยเส้นเชือกมัด นำไส้ั่วที่ได้ผลิตได้มาบรรจุในถุงสุญญากาศเก็บเพื่อศึกษาอายุการเก็บรักษา รายละเอียดสูตร แสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สูตรที่ใช้ในการคัดเลือกสูตรต้นแบบของไส้ั่วเสริมโปรตีนจากจังหวัด

ส่วนประกอบ	สูตรที่ 1 (50:50)	สูตรที่ 2 (20:80)	สูตรที่ 3 (0:100)	ส่วนประกอบ	สูตรที่ 1 (50:50)	สูตรที่ 2 (20:80)	สูตรที่ 3 (0:100)
เนื้อหมูแดง	31.5	12.6	-	ผิวมะกรูด	0.5	0.5	0.5
มันหมูแข็ง	10	10	10	รากผักชี	0.5	0.5	0.5
จังหวัด	31.5	50.4	63.0	พริกไทย	0.8	0.8	0.8
น้ำปลา	4.0	4.0	4.0	ขมิ้น	0.8	0.8	0.8
ใบมะกรูด	1.5	1.5	1.5	ข่า	1.5	1.5	1.5
พริกแห้ง	3.0	3.0	3.0	กะปิ	3.0	3.0	3.0
หอมแดง	3.0	3.0	3.0	ตะไคร้	1.0	1.0	1.0
กระเทียม	5.0	5.0	5.0	น้ำตาลทราย	0.5	0.5	0.5
ผิวมะกรูด	1.5	1.5	1.5	ผิวมะกรูด	0.5	0.5	0.5

การเตรียมจังหวัด: นำจังหวัดที่โตเต็มวัยมาต้มสุก แล้วล้างทำความสะอาดในน้ำเย็น แล้วผึ่งให้สะเด็ดน้ำ นำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เวลา 3-4 ชั่วโมง จากนั้นปั่นเป็นผงแบบหยาบด้วยเครื่องบด บรรจุในถุง PP จากนั้นที่ปิดสนิท เพื่อนำไปเป็นส่วนผสมในขั้นตอนต่อไป วิธีการเตรียมจังหวัด แสดงในภาพที่ 1 และการผลิตไส้ั่วเสริมโปรตีนจากจังหวัด ร้อยละ 80 ของน้ำหนักส่วนผสมทั้งหมด การผลิตมีลักษณะดังภาพที่ 2



ภาพที่ 1 ขั้นตอนการเตรียมจิ้งหรีด



ภาพที่ 2 ขั้นตอนการผลิตไส้อั่วที่เสริมโปรตีนจากจิ้งหรีด ร้อยละ 80

ขั้นตอนที่ 3 การศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของด้านค่าสี โดยใช้เครื่องวัดสี Hunter Lab รุ่น CX 1463 กับไส้อั่วเสริมโปรตีนจากจิ้งหรีด ร้อยละ 50, 80 และ 100 และวัดเนื้อสัมผัสของสูตรที่ได้รับการยอมรับจากการทดสอบด้านประสาทสัมผัสที่ผู้ทดสอบให้การยอมรับมากที่สุดด้วยเครื่องวัดเนื้อสัมผัส รุ่น Model TA.XT2

ขั้นตอนที่ 4 การศึกษาคุณสมบัติทางเคมี ได้แก่ ความชื้น โปรตีน ไขมัน เถ้า และเยื่อใย ของไส้อั่วเสริมโปรตีนจากจิ้งหรีด ร้อยละ 50, 80 และ 100 ของน้ำหนักส่วนผสมทั้งหมด ด้วยวิธี AOAC (2000)

ขั้นตอนที่ 5 การประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส ประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส โดยวิธี 9-point hedonic scaling ประเมินคุณภาพด้านสี กลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัสและความชอบโดยรวม ใช้ผู้ทดสอบทั่วไปที่ชอบบริโภคไส้อั่ว จำนวน 35 คน

ขั้นตอนที่ 6 การศึกษาอายุการเก็บรักษาของไส้อั่วเสริมโปรตีนจากจิ้งหรีด นำสูตรไส้อั่วเสริมโปรตีนจากจิ้งหรีด ร้อยละ 50, 80 และ 100 ของน้ำหนักส่วนผสมทั้งหมด มาบรรจุในถุงสุญญากาศ จากนั้นเก็บที่อุณหภูมิ 4-5 องศาเซลเซียส แล้วทำการทดสอบด้านค่าความแข็ง ด้วยเครื่อง texture analyzer และวิเคราะห์จำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมด ยีสต์ รา เป็นเวลา 21 วัน โดยทำการสุ่มวิเคราะห์ตัวอย่างไส้อั่วเสริมโปรตีนจากจิ้งหรีดแต่ละอัตราส่วน ทุกๆ 7 วัน

ขั้นตอนที่ 7 กระบวนการถ่ายทอดเทคโนโลยี การแปรรูปผลิตภัณฑ์ไส้อั่วเสริมโปรตีนจากจิ้งหรีดตั้งแต่เริ่มต้นขั้นตอนการคัดเลือกจิ้งหรีด การตรวจสอบคุณภาพวัตถุดิบและผลิตภัณฑ์ด้วยชุดทดสอบแบบง่าย รวมถึงการทดลองจำหน่ายเป็นผลิตภัณฑ์เด่นของโรงเรียน

ผลการศึกษา

หลังจากการเตรียมวัตถุดิบและสูตรในการผลิตไส้อ้วเสริมโปรตีนจากจิ้งหรีด โดยใช้อัตราส่วนเนื้อหมูปดต่อจิ้งหรีด จำนวน 3 สูตร ได้แก่ 50:50, 20:80, 0:100 ทำการวิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพ เคมี และอายุการเก็บรักษา

ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะทางกายภาพของไส้อ้ว ด้านค่าสีและเนื้อสัมผัส

การวัดสีของผลิตภัณฑ์ จากการทดลองนำไส้อ้วที่ผลิตได้มาทำการวัดสีด้วยเครื่องวัดสี Hunter Lab รุ่น CX ตามระบบ L*, a*, b* พบว่า ค่า L* a* และ b* จะมีค่าลดลงตามระดับการแปรรูปอัตราส่วนของการเสริมโปรตีนจากจิ้งหรีด ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์สีของไส้อ้วเสริมโปรตีนจิ้งหรีดด้วยจิ้งหรีด 3 ระดับ 50% 80% และ 100%

Crushed crickets (%)	Color		
	L*	a*	b*
50	33.89±0.11 ^c	10.15±0.39 ^c	37.57±0.16 ^c
80	20.06±0.16 ^b	8.21±0.9 ^b	30.10±0.96 ^b
100	16.24±0.16 ^a	5.29±0.11 ^a	27.16±0.41 ^a

a, b, c means from the same column with the different letters are significantly different at P < .05

การวัดเนื้อสัมผัสในผลิตภัณฑ์ จากการทดลองวัดค่าเนื้อสัมผัสของไส้อ้วเสริมโปรตีนจากจิ้งหรีด ด้วยเครื่องวัดเนื้อสัมผัส (Texture Analyzer Model TA.XT2) โดยการวัดค่าความแข็งของไส้อ้วที่มีการแปรรูปอัตราส่วนจิ้งหรีด ร้อยละ 50, 80 และ 100 โดยน้ำหนักส่วนผสมทั้งหมด แสดงในตารางที่ 3 ซึ่งพบว่า เมื่อมีการแปรรูปอัตราส่วนจิ้งหรีดมากขึ้น ทำให้ค่าความแข็งเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์เนื้อสัมผัสของไส้อ้วเสริมโปรตีนจิ้งหรีดด้วยจิ้งหรีด 3 ระดับ 50% 80% และ 100%

Texture analysis (นิวตัน)	Crushed crickets (%)		
	50	80	100
ความแข็ง	154.13 ± 19.72 ^c	124.11 ± 15.24 ^b	116.81 ± 18.59 ^a

a, b, c means from the same row with the different letters are significantly different at P < .05

ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะทางเคมี: ไส้อ้วเสริมโปรตีนจากจิ้งหรีดที่มีการแปรรูปอัตราส่วนจิ้งหรีดที่เพิ่มขึ้น มีผลให้คุณลักษณะทางเคมี ได้แก่ ความชื้น ไขมัน และเถ้า มีแนวโน้มลดลง แต่ปริมาณโปรตีนมีความใกล้เคียงกัน ส่วนปริมาณเยื่อใยเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนจิ้งหรีดเพิ่มขึ้น แสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะทางเคมีของไส้อ้วเสริมโปรตีนจิ้งหรีดจากจิ้งหรีด 3 ระดับ 50% 80% และ 100%

Crushed crickets (%)	Moisture (%)	Protein (%)	Fat (%)	Ash (%)	Fiber (%)
50	79.72±0.15 ^c	14.16±0.18 ^a	12.20±0.06 ^a	1.49±0.06 ^a	0.10±0.32 ^a
80	75.16±0.12 ^b	15.87±0.27 ^b	11.75±0.09 ^b	2.25±0.06 ^b	0.28±0.41 ^b
100	70.21±0.24 ^a	16.42±0.05 ^c	10.24±1.21 ^c	2.89±0.16 ^b	0.34±0.14 ^c

a, b, c means from the same column with the different letters are significantly different at P < .05

ns means not significantly different at P < .05

ผลการทดสอบทางด้านประสาทสัมผัส: ผลิตภัณฑ์ไส้อ้วเสริมโปรตีนจากจิ้งหรีด ที่มีการแปรรูปอัตราส่วนจิ้งหรีดที่ 3 ระดับ จากนั้นทดสอบทางด้านประสาทสัมผัส โดยใช้ผู้ทดสอบชิม จำนวน 35 คน ที่ชอบและรับประทานไส้อ้วเป็นประจำ ที่มีความพึงพอใจต่อคุณลักษณะปรากฏ สี กลิ่น รส และความชอบโดยรวม ด้วยวิธีการ 9-point hedonic scales ระดับคะแนน 1 ถึง 9 โดย 9 หมายถึง ชอบมากที่สุด คะแนน 1 หมายถึง ไม่ชอบมากที่สุด และนำข้อมูลมาทดสอบความแตกต่างของผลิตภัณฑ์ โดยวิธี Duncan's Multiple Range Test โดยโปรแกรมคำนวณทางสถิติ พบว่า การเสริมโปรตีนจากจิ้งหรีดอัตราส่วนร้อยละ 80 ได้คะแนนการยอมรับมากที่สุดคือ ผลดังแสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ผลการประเมินทางประสาทสัมผัสของไส้อ้วเสริมโปรตีนจิ้งหรีด 3 ระดับ

Crushed crickets (%)	Appearance	Color	Odor	Taste	Overall preferences
50	7.53±1.35 ^a	7.03±0.99 ^{ns}	7.77±0.37 ^a	7.47±0.16 ^a	7.17±1.25 ^a
80	8.90±0.99 ^b	7.77±0.97 ^{ns}	8.48±0.24 ^b	8.80±0.92 ^b	8.57±0.65 ^b
100	7.00±0.83 ^a	7.93±0.89 ^{ns}	7.90±0.29 ^a	7.13±1.04 ^a	7.03±0.89 ^a

a, b, c means from the same column with the different letters are significantly different at P < .05
 ns means not significantly different at P < .05

ผลการศึกษาอายุการเก็บรักษา : จากการศึกษาอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์ไส้อ้วเสริมโปรตีนจากจิ้งหรีด โดยบรรจุผลิตภัณฑ์ในถุงพลาสติกแบบสุญญากาศเก็บที่อุณหภูมิ 4-5 องศาเซลเซียส จากการนั้นทำการวิเคราะห์ คุณลักษณะทางกายภาพด้านเนื้อสัมผัส ด้านค่าความแข็ง แสดงในตารางที่ 6 พบว่า เมื่อระยะเวลาการเก็บนานขึ้นค่าความแข็งลดลง และตรวจสอบจุลินทรีย์ ยีสต์ และรา เพื่อศึกษาอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์ โดยใช้ตัวอย่างไส้อ้วเสริมโปรตีนจากจิ้งหรีดที่อัตราส่วนร้อยละ 80 ของน้ำหนักส่วนผสมทั้งหมด ซึ่งเป็นสูตรที่ผู้ทดสอบชิมให้การยอมรับมากที่สุด ทำการตรวจสอบการเสื่อมเสีย ทุกๆ 7 วัน (7 14 และ 21 วัน) แสดงในตารางที่ 7 พบว่า

ตารางที่ 6 ผลของคุณลักษณะทางกายภาพด้านค่าความแข็งของไส้อ้วเสริมโปรตีนจิ้งหรีดที่ระดับร้อยละ 80 เมื่อระยะเวลาการเก็บรักษา 0-21 วัน

Crushed crickets (%)	ความแข็ง(นิวตัน)			
	0	7	14	21
80	124.11 ± 15.24 ^a	116.74 ± 11.32 ^b	108.00±0.82 ^c	101.60±0.52 ^c

a-c means from the same row with the different letters are significantly different at P < .05

ตารางที่ 7 ผลของการวิเคราะห์จุลินทรีย์ของไส้อ้วเสริมโปรตีนจิ้งหรีดที่ระดับร้อยละ 80

Storage time (day)	Microbiological property (CFU /g)	
	Total Plate Count	Yest and Mold
0	nd	nd
7	nd	nd
14	< 10	< 10
21	< 10	< 10

nd: not detected.

การถ่ายทอดเทคโนโลยี : การถ่ายทอดเทคโนโลยีการแปรรูปไส้อ้วเสริมโปรตีนจากจิ้งหรีด เป็นลักษณะการอบรมเชิงปฏิบัติการสำหรับกับครูและนักเรียนโรงเรียนตำรวจตระเวนชายแดนฮิวมาร์พาเบิล อ.ปากชม จ.เลย จำนวน 20 คน โดยใช้สูตรไส้อ้วเสริมโปรตีนจากจิ้งหรีดอัตราส่วนร้อยละ 80 จากนั้นประเมินผลการถ่ายทอดเทคโนโลยีโดยใช้การสังเกตการมีส่วนร่วมและใช้แบบประเมินผลความพึงพอใจในการอบรม แสดงในภาพที่ 3



ภาพที่ 3 การถ่ายทอดเทคโนโลยีการแปรรูปไส้อ้วเสริมโปรตีนจิ้งหรีดสำหรับนักเรียนของโรงเรียนตำรวจตระเวนชายแดน

