The Journal of Industrial Technology Thepsatri Rajabhat University

# วารสารวิชาการ
# คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม
# มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี

ISSN 3027-849X (Online) Vol. 20, No. 2, July - December 2025

**วารสารวิชาการคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี**
**ปีที่ 20 ฉบับที่ 2 กรกฎาคม - ธันวาคม 2568**

**บรรณาธิการ**

รศ.ว่าที่ ร.ต.ดร.ชูชาติ พยอม

**ผู้ช่วยบรรณาธิการ**

ผศ.ดร.ลลิลธร มะระกานนท์ ผศ.ดร.กุลสมทรัพย์ เย็นฉ่ำชลิต ผศ.ดร.ธาดา คำแดง

**ผู้ทรงคุณวุฒิในกองบรรณาธิการ**

| | |
|---|---|
| ศ.ดร.สุมาลี สังข์ศรี | มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช |
| ศ.ดร.สายัณห์ ทัดศรี | มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ |
| ศ.ดร.พีระศักดิ์ ศรีนิเวศน์ | มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ |
| ศ.ดร.วุฒิพงศ์ อารีกุล | มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ |
| ศ.ดร.โกสินทร์ จำนงไทย | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี |
| รศ.ดร.ธีรศิลป์ ทุมวิภาต | สถาบันเทคโนโลยีจิตรลดา |
| รศ.ดร.สุมาลี อุณหวณิชย์ | สถาบันเทคโนโลยีจิตรลดา |
| รศ.ดร.ชนศักดิ์ บ่ายเที่ยง | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ |
| รศ.ดร.มนตรี ศิริปรัชญานันท์ | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ |
| รศ.ดร.กฤษณ์ อ่างแก้ว | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ |
| รศ.ดร.พิพัฒน์ พรหมมี | สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง |
| รศ.ดร.พีระวุฒิ สุวรรณจันทร์ | สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง |
| รศ.ดร.วิสุทธิ์ สุนทรกนกพงศ์ | สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง |
| รศ.ดร.ชูสิทธิ์ ประดับเพ็ชร์ | มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา |

**ฝ่ายจัดการวารสาร**

นางนภาพร รอดแก้ว นางสาววัชรี ภูรักษา

**วัตถุประสงค์**

เพื่อเผยแพร่ผลงานทางวิชาการด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม ได้แก่ วิศวกรรมศาสตร์ วิทยาศาสตร์ประยุกต์ อุตสาหกรรมการเกษตร เทคโนโลยีสารสนเทศ การจัดการอุตสาหกรรม

**กำหนดการออกวารสาร**

ปีละ 2 ฉบับ คือ ฉบับที่ 1 มกราคม-มิถุนายน และฉบับที่ 2 กรกฎาคม-ธันวาคม

**ลักษณะบทความ**

1. ต้องไม่เคยเผยแพร่ในวารสารอื่นใดมาก่อนหรือต้องไม่อยู่ในขั้นตอนการพิจารณาเพื่อเผยแพร่ในวารสารอื่น
2. ต้องเป็นผลงานวิจัยที่มีผลกระทบในวงกว้างที่ไม่ใช่งานวิจัยในระดับสถาบัน

**บทความที่ลงพิมพ์เป็นข้อคิดเห็นของผู้เขียนเท่านั้น**
**ผู้เขียนจะต้องเป็นผู้รับผิดชอบต่อผลทางกฎหมายใดๆ ที่อาจจะเกิดขึ้นจากบทความนั้น**

# สารบัญ


| | หน้า |
|---|---|
| Applying the Long Short-Term Memory Technique to Sales Forecasting for an Auto Parts Vendor<br>Napat Srinual*, Sittichok Sinrat and Chanisara Thitkrathok | 63 |
| การศึกษาผลกระทบของปัจจัยที่ส่งผลต่อความหยาบผิวและมุมเอียงในการตัดวัสดุ PMMA โดยใช้เลเซอร์ $CO_2$: แนวทางการออกแบบแฟกทอเรียลเต็มรูป<br>An Investigation of Parameter Effects on Surface Roughness and Kerf Taper in PMMA Cutting Using a $CO_2$ Laser Cutter: A Full Factorial Experimental Design Approach<br>วีระพล ทับทิมดี, ประเวช เชื้อวงษ์ และปริวรรต นาสวาสดิ์* | 72 |
| การประเมินศักยภาพการประหยัดพลังงานของระบบปรับอากาศด้วยการใช้อากาศภายนอกเอนทัลปีต่ำในบริบทภูมิอากาศร้อนชื้นของประเทศไทย<br>Assessment of Energy-Saving Potential of Air Conditioning Systems Using Low-Enthalpy Outdoor Air in Hot-Humid Climate of Thailand<br>มานพ หิตะรัตน์, ปรเมษฐ์ สิทธิสันติ์, สุรัตน์ เศษโพธิ์, บุญวัฒน์ วิจารณ์พล และ นพรัตน์ เกตุขาว* | 83 |
| การเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์โดยใช้ครีบนำความร้อนรูปทรงกระบอกสำหรับอบแห้งขมิ้นชัน<br>Thermal Efficiency Enhancement of a Solar-Powered Dryer Equipped with Cylindrical Heat Fins for Turmeric Drying<br>สมมาตร สุบรรณพงษ์ และ จารุมาศ รักทองหล่อ* | 93 |
| เมตาเวิร์สสำหรับแหล่งการเรียนรู้และการท่องเที่ยวเชิงเกษตรจังหวัดลพบุรี<br>Metaverse for learning resources and agricultural tourism in Lopburi Province<br>สจีวรรณ ปราชญ์ศรี | 104 |
| การพัฒนาต้นแบบระบบคำนวณค่าไฟฟ้าตามปริมาณการใช้จริงผู้จำหน่ายสินค้าตลาดถนนคนดอย อำเภอแม่จัน จังหวัดเชียงราย<br>Development of a Prototype for an Electricity Billing System Based on Actual Consumption for Vendors at the Khon Doi Walking Street Market in Mae Chan District, Chiang Rai Province<br>ศุภวัฒน์ ลาวัณย์วิสุทธิ์, ประพนธ์ เด่นดวง, กวี ขยันดี และ ภูมิพงษ์ ดวงตั้ง* | 115 |

# Applying the Long Short-Term Memory Technique to Sales Forecasting for an Auto Parts Vendor

Napat Srinual[1*], Sittichok Sinrat[2] and Chanisara Thitkrathok[3]

[1] Department of Logistics and Transportation Management, Panyapiwat Institute of Management
[2,3] Department of Logistics and Supply Chain Management, Huachiew Chalermprakiet University
*Email: napatsri@pim.ac.th
Received: July 3, 2025; Revised: October 2, 2025; Accepted: November 13, 2025

## Abstract

In the face of increasingly fluctuating car demand, sales orders for automotive parts from various vendors have highlighted the growing importance of sales forecasting and predictive analytics to prevent overstocking and stock outs. However, most of the existing research continues to rely predominantly on traditional time-series forecasting methods that do not fully capture dynamic demand. To address these issues, this study applies a deep learning time-series forecasting technique to reduce the discrepancy and find a suitable method for forecasting the orders. The objective of this study is to propose an algorithm for forecasting sales based on an LSTM network, using historical sales data from an auto parts vendor. This study was conducted in an automotive vendor located in Samut Prakan, utilising a dataset covering 130 weeks from 2023-2025 to. A total of 70 percent of the sales data were employed for training, whereas 30 percent were allocated to the testing sets. The selected item stems from high-value auto parts consisting of 77443582-441V, 77443582-521V, 55183973-060V, and 55183973-440V. The four auto parts were selected based on their high sales volume and strategic importance to the vendor's inventory management. These items contribute to over 40% of total sales revenue and are frequently subject to stockouts, making accurate forecasting critical. Compared with actual sales orders, the results show that the MAPE forecast error from the LSTM model is lower than the 6.14% error, and it achieves an R-squared of 90.228%, outperforming the existing forecasting technique used by the purchasing department. These findings suggest that the proposed forecasting model can effectively improve the sales order accuracy of automotive part vendors.

**Keywords:** Auto parts, Sales forecasting, Forecast accuracy, Long Short-Term Memory

## 1. Introduction

Predicting a sales order for auto parts is the key research for auto parts vendors [1]. It estimates the actual sales of specific point in advance according to needs of manufacturers.

The main issue with a company name "Vendor ABC auto parts" is inaccurate sales forecasting, resulting in a mismatch between the anticipated demand from manufacturers and the actual sales orders. Consequently, the company experiences overstocking and understocking. The company's existing forecasting method has low accuracy and relies on A 3-week simple moving average of demand (SMA-3weeks) technique. The company currently uses a 3-week SMA based on internal evaluation showing that this period provides the most stable forecast for their replenishment cycle,

which operates on a weekly ordering schedule with a lead time of 7 days. This approach has proven to be inadequate for accurately predicting automobile orders, resulting in the accumulation of unsold goods.

Table 1 lists the forecast errors for the items selected in this study. Given these challenges, the company is now exploring advanced deep-learning techniques to improve sales forecasting. Since sales orders are time series, they can be treated as sequential data, making them well suited for advanced time series forecasting methods.

In addition, Abbasimehr et al. [2] pointed out that while advanced deep learning techniques, such as artificial neural networks (ANN) and recurrent neural networks (RNN), offer promising solutions for sales forecasting, they have certain limitations. To overcome these drawbacks, a Long Short-Term Memory (LSTM) network, a specialised type of RNN, was used [3]. The objective of this study is to propose the application of an LSTM network for predicting the sales patterns of automotive parts. Additionally, this study aims to assess the effectiveness of LSTM models in sales forecasting by comparing their performance with of the three-week simple moving average forecasting method currently used by the case study company.

**Table 1** SMA (n=3weeks) forecasting errors for four auto parts

| Parts code | MAPE (%) |
|---|---|
| 77443582-441V | 9.37 |
| 77443582-521V | 20.65 |
| 55183973-060V | 21.10 |
| 55183973-440V | 6.69 |

## 2. Scope of Research

This research scope focuses on analysing and forecasting the sales orders of four different items of automotive parts using time series methods, specifically employing Long Short-Term Memory (LSTM) networks. The data utilized for this analysis consists of monthly procurement records of automotive components collected over a three-year period, from 2023 to 2025. The dataset will be divided into a training set covering 90 weeks and a testing set for 40 weeks. This division allows for robust model training and validation, ensuring the effectiveness of the forecasting methodology. The findings aim to provide insights into purchasing trends and enhance inventory management strategies in the automotive sector.

## 3. Literature Review

### 3.1 Time Series Forecasting

Time series methods are based on historical data of an event and forecasting [4]. Lim and Zohren [5] noted that time-series forecasting has been performed under the assumption of linearity and statistical methods with traditional approaches such as simple moving average (SMA), weighted moving average (WMA), exponential smoothing (ES), single exponential smoothing (SES), Holt linear (HL), and Holt-Winters (HW). However, it is not suitable if the time series contains nonlinear patterns that can be captured by nonlinear models, such as ANNs [6].

### 3.2 Artificial Neural Network (ANN)

An Artificial Neural Network is a machine learning algorithm based on biological neural networks [6]. It is composed of numerous highly interconnected processing elements (neurons) that work together to solve specific problems [7]. There are three main components of ANNs: neurons, interconnections, and learning rules. It can implicitly detect complex nonlinear relationships between dependent and independent variables and is best suited for complex information processing.

### 3.3 Recurrent Neural Network (RNN)

RNN belong to the family of artificial neural networks with recurrent architectures. Recurrence refers to the use of previous outputs as inputs so that they are recurrent. RNN are sequential models that process one or more sequential inputs of variables [8]. Although RNNs are suitable for time-series forecasting, Hurtado-Mora et al. [9] stated

that they suffer from the vanishing and exploding gradient problem which makes them difficult to train. To overcome this problem, an extended variant of RNNs called LSTM has been introduced that has gained popularity owing to its excellent performance in time-series forecasting [10].

### 3.4 Long Short-Term Memory (LSTM) Network

LSTM is an RNN that can manage both long- and short-term dependencies. As previously mentioned, the major problem with RNN is the vanishing gradient. LSTMs solve this problem by introducing memory cells and gating mechanisms [11]. Each memory cell $C_t$ holds the temporal states of the network and has three gates, $I_t$, $F_t$, and $O_t$, which control the flow of information.

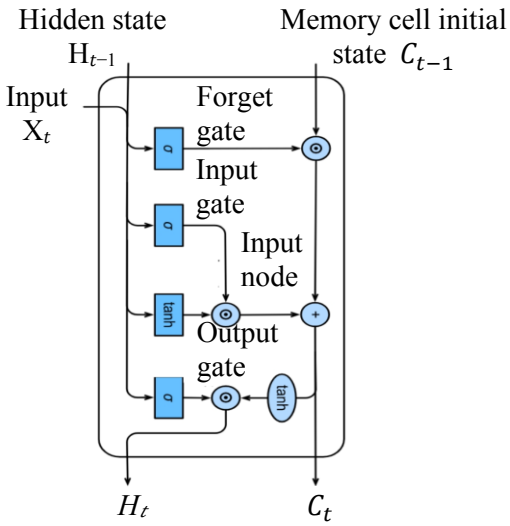



**Figure 1** The structure of LSTM architecture (adapted from [12])

The architecture of LSTM is shown in Figure 1. The gate operations are as follows:

1) Forget gate

This gate decides whether to retain the information in the cell state or discard it. The decision to maintain is based on the input data and the output from the previous node, passed through a sigmoid function, as shown in equation (1).

$$F_t=\sigma\,(W_F \cdot [H_{t-1,}H_t]+b_F) \quad (1)$$

2) Input gate

This gate receives new input data and “writes” into each node. This operation can be divided into two parts. First, if the cell state must be updated, the sigmoid function acts as a control mechanism and activates the input gate to decide whether to update the cell state. Second, if the input gate decides to update the cell state, the “tanh” function will generate candidate values () for the state, as shown in equations (2), (3) and (4).

$$I_t=\sigma\,(W_I \cdot [H_{t-1,}X_t]+b_I) \quad (2)$$

$$\widetilde{C}_t= tanh\,(W_C \cdot [H_{t-1,}X_t]+b_C) \quad (3)$$

$$C_t=F_t*C_{t-1}+I_t*\widetilde{C}_t \quad (4)$$

3) Output gate

This gate determines what goes out of the cell state. It is a gate that is preparing to output data. The sigmoid determines the parts of the cell state to output. The cell state is passed into the sigmoid to decide what to output as one or zero. Then, the result from the “tanh” is calculated to determine if the output is 1 or -1. Finally, the output from the sigmoid gate is combined with the result from the “tanh” to get the output as shown in equation (5).

$$O_t=\sigma\,(W_O \cdot [H_{t-1,}X_t] +b_O) \quad (5)$$

### 3.5 Forecasting model metrics

In the study, the forecasting model performance is evaluated using two selected metrics. Among the various metrics available, this work focuses specifically on the Mean Absolute Percentage Error (MAPE) and the coefficient of determination (R-squared) to assess the accuracy and predictive capability of the forecasting models. These two metrics are used to compare the models and identify the most effective one for sales forecasting, as detailed below.

1) Mean Absolute Percentage Error (MAPE) is to evaluate a performance metric in forecasting models. This can be defined by equation (6). Let $A_t$ and $F_t$ denote the actual and forecast values, respectively, at data point t.

$$MAPE = \frac{1}{n} * \sum_{t=1}^{n} |(A_t - F_t)/A_t| \quad (6)$$

where:

n denotes the number of periods.

According to Na Na [13], the MAPE values can be classified as shown in Table 2.

**Table 2** MAPE value classification [13]

| Forecasting model performance | MAPE value |
|---|---|
| Very Good | < 10% |
| Good | 10% - 20% |
| Acceptable | 20% - 50% |
| Poor | > 50% |

In addition to MAPE, R-squared was computed to evaluate the goodness-of-fit between actual and forecasted values.

2) R-squared (The coefficient of Determination) is a number between 0 and 1 that measures the accuracy with which a model can anticipate a given result. Equation (7) shows how to calculate R-squared ($R^2$).

$$R^2 = 1 - SS_{regression}/SS_{total} \quad (7)$$

where:

$SS_{regression}$ is the regression sum of squares

$SS_{total}$ is the sum of all squares

### 3.6 Existing Studies on LSTM in Automotive Forecasting

LSTM networks have been applied to improve demand forecasting in automotive supply chains. Chandriah and Naraganahalli [14] reported enhanced accuracy in spare parts prediction using an LSTM model with a modified Adam optimizer, while Limbare and Agarwal [15] demonstrated similar benefits when integrating LSTM into demand planning and budgeting. Hybrid and advanced models further highlight LSTM's strengths. For instance, Suddala [16] found ARIMA–LSTM combinations outperform traditional ARIMA and Holt–Winters, and Terrada [17] emphasized LSTM's capacity to model nonlinear, volatile demand. In industrial contexts, Abbasimehr et al. [2] achieved consistent error reduction through optimized LSTM settings, and Cui et al. [18] introduced an attention-based bidirectional LSTM capable of capturing seasonality and trend effects. Na [13] also confirmed LSTM's superiority over classical forecasting techniques.

Despite these contributions, most applications focus on large-scale manufacturers, with limited attention to small or medium-sized vendors in emerging markets [17]. Comparisons with simple operational baselines such as the simple moving average (SMA) are also rare [15, 17]. Addressing these gaps, the present study evaluates LSTM against SMA using data from a local auto parts vendor in Samut Prakan, providing practical insights into its operational value.

## 4. Materials and methods

The proposed methodology is illustrated in Figure 2. The flowchart emphasises the main steps of our method.

### 4.1 Data Selection and Preprocessing

The sales order of different four parts are collected from an auto parts vendor in Samut Prakarn. These items were selected because they had the highest values. The data provided by the vendor were collected for three years from January 2023 to May 2025. The vendor also provides weekly sales reports for auto parts. Therefore, the data instance had 130 weeks, with 90 weeks for training and 40 weeks for testing. This dataset obtained no missing values or outliers.

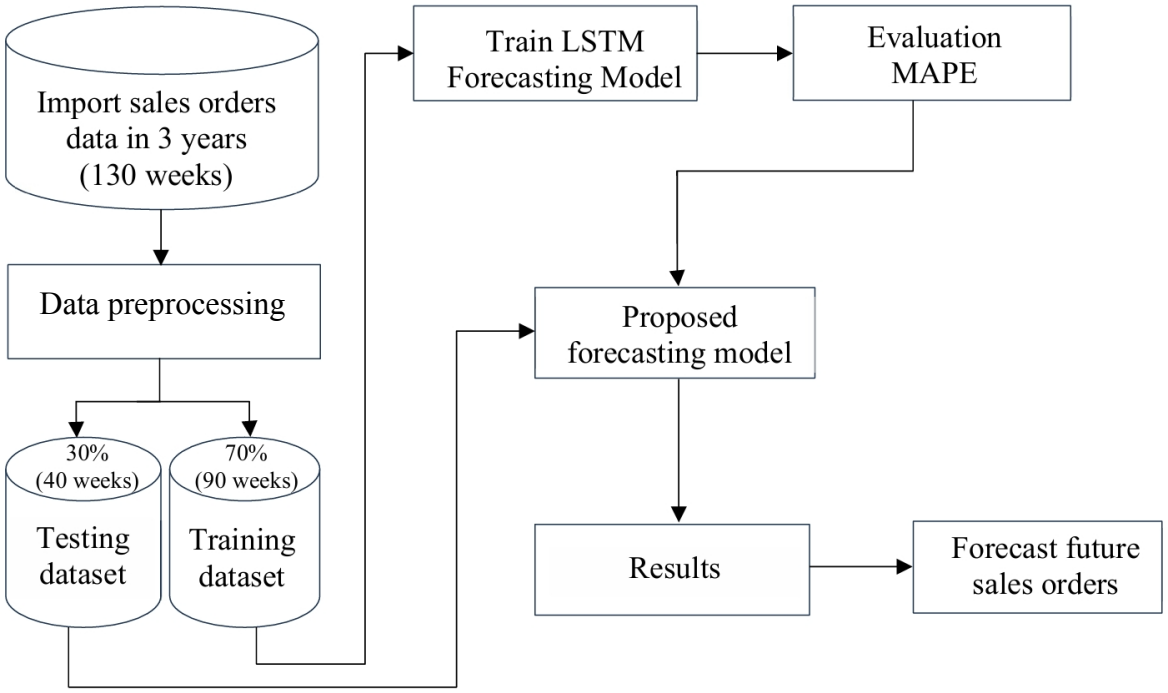



**Figure 2** Flowchart of the proposed forecasting method

Missing values were identified in Python. For time series with less than 5% missing data, linear interpolation was applied. Outliers were detected using the Interquartile Range (IQR) method, where values beyond Q1 – 1.5×IQR or Q3 + 1.5×IQR were flagged. These values were then visually inspected and replaced using median imputation if deemed erroneous.

**4.2 Goodness of fit test for LSTM network forecasting model**

The validation of the LSTM forecasting model was conducted by analysing the training and validation loss curves across four distinct auto parts. The evaluation focused on assessing the model's ability to generalize and avoid overfitting, as well as determining the optimal hyperparameters for the architecture. The initial model architecture was determined through a comprehensive grid search over a predefined validation set. The grid search evaluated various combinations of hyperparameters, including the number of hidden layers and units per layer. The optimizer and learning rate were also tuned to ensure optimal convergence. The results of the grid search indicated that the model with one hidden layer and 100 units per layer, using the Adam optimizer with a learning rate of 0.001, exhibited the fastest convergence and the lowest validation loss. However, the final model architecture was adjusted based on additional considerations to enhance performance and stability. The final configuration consisted of two hidden layers, each with 50 units, and utilized the ReLU activation function. This modification was made to balance the model's complexity and computational efficiency while maintaining its predictive accuracy. The goodness of fit for the LSTM model was evaluated by examining the convergence and stability of the training and validation loss curves, as illustrated in Figure 3. The curves demonstrated a consistent decrease in loss values during the initial epochs, indicating effective learning of the temporal dependencies in the sales data. The losses for all four auto parts converged to comparable values, suggesting that the model generalized well across different components.

Notably, the training and validation loss curves showed no signs of overfitting. Overfitting typically

manifests as a divergence between training and validation performance, where the training loss continues to decrease while the validation loss plateaus or increases. In this case, both losses stabilized within a similar range, particularly after 10-15 epochs, indicating that the model effectively captured the underlying patterns without memorizing the training data. To further substantiate the model's performance, quantitative metrics were employed. The validation loss, measured using MAPE, was found to be consistently low across all four auto parts. Specifically, the MAPE values for the validation set were observed to be within a narrow range, demonstrating the model's robustness and reliability in forecasting sales for different components.

## 5. Results

This section compares the actual weekly sales against the predicted sales implemented by the LSTM model and the existing SMA-3weeks method as shown in Figure 4 below.

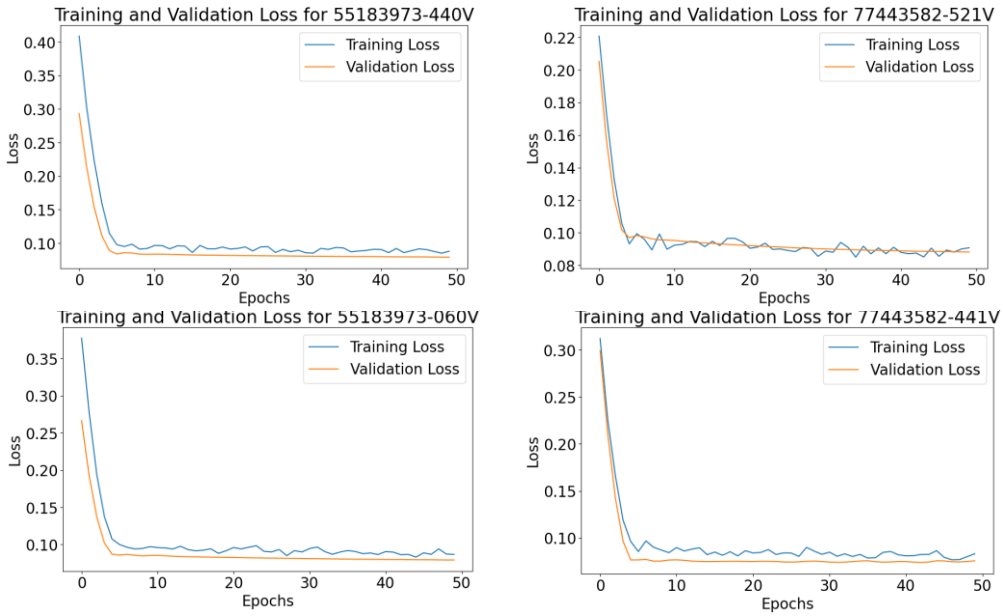



**Figure 3** Training and validation loss across four different auto parts

The blue line is the actual sales, which are very volatile with many peaks and trenches, reflecting irregular and dynamic sales data. The orange line represents the LSTM predictions, and the green line represents as the SMA-3weeks predictions. In Figure 4, the charts illustrate the predicted weekly sales for four auto parts, demonstrating that the LSTM model provided consistent predictions that followed the general sales trend. It generalises well across the dataset but is not overly sensitive to extreme fluctuations in actual sales. SMA-3weeks partially captured the trends, but delayed adapting to high increases or decreases in sales, resulting in larger deviations from actual values. The LSTM model predicted sales for sales order data and obtained the MAPE value.

**Table 3** The MAPE values from LSTM network

| Parts code | MAPE (%) | Performance |
|---|---|---|
| 77443582-441V | 8.75 | Very Good |
| 77443582-521V | 9.40 | Very Good |
| 55183973-060V | 10.07 | Good |
| 55183973-440V | 5.02 | Very Good |

To compare the models and their MAPE values, the accuracy of the proposed model and MAPE values were calculated. Table 3 shows that in all cases, the MAPE decreased.

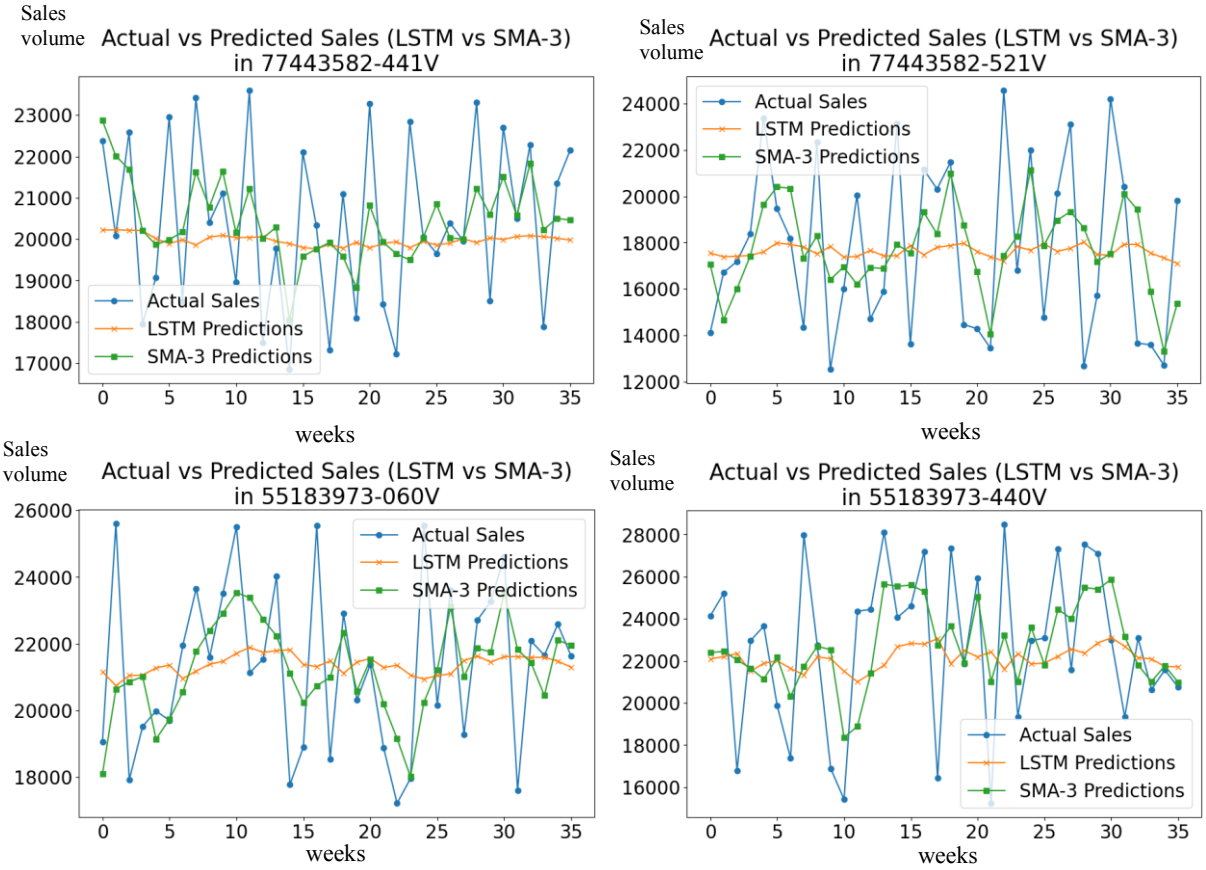



**Figure 4** Comparison of four auto parts: LSTM vs SMA-3weeks

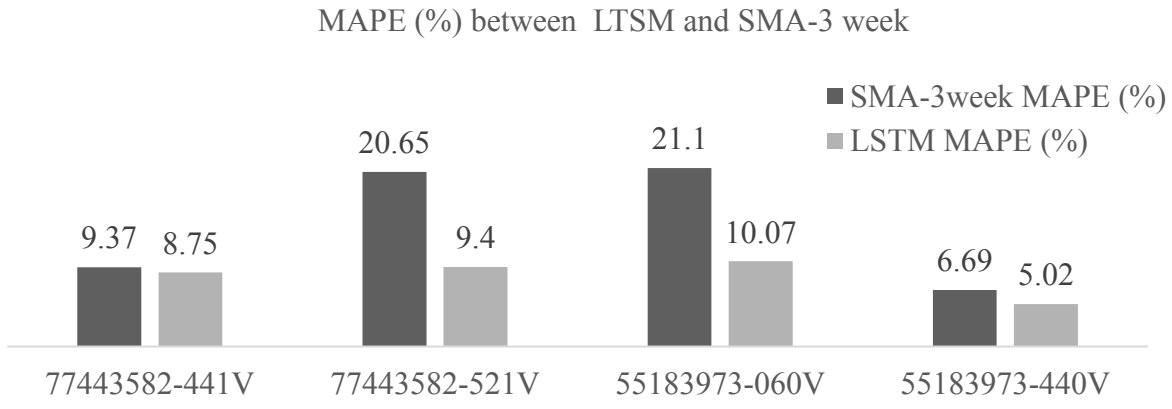



**Figure 5** Comparison of MAPE between LSTM and SMA-3week for four parts

Figure 5 shows the predictive errors of the LSTM model and existing 3-week Simple Moving Average (SMA). The average MAPE (%) improved by 6.14%. Compared to 77443582-441V, 77443582-521V, 55183973-060V, and 55183973-440V, the LSTM model reduced the MAPE by 0.62%, 11.25%, 11.03%, and 1.67%, respectively.