อภิปรายผล

จากการนำจิ้งหรีดที่เพาะเลี้ยงในโรงเรือนของโรงเรียนตำรวจตระเวนชายแดนฮิวมาพาร์เบิล อ.ปากชม จ.เลย มาผ่านกระบวนการทำให้จิ้งหรีดเป็นวัตถุดิบในการไปเป็นส่วนผสมของผลิตภัณฑ์อาหาร ได้แก่ ใส่อั่ว แล้วนำไปศึกษาผลของการเสริมโปรตีนในใส่อั่ว โดยใช้อัตราส่วนจิ้งหรีด 3 ระดับ คือ ร้อยละ 50 80 และ 100 ของน้ำหนักส่วนผสมทั้งหมด ที่มีต่อคุณภาพทางกายภาพ เคมี จุลินทรีย์ และประสาทสัมผัส พบว่า คุณลักษณะทางกายภาพด้านค่าค่าสี ด้วยเครื่องวัดสี Hunter Lab โดยใช้ระบบ L^* , a^* , b^* จะเห็นว่าเมื่อเพิ่มปริมาณจิ้งหรีดมีความสัมพันธ์กับค่าสีโดยทำให้ค่าสีของผลิตภัณฑ์ในแต่ละอัตราส่วนลดลงโดยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยมีค่า L^* , a^* , b^* ลดลงตามระดับการแปรอัตราส่วนของการเสริมโปรตีนจากจิ้งหรีดที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลต่อการลดลงของค่า L^* , a^* , b^* ทำให้ลักษณะค่าสีของใส่อั่วเข้มขึ้น อาจเนื่องจากจิ้งหรีดเป็นแมลงที่มีสีเข้มและความเหนียวมัน ส่วนการวัดค่าเนื้อสัมผัสโดยใช้เครื่องวัดเนื้อสัมผัส (Texture Analyzer model TA.XT2) พบว่า ปริมาณจิ้งหรีดที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อค่าความแข็งที่ลดลง เนื่องจากจิ้งหรีดมีปริมาณเส้นใยอาหารประเภทไคตินสูงเมื่อผ่านความร้อนจะเกิดเป็นสารเจลสามารถลดแรงตึงผิว ซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลของศูนย์เฝ้าระวังกรมสนเทศ คณะเภสัชศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ (2565) กล่าวว่าคุณสมบัติสำคัญอย่างหนึ่งของไคติน คือ การเพิ่มความยืดหยุ่นให้กับผลิตภัณฑ์ที่แปรรูปจากเนื้อสัตว์ และเกิดกลิ่นรสรวมถึงเนื้อสัมผัสที่ดี โดยเกิดการเคลือบเป็นแผ่นฟิล์มที่สามารถป้องกันการซึมผ่านของออกซิเจนในอากาศ การเปลี่ยนสีของผลิตภัณฑ์ และป้องกันการปนเปื้อนจากจุลินทรีย์ จากการศึกษาคุณลักษณะทางเคมีของผลิตภัณฑ์ใส่อั่วเสริมโปรตีนจากจิ้งหรีด พบว่า ปริมาณโปรตีนเยื่อใย และเถ้าสูงขึ้น เมื่อการเสริมอัตราส่วนของจิ้งหรีดมากขึ้นดังนั้นหากต้องการเสริมปริมาณโปรตีนในอาหารจิ้งหรีดจึงเป็นวัตถุดิบที่สามารถทดแทนโปรตีนจากเนื้อสัตว์อื่นๆ ในผลิตภัณฑ์อาหารได้ สอดคล้องกับการศึกษาของ อิศารัตน์ พันโท (2563) พบว่า โปรตีนของแมลงกินได้มีคุณภาพสูงเมื่อเปรียบเทียบกับโปรตีนจากพืชและสัตว์ นอกจากนี้ปริมาณโปรตีนสูงแล้วยังมีกรดอะมิโน จำเป็นครบถ้วนสำหรับมนุษย์ดังนั้นการนำแมลงไปใช้สำหรับเป็นอาหารจึงน่าจะสามารถช่วยเพิ่มคุณค่าทางอาหารได้อีกทางหนึ่ง ในขณะที่ความชื้นและปริมาณไขมันลดลง เนื่องจากในจิ้งหรีดมีไขมันน้อยกว่าเนื้อหมู (กองโภชนาการกรมอนามัย, 2530) จากการศึกษาคุณลักษณะทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์ พบว่า เมื่อมีการเสริมโปรตีนจากจิ้งหรีดอัตราส่วนร้อยละ 80 มีคะแนนการยอมรับมากที่สุด ทั้งลักษณะปรากฏ สี กลิ่น รส และความชอบโดยรวม และแตกต่างจากสูตรอื่นๆอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 จากการศึกษาอายุการเก็บรักษาโดยใช้ตัวอย่างใส่อั่วเสริมโปรตีนจากจิ้งหรีดที่อัตราส่วนร้อยละ 80 ของน้ำหนักส่วนผสมทั้งหมด ซึ่งเป็นสูตรที่ผู้ทดสอบชิมให้การยอมรับมากที่สุดไว้ในถุงพลาสติกชนิดโพลีโพรพิลีน (PP) โดยบรรจุแบบสุญญากาศ เป็นเวลา 21 วัน ที่อุณหภูมิ 4-5 องศาเซลเซียส จากนั้นวัดเนื้อสัมผัส (ความแข็ง) และอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ โดยตรวจสอบการเสื่อมเสียที่เกิดจากจุลินทรีย์ ทุกๆ 7 วัน พบว่า ค่าความแข็ง (hardness) ลดลง แสดงถึงใส่อั่วที่มีการเกาะตัวของเนื้อสัมผัสลดลง เนื่องจากระยะเวลาการเก็บรักษาที่นานขึ้นแม้จะอยู่ในสภาวะบรรจุสุญญากาศและอุณหภูมิต่ำ เมื่อทำการวัดค่าความแข็ง พบว่า ความแข็งลดลงในระหว่างการเก็บรักษา ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยเรื่องผลของปริมาณจิ้งหรีดต่อคุณภาพทางเนื้อสัมผัส คุณภาพทางประสาทสัมผัสและคุณค่าทางโภชนาการของบราวนี่ฟลาวมันส์สำหรับหลัง (สุพธิดา สุเต็น และคณะ, 2564) ค่าความแข็งที่ลดลงจะแปรผันตามการตรวจพบจุลินทรีย์เมื่อระยะเวลาในการเก็บเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเจริญของจุลินทรีย์ ยีสต์ และรา จะเจริญเติบโตได้ดีถ้าในผลิตภัณฑ์นั้นมีน้ำเป็นองค์ประกอบ (สุมาลี เหลืองสกุล, 2535) อีกทั้งในผลิตภัณฑ์ที่มีการเพิ่มอัตราส่วนของจิ้งหรีดไปทดแทนเนื้อหมูทำให้ปริมาณไขมันลดต่ำลง การลดปริมาณไขมันในผลิตภัณฑ์ส่งผลต่อการยืดอายุการเก็บรักษา (โสมศิริ สมถวิล, 2555) แต่อย่างไรก็ตามระยะเวลาการเก็บรักษาที่ 21 วัน แม้จะตรวจพบปริมาณจุลินทรีย์ ยีสต์ และรา แต่ยังไม่เกินค่ามาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน (มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2544) กำหนดไว้ว่าจำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมด ต้องน้อยกว่า 1×10^4 โคโลนีต่อตัวอย่าง 1 กรัม และยีสต์และรา ต้องน้อยกว่า 100 โคโลนีต่อตัวอย่าง 1 กรัม (มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2555) เมื่อดำเนินการในห้องปฏิบัติการแล้ว จึงนำไปถ่ายทอดเทคโนโลยีการแปรรูปใส่อั่วเสริมโปรตีนจากจิ้งหรีดให้กับครูและนักเรียนโรงเรียนตำรวจตระเวนชายแดนฮิวมาพาร์เบิล พบว่า ความพึงพอใจอยู่ในระดับมากที่สุด

สรุปผลการวิจัย

การพัฒนาสูตรใส่อั่วเสริมโปรตีนจากจิ้งหรีด ที่ระดับร้อยละ 80 ของน้ำหนักส่วนผสมทั้งหมด ได้รับการยอมรับจากผู้บริโภคในระดับ ชอบมากที่สุด เมื่อทำการเสริมโปรตีนจากจิ้งหรีดในใส่อั่ว พบว่า คุณลักษณะทางกายภาพ ด้านค่าสี ค่า L^* a^* และ b^* จะมีค่าลดลงตามระดับการแปรอัตราส่วนของการเสริมโปรตีนจากจิ้งหรีด และค่าความแข็งของใส่อั่วที่มีการแปรอัตราส่วนจิ้งหรีด ร้อยละ 50 80 และ 100 โดยน้ำหนักส่วนผสมทั้งหมด พบว่า เมื่อมีการแปรอัตราส่วนจิ้งหรีดมากขึ้น ทำให้ค่าความแข็งลดลง ส่วนคุณลักษณะทางเคมี พบว่า ความชื้น ไขมัน มีแนวโน้มลดลง แต่ปริมาณโปรตีน ปริมาณเยื่อใย และเถ้า เพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนจิ้งหรีดเพิ่มขึ้น อีกทั้งคุณลักษณะทางจุลินทรีย์และประเมินการศึกษาอายุการเก็บรักษาของใส่อั่วเสริมโปรตีนจากจิ้งหรีดด้วยการ