In addition, The LSTM model achieved the highest value where R-squared = 0.90228. It is concluded that the LSTM model achieved the highest accuracy and the lowest error rate.

## 6. Discussion and conclusion

The results show that the LSTM network is better for auto parts sales forecasting than the SMA-3weeks method. The training and validation losses indicate that the model is suitable for generalisation and convergence.

In addition, the MAPE evaluation showed an average improvement of 6.14%, and the model was good at capturing complex patterns and fluctuations in sales data. This agrees with the results reported by Pliszczuk et al. [19], LSTM models outperform traditional time-series methods by providing accurate predictions. These results prove that the LSTM network is a practical and efficient forecasting tool, especially for dealing with irregular and volatile demand in the auto parts industry. Based on the paper of Abbasimehr et al. [2], LSTM methods outperformed other time-series models when

## 7. Recommendation

In theoretical recommendations, a problem in sales forecasting occurs because the model over fits, especially when historical sales data are not sufficient to train. However, it also performs poorly on new data. Therefore, it is recommended to avoid this issue by applying fine-tuned hyper parameters, including early stopping, dropout regularisation, and monitoring validation loss.

In practical recommendations, it is recommended to improve the performance of LSTM models for sales forecasts, particularly for automobile parts vendors, through necessary improvements, as a solution to some of the extant limitations. This recommendation proposes the integration of data sources and historical sales data. Factors such as inventory levels, lead times, transport delays, and supplier performance provide insight into order sales patterns. As a future study, scholars will first aim to explore LSTM time series forecasting in other domains and regions to understand the differences in the sales forecasting mechanism. Second, only sales orders as structured data were considered, but unstructured data (emails, customer sentiment, and CRM activity logs) will also be deliberated to increase the accuracy of future sales forecasting. Finally, combining forecasting methods including linearity and non-linearity can be provided an accuracy rather than LSTM or SMA-3weeks will be constructed to test for forecasting model improvement.

## 8. References

[1] W. Liao, G. Y., Y. Yanchao, Y. Weijun, Y. Yaheng, and Z. Dongzhou, “ Auto Parts Sales Prediction based on Machine Learning for Small Data and a Long Replacement Cycle, in *ACS/IEEE International Conference on Computer Systems and Applications*, November. 02-05, 2020, pp. 1-5.

[2] H. Abbasimehr, M. Shabani, and M. Yousefi, “An optimized model using LSTM network for demand forecasting,” *Computers and Industrial Engineering*, vol. 143, pp. 1-13, May, 2020.

[3] J. Zheng, C. Xu, Z. Zhang, and X. Li, “ Electric load forecasting in smart grids using Long-Short-Term- Memory based Recurrent Neural Network,” in *51st Annual Conference on Information Sciences and Systems (CISS)*, Mar 22-24, 2017, pp. 1–6.

[4] C. Ghassen, H. Bakir, and H. Zaher, “E-commerce Time Series Forecasting using LSTM Neural Network and Support Vector Regression,” in *Proceedings of the International Conference on Big Data and Internet of Things*, December. 20, 2017, pp. 80-84.

[5] B. Lim and S. Zohren, “ Time-series forecasting with deep learning: a survey,” *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 379, no. 2194, pp. 1-14, Feb, 2021.

[6] M. Khashei and M. Bijari, “A novel hybridization of artificial neural networks and ARIMA models

for time series forecasting," *Applied Soft Computing*, vol. 11, no. 2, pp. 2664-2675, Mar, 2011.

[7] K. Satashwa1, M. Nagre, and A. Bhange, "Artificial Neural network for effective demand forecasting of Product" in International Journal of Advances in *Engineering and Management (IJAEM)*, vol. 4, no. 10, pp. 982-986, Oct, 2022.

[8] A. R. S. Parmezan, V. M. Souza, and G. E. Batista, " Evaluation of statistical and machine learning models for time series prediction: Identifying the state-of-the-art and the best conditions for the use of each model," *Information Sciences*, vol. 484, pp. 302-337, Jan, 2019.

[9] H. A. Hurtado- Mora, A. H. García- Ruiz, R. Pichardo-Ramírez, L. J. González-del-Ángel, and L. A. Herrera- Barajas, " Sales Forecasting with LSTM, Custom Loss Function, and Hyperparameter Optimization: A Case Study," *Applied Sciences*, vol. 14, no. 21, p. 9957, Oct, 2024.

[10] A. El Filali, E. H. Lahmer, S. El Filali, M. Kasbouya, M. A. Ajouary, and S. Akantous, "Machine Learning Applications in Supply Chain Management: A Deep Learning Model Using an Optimized LSTM Network for Demand Forecasting," *International Journal of Intelligent Engineering and Systems*, vol. 15, no. 2, pp. 464-478, Feb, 2022.

[11] K. Greff, R. K. Srivastava, J. Koutník, B. R. Steunebrink, and J. Schmidhuber, " LSTM: A Search Space Odyssey," *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, vol. 28, no. 10, pp. 2222–2232, Mar, 2015.

[12] S. Hochreiter and J. Schmidhuber, "Long Short-Term Memory," *Neural Computation*, vol. 9, no. 8, pp. 1735-1780, Nov, 1997.

[13] N. Na, " Research on Supply Chain Demand Prediction Model Based on LSTM," *Procedia Computer Science*, vol. 243, no. C, pp. 313-322, Oct, 2024.

[14] K. Chandriah and R. Naraganahalli, "RNN/LSTM with modified Adam optimizer in deep learning approach for automobile spare parts demand forecasting," *Multimedia Tools and Applications*, vol. 80, no. 20, pp. 26145-26159, 2021.

[15] A. Limbare and R. Agarwal, "Demand forecasting and budget planning for automotive supply chain," *EAI Endorsed Transactions on Internet of Things*, vol. 10, no. 1, pp. 1-8, Nov. 2023.

[16] S. Suddala, "Dynamic demand forecasting in supply chains using hybrid ARIMA-LSTM architectures," *International Journal of Advanced Research*, vol. 12, no. 2, pp. 167-174, 2024.

[17] L. Terrada, M. Khaili, and H. Ouajji, "Demand forecasting model using deep learning methods for supply chain management 4.0," *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, vol. 13, no. 5, pp. 517-523, 2022.

[18] L. Cui, Y. Chen, J. Deng, and Z. Han, "A novel attLSTM framework combining the attention mechanism and bidirectional LSTM for demand forecasting," *Expert Systems with Applications*, vol. 254, Art.no. 124409, 2024.

[19] D. Pliszczuk, P. Lesiak, K. Zuk, and T. Cieplak, "Forecasting Sales in the Supply Chain Based on the LSTM Network: The Case of Furniture Industry," *European Research Studies Journal*, vol. 14, Special Issue 2, pp. 627-636, Jun, 2021.

# การศึกษาผลกระทบของปัจจัยที่ส่งผลต่อความหยาบผิวและมุมเอียงในการตัดวัสดุ PMMA โดยใช้เลเซอร์ $CO_2$: แนวทางการออกแบบแฟกทอเรียลเต็มรูป

# An Investigation of Parameter Effects on Surface Roughness and Kerf Taper in PMMA Cutting Using a $CO_2$ Laser Cutter: A Full Factorial Experimental Design Approach

วีระพล ทับทิมดี[1], ประเวช เชื้อวงษ์[2] และปริวรรต นาสวาสดิ์[2*]
Weerapol Taptimdee [1], Prawach Chourwong [2] and Pariwat Nasawat [2*]

[1]สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิตอัตโนมัติ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏราชนครินทร์
[2] สาขาวิชาวิศวกรรมโลจิสติกส์และกระบวนการ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏราชนครินทร์
[1] Department of Automated Manufacturing Engineering, Faculty of Industrial Technology, Rajabhat Rajanagarindra University
[2] Department of Logistics and Process Engineering, Faculty of Industrial Technology, Rajabhat Rajanagarindra University
*Email: pariwat@techno.rru.ac.th
Received: June 11, 2025; Revised: October 4, 2025; Accepted: November 14, 2025

**บทคัดย่อ**

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลต่อค่าความหยาบผิวและมุมเอียงในการตัดวัสดุ PMMA โดยใช้เลเซอร์ $CO_2$ ด้วยการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูป และวิเคราะห์ผลด้วย ANOVA เพื่อทดสอบนัยสำคัญทางสถิติ ปัจจัยควบคุมที่นำมาพิจารณาประกอบด้วย 3 ปัจจัย (ปัจจัยละ 3 ระดับ) ได้แก่ ความเร็วในการตัด (3, 5, 7 มิลลิเมตรต่อวินาที), กำลังเลเซอร์ (50, 70, 90 เปอร์เซ็นต์), และ ระยะห่างหัวตัด (12, 14, 16 มิลลิเมตร) ผลการวิเคราะห์พบว่า ความเร็วในการตัดและระยะห่างหัวตัดส่งผลให้ค่าเฉลี่ยของความหยาบผิวและมุมเอียงแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ขณะที่กำลังเลเซอร์และผลจากปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรควบคุมทั้งสามไม่มีผลต่อความแตกต่างของค่าเฉลี่ยอย่างมีนัยสำคัญ ชุดพารามิเตอร์ที่ให้คุณภาพการตัดที่เหมาะสมที่สุด คือ ความเร็ว 3 มิลลิเมตรต่อวินาที กำลังเลเซอร์ 90 เปอร์เซ็นต์ และระยะห่างหัวตัด 16 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นสภาวะที่ให้ค่าความหยาบผิวต่ำที่สุดและค่ามุมเอียงใกล้เคียง 90 องศามากที่สุด ผลการศึกษานี้สามารถนำไปใช้ในการปรับพารามิเตอร์การตัดให้เหมาะสม เพื่อยกระดับคุณภาพและประสิทธิภาพของกระบวนการผลิตชิ้นงานจากวัสดุ PMMA ในทางอุตสาหกรรม

**คำสำคัญ :** การตัดด้วยเลเซอร์ $CO_2$, ความหยาบผิว, มุมเอียงของรอยตัด, การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูป

**Abstract**

This study aims to investigate the effects of various parameters on surface roughness and kerf taper in the cutting of PMMA material using a $CO_2$ laser cutter. A full factorial experimental design was employed, and the results were analyzed using Analysis of Variance (ANOVA) to determine statistical significance. The three control factors considered (3 levels per factor) were: cutting speed (3, 5, 7 millimeters per second), laser power (50, 70, 90 percent), and nozzle standoff distance (12, 14, 16 millimeters). The results of the analysis found that cutting speed and nozzle standoff distance significantly affected the mean values of surface roughness and kerf angle. Meanwhile, laser power and the interaction effects among the three control variables did not significantly affect the mean differences. The set of parameters yielding the optimal cutting quality was a cutting speed of 3 millimeters per second, a laser power of 90 percent, and a nozzle standoff distance of 16 millimeters. This was the condition that resulted in the lowest surface roughness and a kerf angle closest to 90 degrees. The findings of this study can be applied in practice to optimize

cutting parameters, thereby enhancing the quality and efficiency of PMMA workpiece production processes in industrial laser cutting.

**Keywords :** $CO_2$ laser cutter, Surface roughness, Kerf taper, Full factorial experimental design

## 1. บทนำ

ในยุคปัจจุบันที่เทคโนโลยีการผลิตมีการพัฒนาไปอย่างรวดเร็ว การคัดเลือกวัสดุและเทคนิคการแปรรูปที่เหมาะสมจึงเป็นปัจจัยสำคัญต่อความสำเร็จของกระบวนการผลิตชิ้นงานที่ต้องการความละเอียด ประณีต และมีคุณสมบัติเฉพาะตัว วัสดุพอลิเมทิลเมทาคริเลต (Polymethyl methacrylate: PMMA) เป็นหนึ่งในวัสดุพอลิเมอร์เชิงวิศวกรรมที่ได้รับความสนใจอย่างต่อเนื่อง วัสดุพอลิเมอร์ชนิดเทอร์โมพลาสติกมีลักษณะเด่นหลายประการ อาทิเช่น มีความโปร่งใสสูง น้ำหนักเบา ทนต่อรังสีอัลตราไวโอเลต และสามารถแปรรูปได้ง่าย เป็นต้น [1] ทำให้ PMMA ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมยานยนต์ (กันชน แผงจอ บังโคลน) อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ (หน้าจอ ฝาครอบสำหรับเครื่องพิมพ์ 3 มิติ) การแพทย์ และอุตสาหกรรมตกแต่งภายใน งานป้ายโฆษณาต่างๆ [2, 3] เพื่อให้สามารถขึ้นรูปหรือผลิตชิ้นงานจาก PMMA ได้อย่างมีประสิทธิภาพ เทคโนโลยีการตัดวัสดุที่ให้ความแม่นยำสูงและลดความเสียหายต่อวัสดุจึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง โดยเฉพาะเทคโนโลยีการตัดด้วยเลเซอร์ ซึ่งมีการใช้งานกันอย่างแพร่หลาย