วิเคราะห์ค่าความแข็ง ผลการทดสอบทางจุลินทรีย์ พบว่า ใส่อ้วเสริมโปรตีนจากจิ้งหรีดที่เก็บภายใต้อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส ในบรรจุภัณฑ์แบบสุญญากาศ ที่มีอายุการเก็บรักษาที่ 21 วัน ถึงแม้ว่าจะตรวจพบปริมาณจุลินทรีย์ ยีสต์ และรา แต่ยังมีปริมาณการตรวจพบไม่เกินที่มาตรฐานกำหนด จากนั้นเมื่อนำไปถ่ายทอดเทคโนโลยีให้กับนักเรียนโรงเรียนตำรวจตระเวนชายแดนฮิลมาพาร์เบิล พบว่า ความพึงพอใจระดับมากที่สุด ($p \leq .05$)

ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะในการนำผลการวิจัยไปใช้

การทดลองนี้มีการใช้จิ้งหรีดที่เลี้ยงในโรงเรือนระบบปิดที่มีความสะอาดและปลอดภัย เพิ่มสมุนไพรและเครื่องเทศในส่วนผสมเพื่อทำให้มีกลิ่นหอมของสมุนไพรช่วยเพิ่มรสชาติให้ชวนรับประทานมากยิ่งขึ้นด้วย ทำให้ผลิตภัณฑ์มีคุณประโยชน์ต่อร่างกาย มีคุณค่าทางโภชนาการ มีความเป็นไปได้ที่จะนำผลิตภัณฑ์ใส่อ้วเสริมโปรตีนจากจิ้งหรีดมาประกอบอาชีพเพื่อเพิ่มรายได้เสริมและเป็นทางเลือกในการบริโภคอาหารแก่ผู้บริโภคอีกด้วย

ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยครั้งต่อไป

ควรศึกษาและพัฒนาใส่อ้วเสริมโปรตีนจากจิ้งหรีดในบรรจุภัณฑ์รูปแบบอื่น เพื่อให้สามารถเก็บไว้นานยิ่งขึ้นและควรศึกษาหาวัตถุดิบสมุนไพรที่เป็นอัตลักษณ์ในพื้นที่เพื่อเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการเป็นทางเลือกเพิ่มมูลค่าแก่ผลิตภัณฑ์ในท้องตลาดด้วย

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณกองทุนเพื่อความเสมอภาคทางการศึกษา (กสศ.) ที่สนับสนุนงบประมาณในการดำเนินโครงการ ทำให้คณะผู้วิจัยได้มีโอกาสในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ที่เป็นอัตลักษณ์ของโรงเรียนตำรวจตระเวนชายแดนฮิลมาพาร์เบิล โดยการใช้วัตถุดิบที่ผลิตได้จากโรงเรียนให้เกิดประโยชน์สูงสุด

เอกสารอ้างอิง

- AOAC. (2000). *Official Method of Analysis of AOAC International*. (17th ed). Washington D.C., USA: The Association of Official Analytical Chemists.
- กรุงเทพธุรกิจ. (2564). แผลง"อาหารโปรตีนชั้นดีที่ชาวโลกยอมรับ. <<https://bangkokbiznews.com>> (สืบค้นเมื่อ 23 เมษายน 2565).
- ธิดารัตน์ พันโท. (2563). แผลงกินได้ คุณค่าทางโภชนาการ และการแปรรูปเพื่อนำไปใช้ประโยชน์. <<https://kukr.lib.ku.ac.th>> (สืบค้นเมื่อ 24 ธันวาคม 2565).
- นันทิยา จงใจเทพ, พิมพร วัชรารักษ์กุล, ปิยนันท์ เผ่าม่วง และ เพ็ญพโยม ประภาศิริ. (2548). คุณภาพโปรตีนและไขมันในแผลงที่กินได้. *วารสารโภชนาการ*, 40(1), 11-17.
- รัตนา พรหมพิชัย. (2542). ใส่อ้ว. ใน *สารานุกรมวัฒนธรรมไทย ภาคเหนือ* (เล่ม 14, หน้า 7257). กรุงเทพฯ: มูลนิธิสารานุกรมวัฒนธรรมไทย ธนาคารไทยพาณิชย์.
- ศูนย์เภสัชกรรมสนเทศคณะเภสัชศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. *โคโตซาน*. <<http://drug.pharmacy.psu.ac.th>> (สืบค้นเมื่อ 24 ธันวาคม 2565).
- สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม. (2544). *มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนใส่อ้ว 2547*. <<http://www.app.tsi.go.th>>. (สืบค้นเมื่อ 20 เมษายน 2562).
- สุทธิดา สุเต็น, นันทยง เพ็ญขจรพิง, ปัทมา หิรัญญูภาส, จิราพร วิญญุตตานนท์ และธิดารัตน์ แสนพรหม. (2564). ผลของปริมาณผงจิ้งหรีดต่อคุณภาพทางเนื้อสัมผัส คุณภาพทางประสาทสัมผัสและคุณค่าทางโภชนาการของบราวนี่ฟลาวมันส์สำหรับหลัง. *PBRU SCIENCE JOURNAL*, 18(1), 42-51.
- สุมาลี เหลืองสกุล. (2535). *จุลชีววิทยาทางอาหาร*. (พิมพ์ครั้งที่ 2). ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ.
- โสมศิริ สมถวิล. (2555). *การพัฒนาใส่อ้วลดไขมันและยืดอายุการเก็บรักษา*. เชียงใหม่: คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

ผู้ให้ข้อมูลสัมภาษณ์

เชษฐา ขาวประเสริฐ. นายอำเภอปากชม (17 กรกฎาคม 2562). สัมภาษณ์.

ปัจจัยที่ส่งผลต่อคุณภาพชีวิตของผู้สูงอายุ
โดยการมีส่วนร่วมแบบบูรณาการของครอบครัวและชุมชน จังหวัดมหาสารคาม
Factors Affecting the Quality of Life of the Elderly
by the Integrated Participation of Family and Community at Maha Sarakham Province

อรนุช วงศ์วัฒนาเสถียร^{1*} มณฑิรา จันทร์ทาวรี² อนุวัติ ชัยเกียรติธรรม³ ปิยะณัฐภูมิ จันทร์ทาวรี⁴
กิจปพน ศรีธานี⁵ วรวิภา ตรีสุนย์⁶ ณิชฎะณูการ์ บรรเทา⁷

E-mail: nitaya.bu@rmu.ac.th

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษา พฤติกรรม และปัจจัยที่ส่งผลต่อคุณภาพชีวิตของผู้สูงอายุ โดยการมีส่วนร่วมแบบบูรณาการของครอบครัวและชุมชน จังหวัดมหาสารคาม เป็นวิจัยเชิงปริมาณ โดยใช้แบบสอบถาม กลุ่มตัวอย่างคือ ผู้สูงอายุ 60 ปีขึ้นไป จำนวน 216 คน ได้จากการสุ่มตัวอย่างอย่างง่าย โดยใช้สถิติความถี่ ร้อยละ ค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน Spearman rank correlation coefficient และ Pearson correlation coefficient ผลการวิจัย พบว่า ผู้สูงอายุ ส่วนใหญ่มีระดับคุณภาพชีวิตโดยรวม อยู่ในระดับคุณภาพชีวิตปานกลาง ($\bar{X} = 87.88$, S.D.= 5.47) เมื่อพิจารณาเป็นรายด้านพบว่า ด้านร่างกาย ($\bar{X} = 23.44$, S.D.= 2.22) อยู่ในระดับคุณภาพชีวิตปานกลาง ด้านจิตใจ ($\bar{X} = 21.62$, S.D.= 2.00) อยู่ในระดับคุณภาพชีวิตปานกลาง ด้านสัมพันธภาพทางสังคม ($\bar{X} = 11.94$, S.D.= 1.99) อยู่ในระดับคุณภาพชีวิตดี และด้านสิ่งแวดล้อม ($\bar{X} = 30.87$, S.D.= 3.24) อยู่ในระดับคุณภาพชีวิตที่ดี การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของสเปียร์แมน พบว่า ความรู้มีความสัมพันธ์ทางบวกกับคุณภาพชีวิตของผู้สูงอายุในระดับน้อย อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 ด้วยค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ 0.25 (p-value <.001) กล่าวคือ ความรู้มีความสัมพันธ์กับคุณภาพชีวิตของผู้สูงอายุ ผลวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของเพียร์สัน พบว่า พฤติกรรมมีความสัมพันธ์ทางบวกกับคุณภาพชีวิตของผู้สูงอายุในระดับน้อยมาก อย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 ด้วยค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ .05 (p = 0.389) กล่าวคือ พฤติกรรมไม่มีความสัมพันธ์กับคุณภาพชีวิตของผู้สูงอายุ