ในบรรดาเครื่องตัดเลเซอร์ที่ใช้ในอุตสาหกรรม เครื่องตัดเลเซอร์ชนิดคาร์บอนไดออกไซด์ ($CO_2$ Laser cutting machine) เป็นหนึ่งในวิธีการที่ได้รับความนิยมสูงสุดสำหรับการตัดวัสดุพอลิเมอร์ โดยเฉพาะ PMMA ซึ่งเครื่องตัดเลเซอร์คาร์บอนไดออกไซด์ มีข้อได้เปรียบสำคัญหลายประการ คือ การตัดแบบไม่สัมผัส (non-contact), ความสามารถในการตัดด้วยความเร็วสูง ความแม่นยำด้านขนาดที่ดีเยี่ยม และกระบวนการตัดสามารถทำซ้ำได้หลายครั้งเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ตามที่ต้องการ [4, 5] นอกจากนี้ ความยาวคลื่นของแสงเลเซอร์ $CO_2$ (ประมาณ 10.64 ไมโครเมตร) ยังสอดคล้องกับสเปกตรัมการดูดกลืนพลังงานของ PMMA ส่งผลให้การตัดมีประสิทธิภาพสูงและความเสียหายต่อเนื้อวัสดุน้อย [6, 7] การศึกษางานวิจัยก่อนหน้านี้ พบว่า K. Aydın และ L. Uğur [8] ได้ศึกษาถึงอิทธิพลของกำลังเลเซอร์และความเร็วในการตัดที่มีผลต่อคุณภาพของการตัดวัสดุ PMMA ผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มกำลังเลเซอร์และความเร็วในการตัดสามารถปรับปรุงความแม่นยำของขนาดและรูปแบบการตัดได้ ในขณะที่ความกว้างของร่องตัดสามารถควบคุมได้โดยการปรับความเร็วในการตัดและกำลังเลเซอร์ Varsi A และ Shaikh A [9] ได้ทำการศึกษาเชิงทดลองและเชิงสถิติเกี่ยวกับมุมเอียงของรอยตัดระหว่างการตัดด้วยเลเซอร์ $CO_2$ ของวัสดุเทอร์โมพลาสติก โดยพิจารณาปัจจัย 3 ปัจจัย ได้แก่ กำลังเลเซอร์ ความเร็วตัด จำนวนรอบการตัด ที่ส่งผลต่อมุมเอียงของรอยตัดชิ้นงาน PMMA พบว่ากำลังเลเซอร์ ความเร็วตัด และจำนวนรอบมีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อมุมเอียงของรอยตัด ยิ่งกำลังเลเซอร์สูง ความเร็วตัดต่ำลง และจำนวนรอบของการตัดสูง ก็ยิ่งส่งผลให้มุมเอียงรอยตัดมีค่าต่ำลง kurt และคณะ [10] ได้ศึกษาถึงผลกระทบของกำลังเลเซอร์ ความเร็วตัด และจุดโฟกัสต่อความกว้างของรอยตัด โดยใช้วิธีการพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology) และการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติ (ANOVA) ผลการวิเคราะห์ข้อมูลแสดงให้เห็นว่า ความกว้างของรอยตัดได้รับผลกระทบอย่างมากจากจุดโฟกัส รวมถึงความเร็วตัดและกำลังเลเซอร์อีกด้วย อย่างไรก็ตามคุณภาพของการตัดขึ้นอยู่กับหลายพารามิเตอร์ เช่น กำลังเลเซอร์ (laser power), ความเร็วในการตัด (cutting speed), ขนาดหัวตัด (Nozzle dimension) และระยะห่างระหว่างหัวตัดกับชิ้นงาน (Nozzle stand-off distance) ซึ่งแต่ละพารามิเตอร์สามารถส่งผลต่อคุณภาพของชิ้นงานได้ เช่น ขนาดของร่องตัด (kerf width), ความหยาบผิว (surface roughness) เป็นต้น [11] หากพารามิเตอร์ถูกตั้งค่าไม่เหมาะสม อาจส่งผลให้เกิดปัญหาต่างๆ เช่น ร่องตัดโตเกินไป ร่องตัดไม่สม่ำเสมอ รอยตัดเอียงไม่ได้ฉาก ผิวไม่เรียบ หรือเกิดเศษวัสดุเกาะที่บริเวณตัด เป็นต้น ดังนั้นการวิเคราะห์ผลกระทบของพารามิเตอร์ต่างๆ และการหาค่าที่เหมาะสม จึงเป็นปัจจัยสำคัญในการยกระดับคุณภาพของชิ้นงานและเพิ่มประสิทธิภาพการผลิต

เพื่อให้สามารถวิเคราะห์ผลกระทบของพารามิเตอร์การตัดได้อย่างครอบคลุมและเป็นระบบ งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นไปที่การศึกษาผลกระทบของกำลังเลเซอร์และความเร็วในการตัดต่อคุณภาพของการตัด PMMA ด้วยเครื่องตัดเลเซอร์ชนิดคาร์บอนไดออกไซด์ โดยนำการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูป (Full Factorial Design) มาใช้ในการวางแผนการทดลองและวิเคราะห์ผลด้วย ANOVA การ

ออกแบบลักษณะนี้มีจุดเด่นในการศึกษาผลกระทบของปัจจัยแบบเดี่ยวและแบบปฏิสัมพันธ์ (interaction effects) ระหว่างตัวแปรต้นหลายๆ ตัวแปรในเวลาเดียวกัน โดยสามารถคำนวณความแปรปรวน และทดสอบนัยสำคัญทางสถิติได้อย่างแม่นยำ [12] การวิเคราะห์เชิงสถิติในรูปแบบดังกล่าวได้รับความนิยมในงานวิจัยด้านกระบวนการผลิตและวัสดุศาสตร์ เนื่องจากสามารถนำไปสู่การหาชุดค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับกระบวนการผลิตจริง [9, 13] ทำให้ได้ผลการวิเคราะห์ที่แม่นยำและเป็นประโยชน์ต่อการประยุกต์ใช้งานในระดับอุตสาหกรรมต่อไป

## 2. ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

### 2.1 วัสดุและเครื่องมือในการทดลอง

ในการวิจัยครั้งนี้ วัสดุหลักที่ใช้คือ โพลิเมทิลเมทาคริเลต (Polymethylmethacrylate: PMMA) ซึ่งเป็นพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่มีความโปร่งใส มีความแข็งแรงเชิงกลในระดับที่เหมาะสม และสามารถตัดหรือขึ้นรูปได้ง่าย วัสดุ PMMA ที่ใช้มีความหนา 5 มิลลิเมตร และนำมาตัดให้เป็นชิ้นงานขนาด 20 × 20 มิลลิเมตร เพื่อใช้ในการทดลอง

การตัดชิ้นงานดำเนินการโดยใช้เครื่องตัดเลเซอร์ชนิดคาร์บอนไดออกไซด์ ($CO_2$ Laser Cutter machine) ในงานวิจัยนี้จะใช้คำว่า “เครื่องตัดเลเซอร์ $CO_2$” แทน “เครื่องตัดเลเซอร์ชนิดคาร์บอนไดออกไซด์” โดยเครื่องตัดเลเซอร์ $CO_2$ ที่ใช้คือ รุ่น AKJ1390 จากบริษัท ACCTEK ซึ่งเป็นเครื่องตัดเลเซอร์ที่ใช้แหล่งกำเนิดลำแสงจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ลำแสงเลเซอร์จากเครื่องนี้สามารถให้พลังงานสูงเพียงพอสำหรับการหลอมละลายและการระเหิดของ PMMA ได้อย่างมีประสิทธิภาพ รายละเอียดทางเทคนิคของเครื่องตัดเลเซอร์ $CO_2$ รุ่นดังกล่าว แสดงไว้ในตารางที่ 1 และลักษณะของเครื่องตัดเลเซอร์ $CO_2$ แสดงไว้ในรูปที่ 1 หลักการทำงานของเครื่องตัดเลเซอร์ $CO_2$ ได้นำเสนอไว้ในงานวิจัยก่อนหน้านี้ [14]

**ตารางที่ 1** ข้อกำหนดของเครื่องตัดเลเซอร์ $CO_2$

| Description | Parameter |
|---|---|
| Model | AKJ-1390 |
| Laser medium | $CO_2$ |
| Working area | 1300*900 mm |
| Laser Power | 100 w/130 w |
| Position accuracy | 0.01 mm |
| Repetition accuracy | 0.02 mm |
| Cutting speed | 150 mm/s |
| Control system | Ruida (USB interface) |
| Drive system | 3phase Stepper motor and driver |
| Cooling system | Water-cooling |




**รูปที่ 1** เครื่องตัดเลเซอร์ $CO_2$ ที่ใช้ในงานวิจัย

### 2.2 การทดสอบค่าความหยาบผิว

การวัดค่าความหยาบผิวของชิ้นงานในงานวิจัยนี้ดำเนินการโดยใช้เครื่องมือวัดความหยาบผิวแบบพกพา รุ่น SJ-210 (Mitutoyo, Japan) ซึ่งเป็นเครื่องมือที่ใช้ระบบหัววัดแบบสไตลัส (stylus-type) โดยพารามิเตอร์ที่ใช้ในการประเมินผลคือค่า Rz ซึ่งนิยามว่าเป็นผลรวมของค่าเฉลี่ยความสูงของยอดสูงสุดห้าอันดับแรก และความลึกของร่องต่ำสุดห้าอันดับแรกภายในช่วงการวัดหนึ่งช่วง (sampling length) ตามนิยามในมาตรฐาน ISO 4287 และ JIS B0601 ค่าดังกล่าวเป็นดัชนีที่เหมาะสมในการแสดงลักษณะความขรุขระของผิววัสดุ ก่อนทำการวัดชิ้นงานจะได้รับการทำความสะอาดและจัดวางให้อยู่ในตำแหน่งที่มั่นคงเพื่อลดผลกระทบจากการสั่นสะเทือน การวัดดำเนินการโดยให้หัววัดเคลื่อนที่ในแนวขนานกับพื้นผิวของชิ้นงาน เพื่อบันทึกรูปแบบของผิวและประมวลผลเป็นค่าความหยาบผิว ทั้งนี้ตำแหน่งในการวัดถูกกำหนดให้ครอบคลุมพื้นผิวทั้งสี่ด้านของชิ้นงาน โดยแต่ละด้านทำการวัดจำนวน 2 ตำแหน่ง รวมเป็น 8 ตำแหน่งต่อชิ้นงาน เพื่อเพิ่มความถูกต้องและความน่าเชื่อถือของข้อมูลที่ได้จากการวัด ผลที่ได้จะนำมาหาค่าเฉลี่ยความหยาบผิว

### 2.3 การทดสอบมุมเอียง

การทดสอบหาค่ามุมเอียงในงานวิจัยนี้ ดำเนินการวัดด้วยเครื่องวัดขนาดชิ้นงานแบบแสงเงา (Profile Projector) ยี่ห้อ Starrett รุ่น 400 Series เป็นกระบวนการตรวจสอบค่ามุมของชิ้นงานโดยอาศัยการฉายเงาของชิ้นงานขยายลงบนหน้าจอที่มีสเกลมุมอย่างแม่นยำ โดยวางชิ้นทดสอบบนแท่นวางซึ่งสามารถปรับตำแหน่งได้ในระนาบ XY แสงจากแหล่งกำเนิดจะส่องผ่านชิ้นงานผ่านชุดเลนส์ก่อนฉายภาพลงบนหน้าจอวงกลมที่มีสเกลเชิงมุมและเส้นอ้างอิง ผู้ปฏิบัติงาน

จะทำการหมุนภาพที่ฉายให้แนวเส้นอ้างอิงบนหน้าจออยู่ในแนวเดียวกับขอบที่ต้องการวัดของชิ้นงาน จากนั้นอ่านค่ามุมที่แสดงบนสเกลหรือตัวแสดงผลดิจิทัลของเครื่องวัด สำหรับการประเมินความเที่ยงตรงของรูปทรงชิ้นงาน ดำเนินการวัดมุมทั้งสี่ด้านของชิ้นทดสอบ เพื่อให้ได้ข้อมูลค่ามุมครบถ้วนและสามารถนำไปวิเคราะห์ความถูกต้องของการผลิตหรือการแปรรูปชิ้นงานได้อย่างเป็นระบบ

**2.4 สถิติที่ใช้ในงานวิจัย**

เพื่อให้สามารถวิเคราะห์ผลกระทบของแต่ละพารามิเตอร์ได้อย่างละเอียดถี่ถ้วน งานวิจัยนี้เลือกใช้การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูป (Full Factorial Design) ซึ่งเป็นเทคนิคที่ช่วยให้สามารถประเมินผลของแต่ละปัจจัยรวมถึงปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยได้อย่างครบถ้วน โดยกำหนดปัจจัยในการทดลองจำนวน 3 ปัจจัย แต่ละปัจจัยมี 3 ระดับ ดังตารางที่ 2 การทดลองมีจำนวนทั้งสิ้น 27 ชุดการทดลอง ($3^3$) โดยใช้การทดลองแบบสุ่ม เพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือและลดผลกระทบจากความแปรปรวนที่ไม่สามารถควบคุมได้ ซึ่งช่วยให้สามารถวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนและระบุค่าที่เหมาะสมของแต่ละพารามิเตอร์ได้อย่างชัดเจน

**ตารางที่ 2** ปัจจัยและระดับของปัจจัยในการทดลอง

| ปัจจัย | ระดับของปัจจัย | | | หน่วย |
|---|---|---|---|---|
| | ต่ำ (-1) | กลาง (0) | สูง (+1) | |
| ความเร็วในการตัด | 3 | 5 | 7 | mm/sec |
| กำลังเลเซอร์ | 50 | 70 | 90 | % |
| ระยะห่าง Nozzle | 12 | 14 | 16 | mm |
| **ตัวแปรตอบสนอง** | ความหยาบผิว มุมเอียงเฉลี่ย | | | |

**2.5 การยืนยันผลการทดลอง**

เมื่อได้ปัจจัยการทดลองที่ทำให้ค่าความหยาบผิวต่ำที่สุดและมุมเอียงเข้าใกล้ 90 องศาที่สุดแล้ว เพื่อยืนยันผลความถูกต้องของการทดลอง ชิ้นงานใหม่จำนวน 10 ชิ้นจะถูกตัดเพื่อวัดค่าความหยาบผิว (8 ตำแหน่งต่อชิ้นงาน) และมุมเอียง (4 ตำแหน่งต่อชิ้นงาน) จากนั้นจึงนำค่าที่ได้มาหาค่าเฉลี่ยและค่าความคลาดเคลื่อน กำหนดให้ค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้น้อยกว่า 10 เปอร์เซ็นต์

## 3. ผลการทดลอง

**3.1 ผลของค่าความหยาบผิวและมุมเอียงเฉลี่ย**

งานวิจัยนี้ใช้วิธีการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูป (Full Factorial Design) เพื่อประเมินผลกระทบหลัก (Main Effects) และผลกระทบจากปฏิสัมพันธ์ (Interaction Effects) ของตัวแปรควบคุม 3 ปัจจัย ได้แก่ ความเร็วในการตัด, กำลังเลเซอร์, และระยะห่างหัวตัด ที่ส่งผลต่อตัวแปรตาม 2 ตัว คือ ค่าความหยาบผิวและมุมเอียงของชิ้นงาน ชิ้นงานจำนวน 27 ชิ้น จะถูกตัดด้วยเครื่องตัดเลเซอร์ $CO_2$ โดยมีการปรับระดับปัจจัยต่างๆ ตามลำดับ (Run) ในแผนการทดลองที่ออกแบบไว้ จากนั้นจึงนำชิ้นงานที่ได้ไปวัดค่าความหยาบผิวและมุมเอียง เพื่อคำนวณหาค่าเฉลี่ยของตัวแปรตามทั้งสอง ซึ่งผลการวัดค่าความหยาบผิวเฉลี่ยและมุมเอียงเฉลี่ย แสดงในตารางที่ 3