คำสำคัญ: คุณภาพชีวิต ผู้สูงอายุ การบูรณาการครอบครัวและชุมชน

Abstract

The purpose of this research was to study behaviors and factors affecting the quality of life of the elderly by the integrated participation of family and community at Maha Sarakham Province. The research was a quantitative research using a questionnaire. The sample group consisted of 216 elderly people aged 60 years. The statistic used were frequency, percentage, mean, standard deviation, Spearman rank correlation coefficient and Pearson correlation coefficient. The results showed that most of the elderly had overall quality of life at the moderate level ($\bar{X} = 87.88$, S.D.= 5.47). When considered individually, it was found that the physical aspect ($\bar{X} = 23.44$, S.D.= 2.22) was moderate quality of life. Mental aspect ($\bar{X} = 21.62$, S.D.= 2.00) was moderate quality of life. Social relations aspect ($\bar{X} = 11.94$, S.D.= 1.99) was at the level of good quality of life. And environment aspect ($\bar{X} = 30.87$, S.D.= 3.24) was at the level of good quality of life. Spearman's correlation analysis, it was found that knowledge had a positive correlation with the quality of life of the elderly at a low level. There was a statistical significance at the .05 level with a correlation coefficient of 0.25 (p-value <.001), that is, knowledge was related to the quality of life of the elderly. Pearson's correlation analysis, it was found that behavior had a very low level of positive correlation with the quality of life of the elderly. There was no statistical significance at the .05 level with a correlation coefficient of .05 (p = 0.389), that is, the behavior had no relationship with the quality of life of the elderly.

Keywords: quality of life, the elderly, family and community integration

^{1,2,5,6} อาจารย์ประจำสาขาวิชาสาธารณสุขชุมชน คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม

³ อาจารย์ประจำสาขาวิชาภาษาอังกฤษ คณะมนุษยศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม

⁴ อาจารย์ประจำวิทยาลัยการสาธารณสุขสิรินธร จังหวัดอุบลราชธานี คณะสาธารณสุขศาสตร์และสหเวชศาสตร์ สถาบันพระบรมราชชนก

⁷ Co-responding อาจารย์ประจำสาขาวิชาสถิติศาสตร์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม

ความเป็นมาของปัญหา

“ผู้สูงอายุ” เป็นกลุ่มประชากรที่มีจำนวนเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องทั่วโลก โดยจากข้อมูลขององค์การอนามัยโลกและองค์การสหประชาชาติพบว่า ประชากรผู้สูงอายุจะมีจำนวนเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วโดยสัดส่วนของประชากรผู้สูงอายุทั่วโลกที่มีอายุ 60 ปีขึ้นไปจะเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่าตัวในช่วงปี ค.ศ. 2013-2050 (World Health Organization, 2017; United Nations, 2013) ส่วนในประเทศไทยจากสถิติในปี พ.ศ. 2560 มีประชากรสูงอายุคิดเป็นร้อยละ 17 ของประชากรทั้งหมด ซึ่งจังหวัดมหาสารคาม เป็นจังหวัดหนึ่งที่มีอัตราผู้สูงอายุ 5 อันดับแรก โดยมีอัตราร้อยละ 24.40 ซึ่งจัดว่าเป็นสังคมผู้สูงอายุอย่างสมบูรณ์แล้ว จึงมีแนวทางในการดำเนินการด้านผู้สูงอายุตามแผนพัฒนาจังหวัดมหาสารคาม 4 ปี (2561 - 2564) ในประเด็นยุทธศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาทรัพยากรมนุษย์ ยุทธศาสตร์ที่ 4 ระบุว่า การเสริมสร้างและพัฒนาคุณภาพชีวิตของประชาชน และสังคมมหาสารคามให้เป็นสังคมแห่งการเรียนรู้มีความเข้มแข็ง มีภูมิคุ้มกันสามารถดำรงชีวิตตามหลักปรัชญาของเศรษฐกิจพอเพียง มีเป้าประสงค์เชิงยุทธศาสตร์ว่า ประชาชนมีโอกาสทางสังคม มีภูมิคุ้มกัน ช่วยเหลือตนเองได้ โดยเน้นการขับเคลื่อนในมิติการพัฒนา ป้องกัน ในลักษณะการสร้างโอกาส พร้อมกับเสริมศักยภาพไปที่ตัวคน ครอบครัวและชุมชน (สำนักงานจังหวัดมหาสารคาม, 2563)

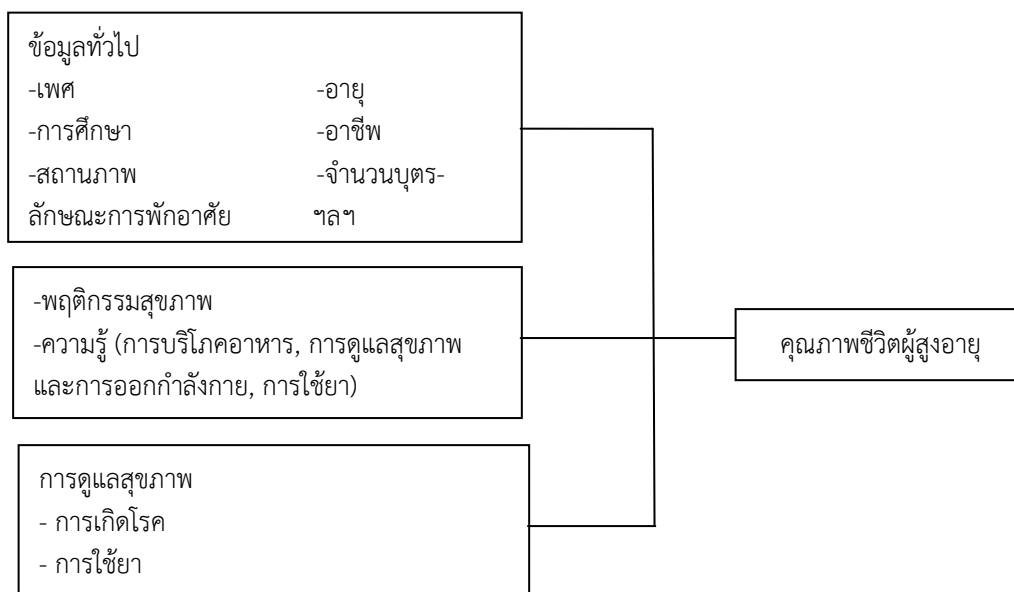
โดยคุณภาพชีวิตเป็นปัจจัยสำคัญที่เกี่ยวข้องกับระดับของการมีชีวิตที่ดีและการมีสุขภาพที่ดีทั้งในด้านร่างกาย สุขภาพจิต อารมณ์และการอยู่ร่วมกับผู้อื่นในสังคมของบุคคล (Baernholdt, Hinton, Yan, Rose, & Mattos, 2012) ดังนั้นการศึกษาเกี่ยวกับคุณภาพชีวิตของบุคคลจึงได้รับความสนใจเพิ่มมากขึ้นโดยเฉพาะอย่างยิ่งในกลุ่มผู้สูงอายุ โดยปัจจัยหนึ่งที่สำคัญต่อคุณภาพชีวิตของผู้สูงอายุ คือ การมีความสัมพันธ์อันดีกับครอบครัว เพื่อน และบุคคลใกล้ชิด เป็นปัจจัยที่นำไปสู่การมีคุณภาพชีวิตที่ดีของผู้สูงอายุ โดยความสัมพันธ์อันดีนั้นจะเกิดขึ้นจากการที่ผู้สูงอายุรับรู้ถึงความเชื่อมโยงระหว่างตนเองกับเครือข่ายทางสังคมของตนและมีความรู้สึกว่าเป็นส่วนหนึ่งของกลุ่ม ได้รับความรักและการยอมรับจากบุคคลอื่น ตลอดจนได้รับความเคารพและมีคุณค่ากับบุคคลอื่น (Fu, Anderson, Courtney, & Hu, 2007)