**ตารางที่ 3** ผลของค่าความหยาบผิวเฉลี่ยและมุมเอียงเฉลี่ย

| Run | ความเร็วในการตัด (mm/sec) | กำลังเลเซอร์สูงสุด (%) | ระยะห่าง Nozzle (mm) | ความหยาบผิวเฉลี่ย (μm) | มุมเอียงเฉลี่ย (องศา) |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 5 | 90 | 14 | 1.367 | 90.77 |
| 2 | 5 | 50 | 12 | 1.001 | 90.65 |
| 3 | 3 | 70 | 16 | 0.768 | 90.45 |
| 4 | 3 | 90 | 16 | 0.769 | 90.04 |
| 5 | 7 | 90 | 16 | 2.068 | 91.24 |
| 6 | 3 | 50 | 14 | 0.808 | 90.15 |
| 7 | 7 | 70 | 16 | 1.702 | 91.21 |
| 8 | 7 | 70 | 14 | 1.642 | 90.92 |
| 9 | 3 | 70 | 14 | 1.705 | 90.45 |
| 10 | 5 | 90 | 12 | 1.239 | 90.59 |
| 11 | 7 | 90 | 12 | 1.611 | 90.77 |
| 12 | 5 | 70 | 16 | 1.516 | 91.17 |

| Run | ความเร็วในการตัด (mm/sec) | กำลังเลเซอร์สูงสุด (%) | ระยะห่าง Nozzle (mm) | ความหยาบผิวเฉลี่ย (µm) | มุมเอียงเฉลี่ย (องศา) |
|---|---|---|---|---|---|
| 13 | 3 | 90 | 12 | 0.556 | 90.32 |
| 14 | 5 | 50 | 14 | 1.459 | 90.79 |
| 15 | 7 | 90 | 14 | 1.783 | 91.01 |
| 16 | 3 | 50 | 12 | 0.746 | 90.59 |
| 17 | 5 | 70 | 14 | 1.202 | 90.70 |
| 18 | 7 | 50 | 14 | 1.385 | 91.13 |
| 19 | 5 | 50 | 16 | 1.544 | 90.90 |
| 20 | 3 | 90 | 14 | 0.736 | 90.45 |
| 21 | 7 | 50 | 12 | 1.111 | 90.63 |
| 22 | 5 | 70 | 12 | 1.104 | 90.44 |
| 23 | 3 | 70 | 12 | 0.645 | 90.50 |
| 24 | 5 | 90 | 16 | 1.291 | 91.09 |
| 25 | 7 | 70 | 12 | 1.447 | 90.79 |
| 26 | 3 | 50 | 16 | 0.832 | 90.14 |
| 27 | 7 | 50 | 16 | 1.854 | 91.57 |

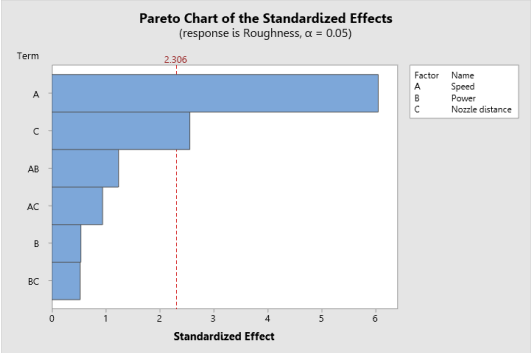
**3.2 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) สำหรับค่าความหยาบผิวเฉลี่ย**

ตารางที่ 4 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) สำหรับค่าความหยาบผิวเฉลี่ย พบว่า รูปแบบ (Model) โดยรวมมีผลต่อความแตกต่างของค่าความหยาบผิวอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติและสามารถอธิบายความแปรปรวนของค่าความหยาบผิวได้ถึง 90.74 เปอร์เซ็นต์ (R-sq) อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาผลกระทบหลัก (Main effect) ของแต่ละปัจจัย พบว่า ความเร็วในการตัดและระยะห่างหัวตัดส่งผลให้ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่กำลังเลเซอร์ไม่มีผลต่อความแตกต่างของค่าความหยาบผิวเฉลี่ยอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ผลจากปฏิสัมพันธ์ (Interaction Effects) ระหว่างตัวแปรควบคุมทั้งสามคู่ (ความเร็วในการตัด*กำลังเลเซอร์, ความเร็วในการตัด* ระยะห่างหัวตัด, กำลังเลเซอร์* ระยะห่างหัวตัด) ไม่มีผลต่อความแตกต่างของค่าความหยาบผิวเฉลี่ย (ทุกคู่มี P-value > 0.05) ซึ่งบ่งชี้ว่า ผลกระทบหลักของแต่ละปัจจัยสามารถพิจารณาแยกกันได้โดยไม่มีปฏิสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญ สำหรับความเร็วในการตัดมีค่า F-value สูงที่สุดในบรรดาปัจจัยหลักทั้งหมด ซึ่งบ่งชี้ว่าความเร็วในการตัดมีผลต่อความแตกต่างของค่าความหยาบผิวเฉลี่ยมากที่สุดเมื่อเทียบกับระยะห่างหัวตัดและกำลังเลเซอร์ สำหรับค่า R-sq(adj) ที่ 69.89 เปอร์เซ็นต์ แสดงให้เห็นว่า โมเดลนี้สามารถอธิบายความแปรปรวนของค่าความหยาบผิวได้ในระดับที่ค่อนข้างดี

**ตารางที่ 4** ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของค่าความหยาบผิวเฉลี่ย

| Source | DF | Adj SS | Adj MS | F-Value | P-Value |
|---|---|---|---|---|---|
| Model | 18 | 4.16527 | 0.23140 | 4.35 | 0.020 |
| Linear | 6 | 3.40528 | 0.56755 | 10.68 | 0.002 |
| ความเร็วในการตัด (A) | 2 | 2.78210 | 1.39105 | 26.16 | 0.000 |
| กำลังเลเซอร์ (B) | 2 | 0.05708 | 0.02854 | 0.54 | 0.604 |
| ระยะห่างหัวตัด (C) | 2 | 0.56610 | 0.28305 | 5.32 | 0.034 |
| 2-Way Interactions | 12 | 0.75999 | 0.06333 | 1.19 | 0.413 |
| ความเร็วในการตัด*กำลังเลเซอร์ (AB) | 4 | 0.35294 | 0.08823 | 1.66 | 0.251 |
| ความเร็วในการตัด*ระยะห่างหัวตัด (AC) | 4 | 0.25884 | 0.06471 | 1.22 | 0.375 |
| กำลังเลเซอร์*ระยะห่างหัวตัด (BC) | 4 | 0.14822 | 0.03705 | 0.70 | 0.615 |
| Error | 8 | 0.42532 | 0.05316 | | |
| Total | 26 | 4.59059 | | | |
| **S**=0.230575 | | **R-sq**=90.74% | | **R-sq(adj)**= 69.89 | |

จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ดังตารางที่ 4 ที่ระบุว่า ความเร็วในการตัดและระยะห่างหัวตัดส่งผลให้ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยแตกต่างกันและสอดคล้องกับแผนภาพพาเรโตของผลกระทบแบบมาตรฐานของค่าความหยาบผิว (รูปที่ 2) โดยความเร็วในการตัด (A) มีความยาวของแท่งกราฟเกินเส้นอ้างอิง (2.306 ที่ระดับนัยสำคัญ $\alpha$=0.05) มากที่สุด บ่งชี้ว่าความเร็วในการตัดมีผลต่อความแตกต่างของค่าความหยาบผิวเฉลี่ยมากที่สุดเมื่อเทียบกับปัจจัยอื่นๆ ส่วนระยะห่างหัวตัด (C) นั้นมีแท่งกราฟที่มีความยาวเกินเส้นอ้างอิงเช่นกัน ยืนยันว่าปัจจัยนี้ส่งผลให้ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยแตกต่างกัน ในขณะที่กำลังเลเซอร์ (B) และผลจากปฏิสัมพันธ์ (AB, AC, BC) มีความยาวของแท่งกราฟสั้นกว่าเส้นอ้างอิงอย่างชัดเจน ซึ่งยืนยันว่าปัจจัยเหล่านี้ไม่มีผลต่อความแตกต่างของค่าความหยาบผิวเฉลี่ยอย่างมีนัยสำคัญ การสังเกตนี้สอดคล้องกับค่า P-value ที่สูงกว่า 0.05 ดังนั้นทั้งตารางที่ 4 และรูปที่ 2 จึงให้ข้อสรุปที่เป็นไปในทิศทางเดียวกัน โดยชี้ให้เห็นว่า ความเร็วในการตัดและระยะห่างหัวตัดเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลให้ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่กำลังเลเซอร์และผลจากปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่างๆ ไม่มีผลกระทบต่อความแตกต่างของค่าความหยาบผิวเฉลี่ยอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ




**รูปที่ 2** แผนภาพพาเรโตแสดงผลกระทบแบบมาตรฐานของค่าความหยาบผิว

### 3.3 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) สำหรับมุมเอียงเฉลี่ย

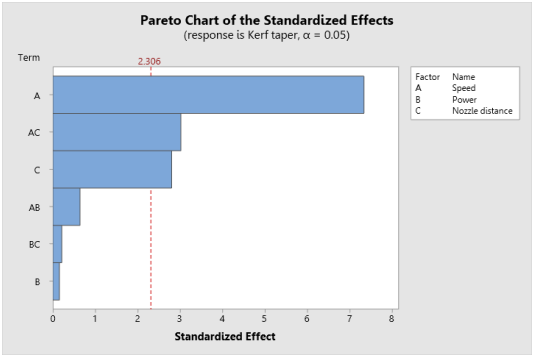
จากตารางที่ 5 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) สำหรับมุมเอียงเฉลี่ย พบว่า รูปแบบ (Model) โดยรวมมีผลต่อความแตกต่างของค่ามุมเอียงเฉลี่ยอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และสามารถอธิบายความแปรปรวนของค่ามุมเอียงได้ถึง 93.61 เปอร์เซ็นต์ เมื่อพิจารณาผลกระทบหลัก (Main Effect) ของแต่ละปัจจัย พบว่า ความเร็วในการตัดและระยะห่างหัวตัดส่งผลให้ค่ามุมเอียงเฉลี่ยแตกต่างกัน ในขณะที่กำลังเลเซอร์ไม่มีผลต่อความแตกต่างของค่ามุมเอียงเฉลี่ย นอกจากนี้ผลจากปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรควบคุมพบว่า มีเพียงปฏิสัมพันธ์ระหว่างความเร็วในการตัดและระยะห่างหัวตัดเท่านั้นที่ส่งผลให้ค่ามุมเอียงเฉลี่ยแตกต่างกัน ส่วนปฏิสัมพันธ์คู่อื่นๆ ไม่มีผลต่อความแตกต่างของค่ามุมเอียงเฉลี่ยอย่างมีนัยสำคัญ ค่า F-value สำหรับความเร็วในการตัดมีค่าสูงที่สุดในบรรดาปัจจัยทั้งหมด บ่งชี้ว่า ความเร็วในการตัดมีผลต่อความแตกต่างของค่ามุมเอียงเฉลี่ยมากที่สุด รองลงมาคือปฏิสัมพันธ์ระหว่างความเร็วในการตัดและระยะห่างหัวตัด และระยะห่างหัวตัด ตามลำดับ ค่า R-sq(adj) ที่ 79.22 เปอร์เซ็นต์ แสดงให้เห็นว่าโมเดลนี้สามารถอธิบายความแปรปรวนของค่ามุมเอียงได้ในระดับที่ดี

**ตารางที่ 5** ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของมุมเอียงเฉลี่ย

| Source | DF | Adj SS | Adj MS | F-Value | P-Value |
|---|---|---|---|---|---|
| Model | 18 | 3.35878 | 0.18660 | 6.51 | 0.005 |
| Linear | 6 | 2.54984 | 0.42497 | 14.82 | 0.001 |
| ความเร็วในการตัด (A) | 2 | 2.18450 | 1.09225 | 38.09 | 0.000 |
| กำลังเลเซอร์ (B) | 2 | 0.00747 | 0.00374 | 0.13 | 0.880 |
| ระยะห่างหัวตัด (C) | 2 | 0.35787 | 0.17894 | 6.24 | 0.023 |
| 2-Way Interactions | 12 | 0.80893 | 0.06741 | 2.35 | 0.116 |
| ความเร็วในการตัด*กำลังเลเซอร์ (AB) | 4 | 0.09588 | 0.02397 | 0.84 | 0.539 |
| ความเร็วในการตัด*ระยะห่างหัวตัด (AC) | 4 | 0.67308 | 0.16827 | 5.87 | 0.017 |

| Source | DF | Adj SS | Adj MS | F-Value | P-Value |
|---|---|---|---|---|---|
| กำลังเลเซอร์*ระยะห่างหัวตัด (BC) | 4 | 0.03997 | 0.00999 | 0.35 | 0.838 |
| Error | 8 | 0.22941 | 0.02868 | | |
| Total | 26 | 3.58819 | | | |
| S=0.169340 | | R-sq=93.61% | | R-sq(adj)= 79.22% | |

จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ดังตารางที่ 5 ที่ระบุว่า ความเร็วในการตัด (A) และระยะห่างหัวตัด (C) รวมถึงผลจากปฏิสัมพันธ์ระหว่างความเร็วในการตัด*ระยะห่างหัวตัด (AC) ส่งผลให้ค่ามุมเอียงเฉลี่ยแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญและสอดคล้องกับแผนภาพพาเรโตของผลกระทบแบบมาตรฐาน (รูปที่ 3) โดยความเร็วในการตัด (A) มีความยาวของแท่งกราฟเกินเส้นอ้างอิง (2.306 ที่ระดับนัยสำคัญ $\alpha$=0.05) มากที่สุด บ่งชี้ว่าปัจจัยนี้มีผลต่อความแตกต่างของค่ามุมเอียงเฉลี่ยมากที่สุด ระยะห่างหัวตัด (C) และผลจากปฏิสัมพันธ์ระหว่างความเร็วในการตัด*ระยะห่างหัวตัด (AC) มีแท่งกราฟที่มีความยาวเกินเส้นอ้างอิงเช่นกัน ยืนยันว่าปัจจัยทั้งสองนี้ส่งผลให้ค่ามุมเอียงเฉลี่ยแตกต่างกันในขณะที่กำลังเลเซอร์ (B) และผลจากปฏิสัมพันธ์คู่อื่นๆ (AB, BC) มีความยาวของแท่งกราฟสั้นกว่าเส้นอ้างอิงอย่างชัดเจน ซึ่งยืนยันว่าปัจจัยเหล่านี้ไม่มีผลต่อความแตกต่างของค่ามุมเอียงเฉลี่ย การสังเกตนี้สอดคล้องกับค่า P-value ที่สูงกว่า 0.05 ในตาราง ANOVA ดังนั้นทั้งตารางที่ 5 และรูปที่ 3 จึงให้ข้อสรุปที่เป็นไปในทิศทางเดียวกัน โดยชี้ให้เห็นว่าความเร็วในการตัดเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลให้ค่ามุมเอียงเฉลี่ยแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ยังมีผลจากระยะห่างหัวตัด (C) และปฏิสัมพันธ์ระหว่างความเร็วในการตัด* ระยะห่างหัวตัด (AC) ที่ส่งผลให้ค่ามุมเอียงเฉลี่ยแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติอีกด้วย