จากสถานการณ์ปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลต่อคุณภาพชีวิตของผู้สูงอายุเพิ่มมากขึ้นดังที่กล่าวมา ผู้วิจัยจึงสนใจที่จะศึกษาปัจจัยปัจจัยที่ส่งผลต่อคุณภาพชีวิตผู้สูงอายุ อาศัยการมีส่วนร่วมแบบบูรณาการของครอบครัวและชุมชน จังหวัดมหาสารคาม โดยมีเป้าหมาย เพื่อให้ผู้สูงอายุมีคุณภาพชีวิตที่ดีขึ้น อีกทั้งบุคคลในครอบครัวมีพฤติกรรมสุขภาพและการดูแลสุขภาพเพิ่มขึ้น อันจะเป็นการส่งเสริมสู่การเตรียมความพร้อมสำหรับสังคมผู้สูงอายุ และช่วยลดภาระกิจในการดูแลสุขภาพผู้สูงอายุให้กับภาครัฐอีกทางหนึ่งด้วย

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาพฤติกรรมโดยการมีส่วนร่วมแบบบูรณาการของครอบครัวและชุมชน
2. เพื่อศึกษาระดับคุณภาพชีวิตของผู้สูงอายุโดย ด้วยการมีส่วนร่วมแบบบูรณาการของครอบครัวและชุมชน
3. เพื่อศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อคุณภาพชีวิตของผู้สูงอายุโดยการมีส่วนร่วมแบบบูรณาการของครอบครัวและชุมชน

กรอบการวิจัย



วิธีดำเนินการวิจัย

1. ด้านประชากร (Population) คือ ผู้ที่มีอายุ 60 ปี ขึ้นไป ของจังหวัด มหาสารคาม จำนวน 70,067 คน (สำนักงานสถิติจังหวัดมหาสารคาม, 2563)
2. กลุ่มตัวอย่าง (Sample) ผู้ตอบแบบสอบถามเลือกตัวอย่าง แบบแบ่งสัดส่วนตามการแบ่งเขตพื้นที่ เป็นผู้สูงอายุ 60 ปีขึ้นไป จำนวน 216 คน โดยใช้สูตร ของ Krejcie and Morgan (Krejcie, R. V. & Morgan, D. W., 1970) และสุ่มตัวอย่างอย่างง่าย
3. ด้านเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย คือ สร้างแบบสอบถามโดยใช้ทฤษฎีจากกรอบแนวคิดต่าง ๆ ซึ่งให้ผู้เชี่ยวชาญ จำนวน 3 ท่าน ตรวจสอบความถูกต้องและครอบคลุมเนื้อหา แล้วนำไปหาค่าความเที่ยงตรงโดยการหาค่าดัชนี ความสอดคล้อง IOC มีค่าไม่ต่ำกว่า 0.50 - 1.00 (บุญชม ศรีสะอาด, 2556) ความ เชื่อมั่นสัมประสิทธิ์แอลฟา (Cronbach, L. J., 1990) เท่ากับ 0.96 แบบสอบถามแบ่งเป็น 4 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 ข้อมูลทั่วไป จำนวน 14 ข้อ ,ส่วนที่ 2 พฤติกรรมสุขภาพของผู้สูงอายุ จำนวน 8 ข้อ, ส่วนที่ 3 ความรู้ ส่วนที่ 4 การเกิดโรค, ส่วนที่ 5 คุณภาพชีวิต ได้นำเครื่องชี้วัดคุณภาพชีวิตขององค์การอนามัยโลกชุดย่อ ฉบับภาษาไทย (WHOQOL-BREF-THAI) มาใช้เป็นแบบสอบถามคุณภาพชีวิตของผู้สูงอายุจำนวน 26 ข้อ

ผลการวิจัย

ส่วนที่ 1 ข้อมูลทั่วไป

ตารางที่ 1 แสดงจำนวนร้อยละของกลุ่มตัวอย่างด้านข้อมูลทั่วไป (n = 216)

ข้อมูลทั่วไป	จำนวน	ร้อยละ
1. เพศ		
ชาย	80	37.00
หญิง	136	63.00
2. อายุ (ปี)		
60 - 69	83	38.42
70 - 79	70	32.41
80 - 89	59	27.31
90 ปีขึ้นไป	4	1.86
3. ระดับการศึกษา		
ประถมศึกษา หรือต่ำกว่า	191	88.40
มัธยมศึกษาตอนต้น	7	3.20
มัธยมศึกษาตอนปลาย / ปวช.	9	4.20
อนุปริญญา / ปวส.	4	1.90
ปริญญาตรี	5	2.30
4. อาชีพ		
เกษตรกร	89	41.20
รับจ้างทั่วไป	27	12.50
ค้าขาย/ธุรกิจส่วนตัว	10	4.60
รับราชการ / รัฐวิสาหกิจ	4	1.90
อยู่บ้านไม่ได้มีอาชีพ/ทำงานบ้าน	86	39.80
5. แหล่งที่มาของรายได้ (ตอบได้มากกว่า 1 ข้อ) [ประกอบอาชีพของตนเอง]		
ไม่ใช่	143	66.20
ใช่	73	33.80
7. ศาสนา		
พุทธ	216	100.0

ตารางที่ 1 (ต่อ)

ข้อมูลทั่วไป	จำนวน	ร้อยละ
8. สถานภาพสมรส		
โสด	14	6.50
อยู่กับคู่สมรส	141	65.30
แยกกันอยู่	3	1.40
หม้าย	52	24.10
หย่าร้าง	6	2.80
9. จำนวนบุตร		
ไม่มี	17	7.90
มี	199	92.10
10. ลักษณะการพักอาศัย		
อยู่ลำพัง	16	7.40
อยู่ร่วมกับผู้อื่น	200	92.60
11. อยู่ร่วมกับผู้อื่น จำนวนคนในบ้านที่คน เป็นใครบ้าง		
1 – 3 คน	145	67.10
4 – 6 คน	55	25.50
7 – 9 คน	16	7.40
11.1 บุตรสาว/ชาย ที่คน		
ไม่มี	119	55.10
1	68	31.50
2	26	12.00
3	3	1.40
11.2 ลูกเขย/ลูกสะใภ้ ที่คน		
ไม่มี	176	81.50
1	35	16.20
2	4	1.90
4	1	0.50
11.3 หลานที่คน		
ไม่มี	135	62.50
1	41	19.00
2	31	14.40
3	8	3.70
4	1	.5
11.4 อยู่ร่วมกับคู่สมรสหรือไม่		
ไม่อยู่ร่วม	75	34.7
อยู่ร่วม	141	65.3
11.5 อยู่ร่วมกับผู้อื่น โปรตรระบุ		
ไม่มี	211	97.7
1	3	1.4
2	2	.9

ตารางที่ 1 (ต่อ)

ข้อมูลทั่วไป	จำนวน	ร้อยละ
12. สถานภาพในบ้าน		
เจ้าบ้าน	141	65.3
ผู้อาศัย	75	34.7
13. ผู้ดูแล		
ไม่มี	10	4.6
มี	206	95.4
14. พื้นที่ที่ผู้สูงอายุใช้เวลามากที่สุด		
ห้องนอน	8	3.7
ห้องนั่งเล่น	39	18.1
ห้องครัว	1	0.5
นอกชาน	137	63.4
ในสวน	10	4.6
กระต๊อบ	15	6.9
ที่ทำงาน	4	1.9
ได้ร่มไม้	2	0.9

จากตารางที่ 1 พบว่ากลุ่มตัวอย่างส่วนใหญ่เป็นเพศหญิง คิดเป็นร้อยละ 63.00 อายุอยู่ระหว่าง 60 – 69 ปี คิดเป็นร้อยละ 38.42 การศึกษาอยู่ในระดับประถมศึกษา คิดเป็นร้อยละ 88.40 อาชีพคือเกษตรกร คิดเป็นร้อยละ 41.20 ลักษณะการพักอาศัยอยู่ร่วมกับผู้อื่น คิดเป็นร้อยละ 92.60

ส่วนที่ 2 พฤติกรรมสุขภาพของผู้สูงอายุ

ตารางที่ 2 แสดงจำนวนร้อยละของกลุ่มตัวอย่างด้านพฤติกรรมสุขภาพของผู้สูงอายุ (n = 216)

พฤติกรรมสุขภาพของผู้สูงอายุ	จำนวน	ร้อยละ
1. ปกติท่านออกกำลังกายโดยวิธีอะไร		
ไม่ออกกำลังกาย	40	18.50
ออกกำลังกาย	176	81.50
(ตอบได้มากกว่า 1 คำตอบ)		
1.1 ออกกำลังกาย [เดิน]	146	67.60
1.2 ออกกำลังกาย [ยืดเหยียด]	68	31.50
1.3 ออกกำลังกาย [แกว่งแขน]	52	24.10
1.4 ออกกำลังกาย [ไท้ชี่กง/ไทเก๊ก/มวยจีน/โยคะ]	1	0.50
1.5 ออกกำลังกาย [ไม้พองป่าบุญมี]	1	0.50
1.5 ออกกำลังกาย [ยางยืด]	1	0.50
1.6 ออกกำลังกาย [ตารางเก้าช่อง]	0	0
1.7 ออกกำลังกาย [วิ่ง]	10	4.60
1.8 ออกกำลังกาย [ปั่นจักรยาน]	18	8.30
2. ท่านรับประทานผักวันละกี่ทัพพี		
ไม่รับประทาน	1	0.50
ไม่เกิน 20 คำ	108	50.00
21-40 คำ	101	46.80
มากกว่า 40 คำ	6	2.80

ตารางที่ 2 (ต่อ)

พฤติกรรมสุขภาพของผู้สูงอายุ	จำนวน	ร้อยละ
3. ท่านแปรงฟันก่อนนอนหรือไม่		
ไม่แปรง เพราะไม่มีฟันแท้เหลือ	40	18.50
แปรงฟันก่อนนอนบ้าง ไม่แปรงบ้าง เป็นบางวัน	55	25.50
แปรงฟันก่อนนอนทุกวัน	121	56.00
4. ท่านสูบบุหรี่ หรือยาเส้นหรือไม่		
ไม่เคยสูบ	188	87.00
เคยสูบแต่เลิกแล้ว	7	3.20
ยังสูบบุหรี่จนถึงปัจจุบัน	21	9.70
5. ปัจจุบันท่านดื่มเครื่องดื่มแอลกอฮอล์หรือไม่		
ไม่ดื่ม	168	77.80
ดื่มเฉพาะเทศกาลหรือวันพิเศษ	36	16.70
ดื่มเป็นประจำ	12	5.60
6. ใน 1 สัปดาห์ที่ผ่านมา ท่านนอนหลับโดยส่วนใหญ่คืนละกี่ชั่วโมง		
น้อยกว่า 5 ชั่วโมง/คืน	16	7.40
5 - 6 ชั่วโมง/คืน	81	37.50
7 - 8 ชั่วโมง/คืน	119	55.10
7. ท่านดื่มน้ำอย่างต่ำ 8 แก้ว/วัน บ่อยแค่ไหนในหนึ่งสัปดาห์		
1-3 วัน ในหนึ่งสัปดาห์	2	0.90
4-6 วัน ในหนึ่งสัปดาห์	78	36.10
7 วัน ในหนึ่งสัปดาห์	136	63.00
8. เมื่อท่านมีอาการเจ็บป่วย ท่านสามารถดูแลตนเองได้ เช่น สามารถกินยาสามัญประจำบ้านได้ด้วยตนเอง และเมื่อไม่ดีขึ้นสามารถไปพบแพทย์ที่โรงพยาบาล หรือ รพ.สต. ได้		
ทำได้ทุกครั้ง	112	51.90
ทำได้บางครั้ง	93	43.10
ทำไม่ได้เลย	11	5.10

จากตารางที่ 2 พบว่า กลุ่มตัวอย่างส่วนใหญ่ออกกำลังกาย ร้อยละ 81.50 ส่วนใหญ่ออกกำลัง [เดิน] จำนวน 146 คน ร้อยละ 67.60 รับประทานผักวันละ 20 คำ จำนวน 108 ร้อยละ 50.00 แปรงฟันก่อนนอนทุกวัน จำนวน 121 คน ร้อยละ 56.00 ส่วนใหญ่ไม่เคยสูบบุหรี่ จำนวน 188 คน ร้อยละ 87.00 ส่วนใหญ่ไม่ดื่มเครื่องดื่มแอลกอฮอล์ จำนวน 168 คน ร้อยละ 77.80

ส่วนที่ 3 ความรู้ในการดูแลสุขภาพของผู้สูงอายุ

ตารางที่ 3 แสดงจำนวนร้อยละของกลุ่มตัวอย่างด้านความรู้รวมในการดูแลสุขภาพของผู้สูงอายุ (n = 216)

ความรู้รวมในการดูแลสุขภาพของผู้สูงอายุ	จำนวน	ร้อยละ
ความรู้ระดับสูง (>80 %)	44	20.37
ความรู้ระดับปานกลาง (60-79 %)	125	57.87
ความรู้ระดับต่ำ (<60 %)	47	21.76

จากตารางที่ 3 พบว่า ระดับความรู้รวม ในการดูแลสุขภาพของผู้สูงอายุ อยู่ในระดับปานกลาง (60-79 %) จำนวน 125 คน เป็นร้อยละ 57.87

ตารางที่ 4 แสดงจำนวนร้อยละของกลุ่มตัวอย่างด้านความรู้รายด้านในการดูแลสุขภาพของผู้สูงอายุ (n = 216)

ความรู้รายด้านในการดูแลสุขภาพของผู้สูงอายุ	จำนวน	ร้อยละ
ด้านการบริโภคอาหาร		
ระดับปานกลาง (คะแนน 10 – 20)	78	36.11
ระดับสูง (คะแนน 21 – 30)	138	63.89
ด้านการดูแลสุขภาพและการออกกำลังกาย		
ระดับปานกลาง (คะแนน 10 – 20)	104	48.15
ระดับสูง (คะแนน 21 – 30)	112	51.85
ด้านการใช้จ่าย		
ระดับปานกลาง (คะแนน 10 – 20)	89	41.21
ระดับสูง (คะแนน 21 – 30)	127	58.79

จากตารางที่ 4 พบว่า ระดับความรู้รายด้าน ในการดูแลสุขภาพของผู้สูงอายุ ด้านการบริโภคอาหารอยู่ในระดับสูง (คะแนน 21 – 30) จำนวน 138 ร้อยละ 63.89 ด้านการดูแลสุขภาพและการออกกำลังกาย อยู่ในระดับสูง (คะแนน 21 – 30) จำนวน 112 ร้อยละ 51.85 ด้านการใช้จ่าย อยู่ในระดับสูง (คะแนน 21 – 30) จำนวน 127 ร้อยละ 58.79

ส่วนที่ 4 การเกิดโรคของผู้สูงอายุ

ตารางที่ 5 แสดงจำนวนร้อยละของกลุ่มตัวอย่างด้านการเกิดโรคของผู้สูงอายุของผู้สูงอายุ (n = 216)