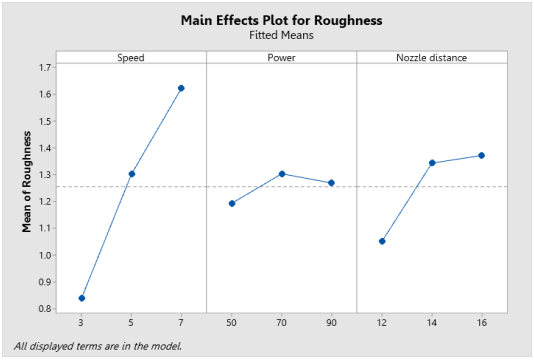

**รูปที่ 3** แผนภูมิพาเรโตแสดงผลกระทบแบบมาตรฐานของความเร็วในการตัดในการตัด กำลังเลเซอร์และระยะห่างหัวตัด ต่อมุมเอียง

**3.4 ผลการวิเคราะห์ผลกระทบหลักสำหรับค่าความหยาบผิวและมุมเอียงเฉลี่ย**

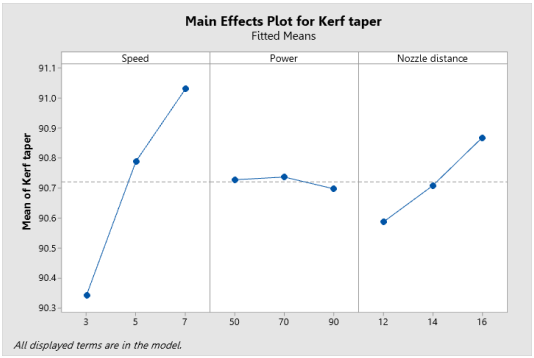
รูปที่ 4(a) แสดงผลการวิเคราะห์กราฟผลกระทบหลักสำหรับค่าความหยาบผิว (Main Effects Plot for Roughness) พบว่า ปัจจัยที่มีอิทธิพลอย่างชัดเจนต่อค่าความหยาบผิว คือ ความเร็วในการตัด โดยเมื่อเพิ่มค่าความเร็วในการตัดจาก 3 มิลลิเมตรต่อวินาที เป็น 7 มิลลิเมตรต่อวินาที ค่าความหยาบผิวเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญจาก 0.84 เป็น 1.62 ไมโครเมตร ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ความเร็วในการตัดที่สูงขึ้นทำให้คุณภาพผิวงานลดลง เนื่องจากเวลาในการสัมผัสระหว่างลำแสงเลเซอร์กับชิ้นงานลดลง ส่งผลให้เกิดความไม่เรียบเนียนบนพื้นผิว [15, 16] สำหรับปัจจัยกำลังเลเซอร์ พบว่า มีผลกระทบต่อความหยาบผิวเพียงเล็กน้อย โดยค่าความหยาบผิวเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเมื่อกำลังเลเซอร์เพิ่มขึ้นจาก 50 เปอร์เซ็นต์ เป็น 90 เปอร์เซ็นต์ แสดงถึงอิทธิพลในระดับต่ำในช่วงค่าที่ทำการทดลอง ส่วนปัจจัยด้านระยะห่างหัวตัด ส่งผลต่อความหยาบผิวในระดับปานกลาง โดยค่าความหยาบผิวเพิ่มขึ้นตามระยะห่างหัวตัดที่มากขึ้น ซึ่งบ่งชี้ว่าระยะห่างหัวตัดมีผลต่อความหยาบผิวอย่างมีนัยสำคัญและอาจมีระยะที่เหมาะสมในการลดความหยาบของพื้นผิว ทั้งนี้ลักษณะของเส้นกราฟช่วยยืนยันว่า ความชันของแต่ละปัจจัยสะท้อนถึงระดับผลกระทบต่อค่าความหยาบผิวโดยที่ความเร็วในการตัดมีความชันสูงสุด รองลงมาคือระยะห่างหัวตัดและต่ำสุดคือกำลังเลเซอร์ จากข้อมูลนี้อาจกล่าวได้ว่า การควบคุมความเร็วในการตัดของเครื่องจักรมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อคุณภาพผิวของชิ้นงาน

รูปที่ 4(b) แสดงผลการวิเคราะห์จากกราฟผลกระทบปัจจัยหลักสำหรับมุมเอียง (Main Effects Plot for kerf Taper) สามารถอธิบายได้ว่า ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อค่ามุมเอียงอย่างมีนัยสำคัญมากที่สุดคือ ความเร็วในการตัด โดยเมื่อความเร็วในการตัดเพิ่มขึ้นจาก 3 มิลลิเมตรต่อวินาที เป็น 7 มิลลิเมตรต่อวินาที ค่าเฉลี่ยของมุมเอียงเพิ่มขึ้นจาก 90.34 องศา เป็น 91.03 องศา แสดงให้เห็นว่า ความเร็วในการตัดที่สูงขึ้นมีแนวโน้มทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงมุมเอียงมากขึ้น อาจเนื่องจากการเร่งความเร็วในการตัดของกระบวนการทำให้เกิดความไม่สม่ำเสมอของการตัด [17, 18] ส่วนกำลัง

เลเซอร์มีแนวโน้มส่งผลต่อมุมเอียงในระดับต่ำ ค่าเฉลี่ยของมุมเอียงมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย โดยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยในช่วงแรกและลดลงเล็กน้อยในช่วงหลัง แสดงให้เห็นว่า กำลังเลเซอร์อาจมีอิทธิพลต่อมุมเอียงไม่มากนักในช่วงนี้ หรืออาจมีความสัมพันธ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นตรง โดยเส้นกราฟค่อนข้างแบนแสดงถึงความเปลี่ยนแปลงของค่ามุมเอียงเฉลี่ยที่ไม่มากนักในช่วงกำลังเลเซอร์อยู่ระหว่าง 50 เปอร์เซ็นต์ ถึง 90 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kerchagias [3] ที่กล่าวว่า การเปลี่ยนแปลงกำลังของเลเซอร์ ไม่ส่งผลต่อลักษณะของรอยตัด ด้านระยะห่างหัวตัด มีผลกระทบในระดับปานกลางต่อมุมเอียงโดยพบว่า การเพิ่มระยะห่างของหัวตัดจาก 12 มิลลิเมตร เป็น 16 มิลลิเมตร ทำให้ค่ามุมเอียงเพิ่มขึ้น ซึ่งอาจเกี่ยวข้องกับการกระจายของพลังงานหรือทิศทางของการตัดวัสดุที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อตำแหน่งหัวตัดอยู่ไกลจากชิ้นงาน [19] ข้อมูลจากกราฟชี้ให้เห็นว่า การควบคุมความเร็วในการตัดของกระบวนการเป็นปัจจัยสำคัญที่ควรให้ความสำคัญอย่างยิ่งเมื่อต้องการควบคุมค่ามุมเอียงให้อยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสม




(a)

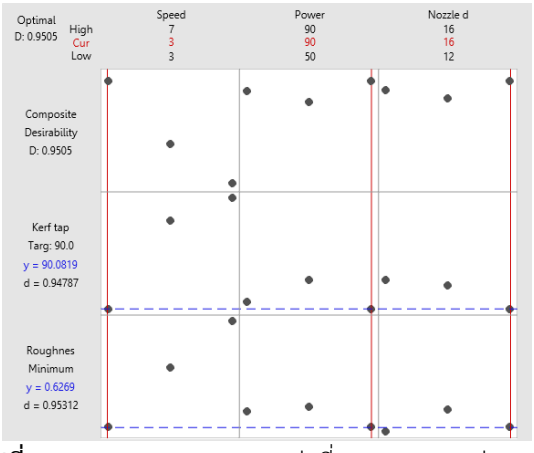



(b)

**รูปที่ 4** ผลกระทบของปัจจัยหลักต่อ (a) ค่าความหยาบผิว และ (b) มุมเอียง

### 3.5 ผลการวิเคราะห์หาค่าที่เหมาะสมของค่าความหยาบผิวและมุมเอียงเฉลี่ย

รูปที่ 5 ผลการวิเคราะห์ Response Optimization นี้ แสดงให้เห็นถึงการหาค่าตัวแปรควบคุมที่เหมาะสมที่สุด เพื่อให้ได้ค่า Composite Desirability สูงสุดที่ 0.9692 ตัวแปรควบคุมที่พิจารณาคือ ความเร็วในการตัด, กำลังเลเซอร์ และ ระยะห่างหัวตัด ซึ่งมีค่าปัจจุบัน (Cur) อยู่ที่ 3, 90 และ 16 ตามลำดับ โดยมีช่วงค่าสูง (High) และค่าต่ำ (Low) กำกับไว้ กราฟด้านบนแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Desirability ของแต่ละ Response (มุมเอียงและความหยาบผิว) กับค่าตัวแปรควบคุมแต่ละตัว โดยเส้นประสีน้ำเงินแสดงค่าเป้าหมาย (Target = 90) ของมุมเอียงที่ 90.0819 และค่าความหยาบผิว (Minimum) ที่ 0.6269 จุดสีดำแสดงค่า Desirability ที่สอดคล้องกับค่าตัวแปรควบคุมแต่ละชุด จากการวิเคราะห์พบว่า ค่าตัวแปรควบคุมปัจจุบันให้ค่า Desirability สำหรับมุมเอียงเท่ากับ 0.94787 และสำหรับความหยาบผิวเท่ากับ 0.95312 ซึ่งเมื่อนำมารวมกันเป็น Composite Desirability ได้ค่าสูงถึง 0.9505 บ่งชี้ว่าค่าตัวแปรควบคุมปัจจุบันนี้เป็นชุดค่าที่เหมาะสมที่สุดภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด ทำให้ได้ค่ามุมเอียงและความหยาบผิวที่ใกล้เคียงกับค่าเป้าหมายที่ตั้งไว้มากที่สุด




**รูปที่ 5** แสดงผลการทดสอบหาค่าที่เหมาะสมของค่าความหยาบผิวและมุมเอียงต่ำสุด

### 3.6 ยืนยันผลการทดลอง

ผลจากการทดสอบหาค่าที่เหมาะสมสำหรับการตัดวัสดุ PMMA ที่ทำให้ค่าความหยาบผิวต่ำสุดและมุมเอียงเข้าใกล้ 90 องศามากที่สุด (รูปที่ 5) คือ การตัดที่ใช้ความเร็วในการตัด 3 มิลลิเมตรต่อวินาที กำลังเลเซอร์ 90 เปอร์เซ็นต์ และระยะห่างหัวตัด 16 มิลลิเมตร ซึ่งค่าเหล่านี้จะถูกนำไปปรับตั้งบน เครื่องตัดเลเซอร์ $CO_2$ และทำการตัดชิ้นงานใหม่อีกครั้งจำนวน 10 ชิ้น และดำเนินการวัดค่าความหยาบผิว

และมุมเอียงซ้ำ จากนั้นหาค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ผลการวัดค่าความหยาบผิวและมุมเอียงเฉลี่ยซ้ำแสดงดังตารางที่ 6

**ตารางที่ 6** ผลการวัดค่าความหยาบผิวและมุมเอียงเฉลี่ยซ้ำ

| | **ชิ้นงานตัวอย่าง** | | | | | | | | | | **Average** | **S.D.** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | | |
| ความหยาบผิว | 0.652 | 0.736 | 0.916 | 0.625 | 0.672 | 0.437 | 0.723 | 0.811 | 0.452 | 0.584 | 0.661 | 0.148 |
| มุมเอียง | 90.23 | 89.76 | 90.31 | 90.57 | 89.55 | 90.12 | 90.73 | 90.12 | 89.66 | 90.22 | 90.127 | 0.378 |

จากตารางที่ 6 ผลการวัดซ้ำเพื่อหาค่าความหยาบผิวและมุมเอียงเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของชิ้นงานตัวอย่าง แสดงให้เห็นว่า ค่าความหยาบผิวของชิ้นงานตัวอย่างทั้ง 10 ชิ้น มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.661 ไมโครเมตร ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.148 ซึ่งแตกต่างจากค่าความหยาบผิวที่ได้จากค่าตัวแปรควบคุมที่เหมาะสม (0.6269) อยู่ 0.0341 ไมโครเมตร คิดเป็นร้อยละ 5.44 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ และมุมเอียงของชิ้นงานตัวอย่าง มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 90.127 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.378 ซึ่งแตกต่างจากมุมเอียงที่ได้จากค่าตัวแปรควบคุมที่เหมาะสม (90.0819) อยู่ 0.045 ไมโครเมตร คิดเป็นร้อยละ 0.05 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

## 4. สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาถึงผลกระทบของปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการตัดของวัสดุ PMMA โดยใช้เลเซอร์ $CO_2$ ปัจจัยควบคุมที่นำมาพิจารณาประกอบด้วย 3 ปัจจัย ได้แก่ ความเร็วในการตัด กำลังเลเซอร์และระยะห่างหัวตัด ที่ส่งผลต่อค่าความหยาบผิวและมุมเอียง โดยใช้การออกแบบแบบแฟกทอเรียลเต็มรูปมาใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล ผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

1. ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) สำหรับความหยาบผิวและมุมเอียง พบว่า ปัจจัยด้านความเร็วตัดและระยะห่างหัวตัดมีผลต่อความแตกต่างของค่าความหยาบผิวเฉลี่ยและมุมเอียงอย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่กำลังเลเซอร์และปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรควบคุมทั้งสาม ไม่มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญ

2. เมื่อพิจารณากราฟอิทธิพลหลักของความหยาบผิวและมุมเอียง พบว่า ผลการวิเคราะห์สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) กล่าวคือ ปัจจัยที่มีอิทธิพลอย่างชัดเจนต่อค่าความหยาบผิวและมุมเอียง คือ ความเร็วในการตัด ความเร็วในการตัดที่สูงขึ้นทำให้ความหยาบผิวเฉลี่ยมุมเอียงเพิ่มมากขึ้น

3. ค่าที่เหมาะสมสำหรับการตัด PMMA ที่ทำให้ค่าความหยาบผิวต่ำสุดและมุมเอียงเข้าใกล้ 90 องศาที่สุดคือ การตัดที่ความเร็วตัด 3 มิลลิเมตรต่อวินาที กำลังเลเซอร์ 90 เปอร์เซ็นต์ และระยะห่างหัวตัด 16 มิลลิเมตร

4. การทดสอบเพื่อยืนยันผล พบว่า ค่าความหยาบผิวและมุมเอียงอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ คือมีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 10 เปอร์เซ็นต์

## 5. ข้อเสนอแนะ

1. ในการพิจารณาตัวแปรควบคุม อาจนำปัจจัยอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการตัดเลเซอร์มาพิจารณาเพิ่มเติม เช่น ความดันก๊าซ ชนิดของก๊าซช่วยตัด ขนาดรู Nozzle จำนวนครั้งการตัด เป็นต้น ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อคุณภาพการตัดบนวัสดุ PMMA

2. ควรมีการพิจารณาตัวแปรตอบสนองที่สำคัญต่อคุณภาพชิ้นงานอื่นๆ เพิ่มเติม เช่น อัตราการกำจัดวัสดุ, HAZ หรือความถูกต้องของขนาดหลังการตัด เป็นต้น

## 6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการและโลจิสติกส์ โครงการจัดตั้งคณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏชัยภูมิ ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้เครื่องวัดความหยาบผิว ขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้เครื่องวัดขนาดชิ้นงานแบบแสงเงา (Profile projector) และขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมการผลิตอัตโนมัติ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏราชนครินทร์ ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือ สถานที่ และสิ่งอำนวยความสะดวกต่างๆ ให้กับทีมงานวิจัย จนงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

## 7. ข้อเสนอแนะเพิ่มเติม

ข้อเสนอแนะในการทำงานวิจัยต่อไปในอนาคต ผู้เขียนเสนอให้ใช้เครือข่ายประสาทเทียมเพื่อทำนายลักษณะรอยตัดเพิ่มเติม เช่น ขนาดร่องตัดเฉลี่ยและความลึกของโซน HAZ นอกจากนี้ ยังแนะนำให้ศึกษาเรื่องความหนาของ PMMA เพิ่มเติมอีกด้วย

## 8. เอกสารอ้างอิง


[1] S. Sudarsono, Y. Gatut, S. Hasto, P. Gontjang, A. Diky, P. Nurrisma, I. Susilo, F. Iim, A. Yunus and H. Yono, “Design and fabrication of optical waveguide as directional coupler using laser cutting $CO_2$ on acrylic substrate,” *Journal of Physics Conference Series*, vol.1153, no.1, 2019.