การเกิดโรคของผู้สูงอายุ	จำนวน	ร้อยละ
4.1 ด้านการดูแลรักษาสุขภาพ		
1. สุขภาพของท่านโดยทั่วไป		
ไม่ดีเลย	6	2.8
พอใช้ได้	46	21.3
ดี	65	30.1
ดีมาก	66	30.6
ดีเยี่ยม	33	15.3
2. สุขภาพของท่านเป็นอย่างไรเมื่อเทียบกับปีที่แล้ว		
แย่กว่าปีที่แล้วมาก	13	6.0
แย่กว่าปีที่แล้วเล็กน้อย	57	26.4
พอๆ กับปีที่แล้ว	107	49.5
ดีขึ้นกว่าปีที่แล้วเล็กน้อย	32	14.8
ดีขึ้นกว่าปีที่แล้วมาก	7	3.2
3. สุขภาพของท่านเมื่อเปรียบเทียบกับผู้สูงอายุในวัยเดียวกัน		
แย่กว่าเพื่อนรุ่นเดียวกัน	28	13.0
เท่ากับเพื่อนรุ่นเดียวกัน	95	44.0
ดีกว่าเพื่อนรุ่นเดียวกัน	93	43.1
4. จำนวนผู้สูงอายุตามกลุ่มศักยภาพ (ADL)		
กลุ่มติดสังคม	149	69.0
กลุ่มติดบ้าน	65	30.1
กลุ่มติดเตียง	2	.9

จากตารางที่ 5 พบว่า ด้านการดูแลรักษาสุขภาพ 1) สุขภาพโดยทั่วไปดีมาก จำนวน 66 คน ร้อยละ 30.6 2) สุขภาพเมื่อเทียบกับปีที่แล้ว จำนวน 107 คน ร้อยละ 49.5 3) สุขภาพเมื่อเปรียบเทียบกับผู้สูงอายุในวัยเดียวกัน จำนวน 95 คน ร้อยละ 44.0 4) จำนวนผู้สูงอายุตามกลุ่มศักยภาพ (ADL) จำนวน 149 คน ร้อยละ 69.0

ส่วนที่ 4 คุณภาพชีวิตผู้สูงอายุ (WHOQOL- BREF - THAI)

ตารางที่ 6 แสดงจำนวนร้อยละของกลุ่มตัวอย่างคุณภาพชีวิตผู้สูงอายุ (n = 216)

คุณภาพชีวิต	\bar{X}	S.D.	แปลผล
ด้านร่างกาย	23.44	2.22	คุณภาพชีวิตกลาง ๆ
ด้านจิตใจ	21.62	22.00	คุณภาพชีวิตกลาง ๆ
ด้านสัมพันธภาพทางสังคม	11.94	1.99	คุณภาพชีวิตที่ดี
ด้านสิ่งแวดล้อม	30.87	3.24	คุณภาพชีวิตที่ดี
คุณภาพชีวิตโดยรวม	87.88	5.47	คุณภาพชีวิตกลาง ๆ

ส่วนที่ 5 ปัจจัยที่ส่งผลต่อคุณภาพชีวิตผู้สูงอายุ

การวิเคราะห์หาปัจจัย มีการใช้สถิติทั้ง Parametric และ nonparametric เนื่องจากบางข้อมูลการกระจายของข้อมูลไม่กระจายแบบปกติ และมีการจัดกลุ่มตัวแปรใหม่ (category)

ตารางที่ 7 แสดงจำนวนร้อยละของกลุ่มตัวอย่างปัจจัยที่ส่งผลต่อคุณภาพชีวิตผู้สูงอายุ (n = 216)

ตัวแปร	จำนวน	ร้อยละ
ความรู้		
สูง (>80 %)	44	20.37
ปานกลาง (60-79 %)	125	57.87
ต่ำ (<60 %)	47	21.76
พฤติกรรม		
มาก (>18 คะแนน)	66	30.56
ปานกลาง (14-18 คะแนน)	131	60.65
น้อย (<14 คะแนน)	19	8.80
คุณภาพชีวิต		
ดี (>96 คะแนน)	97	44.91
ปานกลาง (61-95 คะแนน)	106	49.07
ต่ำ (<61 คะแนน)	13	6.02

ตารางที่ 8 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างความรู้ พฤติกรรมกับคุณภาพชีวิตของผู้สูงอายุ (n = 216)

ตัวแปร	Bivariate normality		QOL		
	D-H	p-value	R	95% CI of R	p-value
ความรู้	14.21	0.006	0.25 ^(S)	0.12 to 0.37	<0.001
พฤติกรรม	8.32	0.080	0.05 ^(P)	-0.07 to 0.19	0.389

^(S) Spearman rank correlation coefficient, ^(P) Pearson correlation coefficient

ผลวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของสเปียร์แมน พบว่า ความรู้มีความสัมพันธ์ทางบวกกับคุณภาพชีวิตของผู้สูงอายุในระดับน้อย อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 ด้วยค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ 0.25 (p-value <0.001) กล่าวคือ ความรู้มีความสัมพันธ์กับคุณภาพชีวิตของผู้สูงอายุ

ผลวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของเพียร์สัน พบว่า พฤติกรรมมีความสัมพันธ์ทางบวกกับคุณภาพชีวิตของผู้สูงอายุในระดับน้อย มาก อย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 ด้วยค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ 0.05 (p = 0.389) กล่าวคือ พฤติกรรมไม่มีความสัมพันธ์กับคุณภาพชีวิตของผู้สูงอายุ

บทสรุป

ผู้สูงอายุมีอายุยืนยาวมากขึ้น และอายุเฉลี่ยเพิ่มสูงขึ้นทำให้อัตราการตายของประชากรลดลงการตระหนักถึงคุณภาพชีวิตของผู้สูงอายุจึงเป็นสิ่งสำคัญจะทำให้ผู้สูงอายุมีคุณภาพชีวิตที่ดีขึ้น และให้ความช่วยเหลือ เช่นการให้บริการด้านสุขภาพ เป็นสิ่งสำคัญที่ลูกหลานหรือคนในครอบครัวที่จะตระหนักและพิจารณาในจุดนี้ด้วยว่าควรจะเป็นอย่างไร เนื่องจากเมื่อบุคคลเข้าสู่วัยสูงอายุแล้วย่อมมีปัญหาเกี่ยวกับสุขภาพอนามัย ปัญหาทางด้านจิตใจความจำ การเรียนรู้ สิ่งต่างๆเหล่านี้จะมีการเปลี่ยนแปลงไปทางเสื่อมทั้งสิ้น การเปลี่ยนแปลงทางด้านร่างกาย ผู้สูงอายุเป็นวัยที่ร่างกายมีการเปลี่ยนแปลงในรูปของการเสื่อมถอยมากกว่าการเจริญเติบโต แต่จะมากหรือน้อยจะช้าหรือเร็ว ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น พันธุกรรม สภาพแวดล้อม และโภชนาการของแต่ละบุคคล

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (กองทุน) ที่อุดหนุนการทำกิจกรรมส่งเสริมและสนับสนุนการพัฒนาวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (ววน.) ให้กับมหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม และสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคามที่สนับสนุนทุนการวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- บุญชม ศรีสะอาด. (2556). **วิธีการทางสถิติสำหรับการวิจัย เล่ม 2**. กรุงเทพฯ: สุวีริยาการพิมพ์
- สำนักงานสถิติ จังหวัดมหาสารคาม. (2563). **ชุดข้อมูลพื้นฐาน (ผู้สูงอายุ) จังหวัดมหาสารคาม**. มหาสารคาม: สำนักงานสถิติมหาสารคาม.
- Baernholdt, M., Hinton, I., Yan, G., Rose, K., & Mattos, M. (2012). Factors associated with quality of life in older adults in the United States. *Quality of Life Research*, 21(3), 527-534.
- Cronbach, L. J. (1990). **Essentials of psychological testing**. (5th ed.). New York: Harper Collins. Publishers.
- Fu, S. Y., Anderson, D., Courtney, M., & Hu, W. (2007). The relationship between culture, attitude, social networks and quality of life in midlife Australian and Taiwanese citizens. *Maturitas*, 58(3), 285-295.
- Krejcie, R. V. & Morgan, D. W. (1970). Determining Sample Size for Research Activities. *Educational and Psychological Measurement*, 30(3). 607-610.
- United Nations. (2013). **World population ageing 2013**. Department of Economic and Social Affairs Population Division. New York.