[2] R. N. Hwayyin and A. S. Hammood, “Improving the Properties of Acrylic by Creating Crack Using Laser Beam,” in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Institute of Physics Publishing, April. 10-11, 2019, pp. 1-10.

[3] J. D. Kechagias, K. Ninikas, P. Stavropoulos, and K. Salonitis, “A Generalised Approach on Kerf Geometry Prediction during $CO_2$ Laser cut of PMMA Thin Plates using Neural Networks,” *Lasers in Manufacturing and Materials Processing*, vol. 8, no. 3, Aug. 2021, pp. 372-393.

[4] S. S. Wangikar, M. M. Dixit, S. G. Wadekar, H. R. Nagtilak, N. D. Hingmire, and D. P. Shinde, “Parametric Influence Study for Laser Cutting on Acrylic,” in *Proceedings of National Conference on Relevance of Engineering and Science for Environment and Society*, AIJR Publisher, July. 25, 2021, pp. 104-107.

[5] M. Moradi, M. Moghadam, M. Shamsborhan, Z. Beiranvand, A. Rasouli, M. Vahdati, A. Bakhtiari and M .Bodaghi, “Simulation, statistical modeling, and optimization of $CO_2$ laser cutting process of polycarbonate sheets,” *Optik (Stuttg)*, vol. 225, Jan. 2021, Art. no. 164932.

[6] S. Ürgün, H. Yiğit, S. Fidan, and T. Sınmazçelik, “Optimization of Laser Cutting Parameters for PMMA Using Metaheuristic Algorithms,” *Arabian Journal for Science and Engineering*, vol. 49, no. 9, Sep. 2024, pp. 12333-12355.

[7] M. Moradi, M. Rezayat, S. Meiabadi, M. Karamimoghadam, S. Hillyard, A. Mateo, G. Casalino, Z. Tanveer, M. Adnan Manzoor, M. Iqbal and O. Razmkhah, “Capability Enhancing of $CO_2$ Laser Cutting for PMMA Sheet Using Statistical Modeling and Optimization,” *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 13, no. 23, Dec. 2023, Art. no. 12601.

[8] K. Aydın and L. Uğur, “Prediction of Kerf and Groove Widths in $CO_2$ Laser Cutting Process of PMMA Using Experimental and Machine Learning Methods,” *Exp Tech*, vol. 49, no.17, pp. 873-886, Mar.2025.

[9] A. M. Varsi and A. H. Shaikh, “Experimental and statistical study on kerf taper angle during $CO_2$ laser cutting of thermoplastic material,” *J Laser Appl*, vol. 31, no. 3, Aug. 2019, Art. no. 032010.

[10] E. KURT, U. E. KARAÇAY, and M. TUTAR, “Investigation of the effect of process parameters in $Co_2$ laser cutting of PMMA material by response surface method,” *Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering*, vol. 28, no. 2, Art. no. 20223

[11] S. S. Patel, V. H. Patel, K. M. Patel, B. A. Patel, A. A. Patel, and S. C. Patel, “Experimental Analysis of Laser Cutting Machine,” *International Journal of Engineering Research & Technology*, vol. 10, no. 04, pp. 129-135, April. 2021.

[12] Douglas C. Montgomery, *Design and Analysis of Experiments*, 9th ed. John Wiley & Sons, 2017.

[13] A. B. Khoshaim, A. H. Elsheikh, E. B. Moustafa, M. Basha, and E. A. Showaib, “Experimental investigation on laser cutting of PMMA sheets: Effects of process factors on kerf characteristics,” *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 11, pp. 235-246, Mar. 2021.

[14] W. Taptimdee, B. Meesa, and P. Chourwong, “Optimal Value of Factors affecting Surface Roughness and Workpiece Dimension on Acrylic Cutting with a $CO_2$ Laser Cutter Machine Using the Taguchi Method,” *Research on Modern science and Utilizing Technological Innovation Journal (RMUTI Journal) RMUTI Journal*, vol. 17, no. 2, pp. 1-16, Jun. 2024.

[15] K. Ninikas, J. Kechagias, and K. Salonitis, “The impact of process parameters on surface roughness and dimensional accuracy during $CO_2$ laser cutting of PMMA thin sheets,” *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, vol. 5, no. 3, pp. 1-12, Sep. 2021.

[16] N. S. Isnin, S. M. F. Sh Abdul Nasir, A. R. Hemdi, H. Ismail,H. Yusoff, and R. Nurmalasari, “The effect of $CO_2$ laser engraves parameters on surface roughness on polymethylmethacrylate (PMMA),” *Jurnal Mekanikal*, vol. 46, no. 2, pp. 114-121, Nov. 2023.

[17] A. H. Elsheikh, W. Deng, and E. A. Showaib, “Improving laser cutting quality of polymethylmethacrylate sheet: Experimental investigation and optimization,” *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 9, no. 2, pp. 1325-1339, Mar. 2020.

[18] A. K. Ghavidel and M. Zadshakoyan, “Comprehensive study of laser cutting effects on the properties of acrylonitrile butadiene styrene,” *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 97, no. 3, pp. 3637-3653, Aug. 2018.

[19] E. Vasileska, O. Tuteski, B. Kusigerski, A. Argilovski, M. Tomov, and V. Gecevska, “Statistical analysis and machine learning-based modelling of kerf width in $CO_2$ laser cutting of PMMA,” *Manufacturing Technology*, vol. 24, no. 6, pp. 960-968, Dec. 2024.

# การประเมินศักยภาพการประหยัดพลังงานของระบบปรับอากาศด้วยการใช้อากาศภายนอกเอนทัลปีต่ำในบริบทภูมิอากาศร้อนชื้นของประเทศไทย

# Assessment of Energy-Saving Potential of Air Conditioning Systems Using Low-Enthalpy Outdoor Air in Hot-Humid Climate of Thailand

มานพ หิตะรัตน์[1], ปรเมษฐ์ สิทธิสันดิ์[1], สุรัตน์ เศษโพธิ์[1], บุญวัฒน์ วิจารณ์พล[1] และ นพรัตน์ เกตุขาว[2*]
Manop Hitarat[1], Poramate Sittisun[1], Surat Sedpho[1], Bunyawat Vichanpol[1]
and Nopparat Katkhaw[2*]

[1]สาขาวิชาพลังงานทดแทน คณะพลังงานและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยพะเยา
[2]สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา
[1]Department of Renewable Energy, School of Energy and Environment, University of Phayao
[2]Department of Mechanical Engineering, School of Engineering, University of Phayao
*Email: nopparat_ka@hotmail.com
Received: August 1, 2025; Revised: September 19, 2025; Accepted: November 14, 2025

**บทคัดย่อ**

ระบบปรับอากาศเป็นองค์ประกอบที่ใช้พลังงานสูงในอาคาร โดยเฉพาะในเขตภูมิอากาศร้อนชื้นอย่างประเทศไทย ซึ่งมีความต้องการการทำความเย็นเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ระบบ Economizer หรือการนำอากาศภายนอกที่มีค่าเอนทัลปีต่ำมาใช้เพื่อลดภาระของเครื่องปรับอากาศ ถือเป็นแนวทางหนึ่งที่ได้รับความสนใจ แต่การประยุกต์ใช้ในสภาพอากาศร้อนชื้นยังมีข้อจำกัดด้านความชื้น ดังนั้น วัตถุประสงค์ของการวิจัยนี้ คือการประเมินศักยภาพและความเป็นไปได้ของการใช้ระบบ Economizer ในประเทศไทย โดยมุ่งวิเคราะห์สภาวะอากาศและช่วงเวลาที่เหมาะสม ตลอดจนประเมินผลด้านการประหยัดพลังงาน เพื่อใช้เป็นแนวทางในการออกแบบและประยุกต์ใช้ในเชิงปฏิบัติ งานวิจัยนี้ใช้ข้อมูลสภาพอากาศรายวันช่วงหน้าหนาวของระหว่างปี 2567 - 2568 จากจังหวัดตัวแทนใน 5 ภูมิภาค ได้แก่ จ.เชียงราย จ.นครพนม จ.ลพบุรี จ.นครนายก และ จ.ประจวบคีรีขันธ์ โดยแบ่งการวิเคราะห์ออกเป็น 3 ช่วงเวลา คือ ตลอดวัน (24 ชั่วโมง) ช่วงเวลาทำงาน (08:00 - 17:00 น.) และช่วงเวลากลางคืน (20:00 - 06:00 น.) ผลการคำนวณค่าเอนทัลปีรายชั่วโมงพบว่า เงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการใช้ระบบ Economizer คือ ค่าเอนทัลปีต่ำกว่า 50.465 kJ/kg และอุณหภูมิภายนอกอยู่ระหว่าง 20 - 28.7 °C จำนวนชั่วโมงที่สามารถเปิดรับอากาศภายนอกแตกต่างกันตามภูมิภาค เช่น จ.นครพนม 432 ชั่วโมง/ปี (ตลอดวัน) จ.นครนายก 279 ชั่วโมง (ช่วงทำงาน) และ จ.ลพบุรี 157 ชั่วโมง (ช่วงกลางคืน) การประเมินศักยภาพการประหยัดพลังงานพบว่า จ.ลพบุรี และ จ.ประจวบคีรีขันธ์ มีศักยภาพในการประหยัดพลังงานสูงสุด ขณะที่ จ.นครนายก มีสัดส่วนการประหยัดสูงสุดถึง 12.56% แม้ปริมาณที่ลดลงจริงไม่มาก ส่วนภาคใต้มีสัดส่วนการประหยัดต่ำสุด (0.27 - 2.5%) แม้มีการใช้พลังงานสูงในบางช่วงเวลา โดยสรุป การใช้ระบบ Economizer ในประเทศไทยมีศักยภาพแตกต่างกันตามภูมิภาคและช่วงเวลา การเลือกใช้อย่างเหมาะสมกับลักษณะอุณหภูมิและความชื้นของพื้นที่จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพและสนับสนุนการพัฒนาอาคารประหยัดพลังงานอย่างยั่งยืน

**คำสำคัญ :** ระบบปรับอากาศ, เอนทัลปีต่ำ, การประหยัดพลังงาน

**Abstract**

Air conditioning systems are among the highest energy-consuming components in buildings, particularly in hot-humid climates such as Thailand, where cooling demand continues to rise. The economizer system-introducing outdoor air with lower enthalpy to reduce cooling loads - has gained attention as a potential energy-saving measure. However, its application in humid climates remains

challenging due to high relative humidity. Therefore, the objective of this study is to assess the feasibility and energy-saving potential of economizer applications in Thailand by analyzing suitable climatic conditions and time periods, and to provide insights for practical design and implementation. This study utilized daily weather data during the winter season between 2024 and 2025, obtained from representative stations in five regions of Thailand: Chiang Rai (North), Nakhon Phanom (Northeast), Lopburi (Central), Nakhon Nayok (East), and Prachuap Khiri Khan (South). Three time periods were analyzed: full day (24 hours), working hours (08:00 - 17:00), and nighttime (20:00 - 06:00). The hourly enthalpy calculations indicated that suitable conditions for economizer operation occur when the enthalpy is below 50.465 kJ/kg and the outdoor air temperature ranges between 20 and 28.7 °C. Based on this criterion, the number of hours in which outdoor air could be utilized varied across regions; for example, Nakhon Phanom recorded 432 h/year (all-day period), Nakhon Nayok 279 h (Office time), and Lopburi 157 h (Night time). Furthermore, the energy-saving potential analysis indicated that Lopburi and Prachuap Khiri Khan achieved the highest absolute reductions, whereas Nakhon Nayok exhibited the highest percentage savings (12.56%) despite the smaller actual reduction. In contrast, the southern region showed the lowest savings proportion (0.27 - 2.5%), even though energy consumption was relatively high during certain periods. In summary, the implementation of economizers in Thailand exhibits varying potential depending on region and time period. Appropriate selection based on local temperature and humidity conditions can enhance system performance and support the development of sustainable energy-efficient buildings.

**Keywords :** Air conditioning system, Low-Enthalpy, Energy saving

## 1. บทนำ

ระบบปรับอากาศถือเป็นหนึ่งในองค์ประกอบหลักที่ใช้พลังงานสูงที่สุดในภาคอาคาร โดยเฉพาะในเขตภูมิอากาศร้อนชื้น เช่น ประเทศไทย ซึ่งมีความต้องการการทำความเย็นเพิ่มสูงขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงของภูมิอากาศ การขยายตัวของเมือง และระดับความเป็นอยู่ที่สูงขึ้น [1] ในบางช่วงฤดูร้อน ระบบปรับอากาศในภาคครัวเรือนไทยอาจใช้ไฟฟ้าคิดเป็นกว่า 60% ของพลังงานรวมทั้งหมดในบ้านพักอาศัย การลดการใช้พลังงานในระบบปรับอากาศจึงเป็นแนวทางสำคัญในการพัฒนาอาคารประหยัดพลังงานอย่างยั่งยืน [2]

หนึ่งในแนวทางที่ได้รับความสนใจในระดับสากล คือการนำอากาศภายนอกที่มีเอนทัลปีต่ำมาใช้เพื่อช่วยลดภาระของเครื่องปรับอากาศ วิธีการนี้เรียกว่า ระบบ Economizer [3] ซึ่งอาศัยหลักการที่ว่า เมื่ออากาศภายนอกมีพลังงานรวมต่ำกว่าอากาศภายใน (ทั้งในแง่อุณหภูมิและความชื้น) ก็สามารถนำเข้ามาใช้งานโดยตรงหรือผสมกับอากาศหมุนเวียน เพื่อลดการทำงานของเครื่องทำความเย็น ส่งผลให้สามารถลดการใช้พลังงานได้ถึง 20 - 30% ในบางพื้นที่ [4,5]

Economizer ในระบบปรับอากาศเป็นกลไกที่ออกแบบมาเพื่อลดการใช้พลังงาน โดยการนำนำอากาศภายนอกที่มีสภาวะเหมาะสม เช่น มีอุณหภูมิต่ำและความชื้นต่ำกว่าอากาศภายใน เข้ามาแทนที่อากาศหมุนเวียนบางส่วนเมื่อเงื่อนไขของอากาศภายนอกสอดคล้องกับเกณฑ์ที่กำหนด ระบบจะเปิดให้อากาศดังกล่าวไหลเข้าสู่พื้นที่ปรับอากาศโดยตรง ส่งผลให้ภาระของเครื่องทำความเย็นลดลง ซึ่งช่วยให้การใช้พลังงานโดยรวมของระบบปรับอากาศมีประสิทธิภาพมากขึ้น

อย่างไรก็ตาม การประยุกต์ใช้ระบบนี้ในเขตอากาศร้อนชื้นยังคงเป็นความท้าทาย เนื่องจากความชื้นสัมพัทธ์สูงอาจส่งผลกระทบต่อคุณภาพอากาศภายในและประสิทธิภาพของระบบ [6,7] โดยเฉพาะในอาคารที่ไม่มีระบบควบคุมความชื้นที่แม่นยำ บทความนี้จึงมุ่งศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้ระบบ Economizer โดยอาศัยอากาศภายนอกที่มีเอนทัลปีต่ำในการลดภาระของระบบปรับอากาศในบริบทของประเทศไทย ซึ่งยังขาดการศึกษาที่เจาะจงในพื้นที่ภูมิอากาศลักษณะนี้

## 2. ทฤษฎีและการคำนวณ

การศึกษานี้ใช้ข้อมูลสภาพอากาศรายวัน ได้แก่ อุณหภูมิกระเปาะแห้งและความชื้นสัมพัทธ์ ซึ่งเก็บรวบรวมโดยกรมอุตุนิยมวิทยาแห่งประเทศไทยในปี พ.ศ. 2567 - 2568 จากสถานีตัวแทนใน 5 ภูมิภาค ได้แก่ ภาคเหนือ ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ภาคกลาง ภาคตะวันออก และภาคใต้ โดยข้อมูลถูกแบ่งออกเป็น 3 ช่วงเวลาในการวิเคราะห์ ได้แก่ ช่วงเวลาทำงาน (08:00 - 17:00 น.), ช่วงเวลากลางคืน (20:00 - 06:00 น.) และช่วงตลอดทั้งวัน

**2.1 ขั้นตอนการคำนวณค่าเอนทัลปี**

1. คำนวณค่าความดันอิ่มตัวของอากาศ จากอุณหภูมิกระเปาะแห้งที่สภาวะนั้นๆ ตามสมการที่ 1 [8]

$$P_{vs}=e^{\frac{c1}{T}+C_2+C_3T+C_4T^2+C_5T^3+C_6\ln T} \quad (1)$$

โดยที่

$P_{vs}$ คือ ค่าความดันไอน้ำอิ่มตัวที่ตรงกับอุณหภูมิกระเปาะแห้งของก๊าซผสมไอน้ำนั้น (Pascal)

$T$ คือ อุณหภูมิสมบูรณ์ของก๊าซผสมไอน้ำ (°K)

และกำหนดค่าคงที่ดังต่อไปนี้

$C_1$ = -5800.2206

$C_2$ = 1.3914993

$C_3$ = -0.04860239

$C_4$ = 4.1764768 x$10^{-5}$

$C_5$ = -1.445209x$10^{-8}$

$C_6$ = 6.5459673

2. คำนวณหาอัตราสวนความชื้นจากค่าความชื้นสัมพัทธ์และค่าความดันอิ่มตัวที่ ตามสมการที่ 2 [8]

$$w=\frac{0.622\phi P_{vs}}{P-\phi P_{vs}} \quad (2)$$

โดยที่

$w$ คือ อัตราส่วนความชื้น (Humidity Ratio) หน่วยเป็น kg ของไอน้ำ/kg ของอากาศแห้ง

$\phi$ คือ ความชื้นสัมพัทธ์ (Relative Humidity)

และกำหนดค่าคงที่ดังต่อไปนี้

$P$ คือ ความดันบรรยากาศรวม (Total atmospheric pressure) (101,325 Pa)

3. คำนวณหาค่าปริมาตรจำเพาะ (Specific volume, $v$) ตามสมการที่ 3 [8]

$$v=(0.287+0.462w)\cdot\frac{T}{P} \quad (3)$$

โดยที่

$v$ คือ ปริมาตรจำเพาะของอากาศชื้น (specific volume of moist air) ($m^3$/kg)

4. คำนวณหาค่าเอนทัลปีของสภาวะอากาศนั้นๆ ในแต่ละชั่วโมง ตามสมการที่ 4 [8]

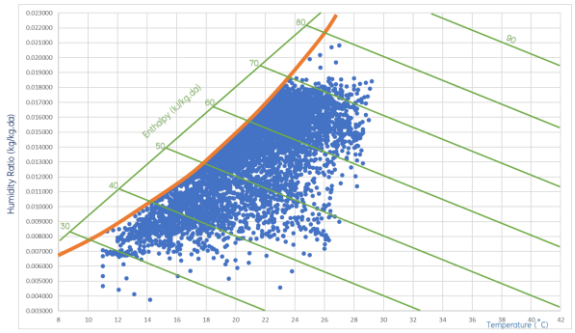
$$h=t+w(2501+1.86t) \quad (4)$$

โดยที่

$h$ คือ เอนทัลปีของอากาศชื้น (kJ/kg dry air)

$t$ คือ อุณหภูมิกระเปาะแห้งของก๊าซผสมไอน้ำ (°C)

5. ค่าเอนทัลปีที่ได้จากการคำนวณจะถูกนำไปแสดงในรูปแบบกราฟ ซึ่งมีแกน X แสดงค่าอุณหภูมิอากาศ (°C) และแกน Y แสดงค่าอัตราส่วนความชื้น (Humidity Ratio; kg/kg dry air) โดยมีเส้นเฉียงแทนค่าคงที่ของเอนทัลปี (Enthalpy Lines) เพื่อใช้ในการประเมินความเหมาะสมของสภาวะอากาศภายนอกสำหรับการนำมาใช้ในระบบ Economizer แทนการใช้พลังงานในการทำความเย็นด้วยระบบเครื่องกล




**รูปที่ 1** ตัวอย่างสภาวะอากาศบนแผนภูมิไซโครเมตริก

**2.2 การคำนวณขอบเขตการใช้งานของอากาศภายนอก**

2.2.1 ภาระทำความเย็นของห้องปรับอากาศ ตามมาตรฐาน ISO 16358-1 [9] ภาระทำความเย็นของเครื่องปรับอากาศขึ้นอยู่กับอุณหภูมิอากาศภายนอกอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากอุณหภูมิภายนอกมีผลต่อปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทเข้าสู่ภายในอาคาร ซึ่งจะกำหนดอุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส เป็นภาระทำความเย็น 0% และ 35 องศาเซลเซียส เป็นภาระทำความเย็น 100% ดังนั้นภาระทำความเย็นที่อุณหภูมิใดๆ คำนวณได้จากสมการที่ 5 [9]

$$L_C(t_j)=\phi_{full}(35)\cdot\frac{t_j-20}{35-20} \quad (5)$$

$L_C(t_j)$ คือ ภาระทำความเย็น (Cooling Load) ที่อุณหภูมิใดๆ คือการคำนวณภาระทำความเย็นที่อุณหภูมิ $t_j$ หน่วยเป็น W (Cooling)

$t_j$ คือ อุณหภูมิภายนอก (อุณหภูมิตุ้มแห้ง) หน่วยเป็นองศาเซลเซียส (°C)

$\phi_{full}(35)$ คือ สมรรถนะ 100% ของเครื่องปรับอากาศที่อุณหภูมิอากาศภายนอก (outdoor air temperature) 35 องศาเซลเซียส หน่วยเป็น W (Cooling)

2.2.2 สมรรถนะการทำงานของเครื่องปรับอากาศที่อุณหภูมิใดๆและที่ภาระโหลดต่างๆ

การหาสมรรถนะที่อุณหภูมิใดๆและที่โหลดใดๆของเครื่องปรับอากาศ จะได้จากการใช้วิธีการ Linear จากการที่ทราบค่า สมรรถนะ 100% อุณหภูมิอากาศภายนอกที่ 29 และ 35 องศาเซลเซียส ตามสมการที่ 6 [9]

$$\phi_{full}(t_j) = \phi_{full}(35) + \frac{\phi_{full}(29)-\phi_{full}(35)}{35-29}.(35 - t_j \quad (6)$$

$\phi_{full}(t_j)$ คือ สมรรถนะของเครื่องปรับอากาศ ที่อุณหภูมิอากาศภายนอก (outdoor air temperature) $t_j$ ใดๆหน่วยเป็น W (Cooling)

$\phi_{full}(29)$ คือ สมรรถนะ 100% ของเครื่องปรับอากาศ ที่อุณหภูมิอากาศภายนอก (outdoor air temperature) 29 องศาเซลเซียส หน่วยเป็น W (Cooling)

2.2.3 คำนวณขอบเขตอุณหภูมิภายนอกที่สามารถนำมาลดการใช้พลังงาน

ในกรณีที่อากาศภายนอกมีค่าเอนทัลปีต่ำแต่มีอุณหภูมิสูงกว่าค่าควบคุมที่กำหนดไว้ การนำอากาศดังกล่าวเข้าสู่ระบบอาจทำให้ระบบปรับอากาศยังคงต้องทำงานบางส่วนเพื่อปรับลดอุณหภูมิภายในให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสม โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่ต้องควบคุมอุณหภูมิห้องไม่ให้เกิน 25 °C ทั้งนี้แม้จะมีภาระในการทำความเย็นเหลืออยู่บ้าง แต่การใช้อากาศภายนอกที่มีเอนทัลปีต่ำก็ยังสามารถช่วยลดภาระรวมของระบบปรับอากาศได้ในระดับหนึ่ง [8]

$$\emptyset_{full}(t_j) \times SHR = 1.23 \times Q \times (t_{supply} - t_j) \quad (7)$$

$$[Lc(t_j) - Latent\ heat] = 1.23 \times Q \times (t_{room} - t_{supply}) \quad (8)$$

โดยที่

*SHR (Sensible Heat Ratio)* คือ อัตราส่วนความร้อนสัมผัสรวม (Total Sensible Heat) ต่อความร้อนทั้งหมด (Total Heat)

$Q$ คือ อัตราการไหลอากาศ $m^3/s$

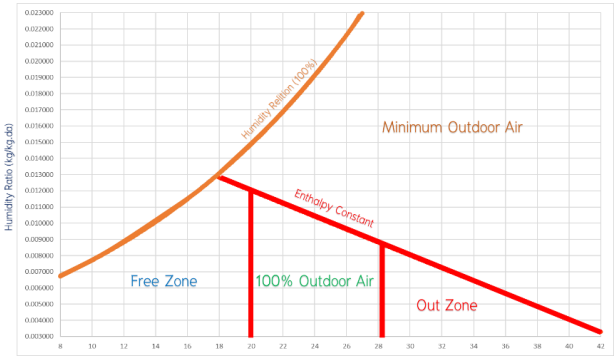
$t_{supply}$ คือ อุณหภูมิที่ออกจากเครื่องปรับอากาศหน่วยเป็นองศาเซลเซียส (°C)

$t_{room}$ คือ อุณหภูมิห้องที่ต้องการหน่วยเป็นองศาเซลเซียส (°C)

จากสมการที่ (7) และ (8) สามารถสรุปเงื่อนไขในการเลือกใช้อากาศภายนอกเพื่อลดภาระของระบบปรับอากาศได้ว่า อากาศภายนอกจะต้องมีค่าเอนทัลปีต่ำกว่าค่าควบคุมที่กำหนดไว้ (เชิงอ้างอิงจากสมการ) และมีอุณหภูมิไม่เกินค่าอุณหภูมิสูงสุดที่ยอมรับได้สำหรับพื้นที่ภายในอาคาร หรือ $t_{jmax}$ ในที่นี้กำหนดไว้ที่ 25°C

ดังนั้น สภาวะของอากาศภายนอกที่เหมาะสมสำหรับการนำมาใช้เพื่อลดการใช้พลังงานของระบบปรับอากาศจะต้องเป็นไปตามเงื่อนไขทั้งสองประการ คือ

- $h_j < h_{set}$ (อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ 50 เปอร์เซ็นต์)
- 20 °C < $t_j$ < $t_{jmax}$




**รูปที่ 2** ขอบเขตสภาวะอากาศภายนอกที่เหมาะสมต่อการลดการใช้พลังงานของระบบปรับอากาศ

**2.3 การคำนวณศักยภาพในการประหยัดพลังงาน**

2.3.1 การคำนวณปริมาณอากาศภายนอกที่เติมเข้าสู่พื้นที่ปรับอากาศ

การศึกษานี้กำหนดให้พิจารณาห้องปรับอากาศที่มีระบบระบายอากาศ โดยคำนวณปริมาณการระบายอากาศตามมาตรฐาน ASHRAE 62.1 [10] ดังนั้น ปริมาณอากาศเติมขั้นต่ำ ($\dot{V}_{min}$) ในช่วงที่โซนอยู่ในสภาวะใช้อากาศภายนอก 100% (100% Outdoor Air) สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้ [20]

$$V_{bz} = R_p \times P_z + R_a \times A_z \quad (9)$$

โดยที่

$V_{bz}$ คือ Breathing Zone Outdoor Air Flow (cfm)

$R_p$ คือ Outdoor Air Flow Rate ต่อคน จากตารางที่ 1 (cfm/คน)

$P_z$ คือ จำนวนผู้อยู่อาศัยภายในห้อง

$R_a$ คือ Outdoor Air Flow Rate ต่อพื้นที่ห้อง จากตารางที่ 1 (cfm/ตารางฟุต)

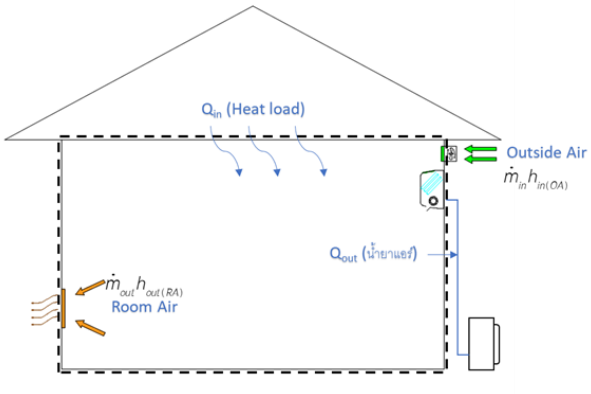
$A_z$ คือ พื้นที่ห้องเป็นตารางฟุต

ปริมาณอากาศเติมสูงสุด ($\dot{V}_{max}$) ในช่วงที่โซนอยู่ในสภาวะใช้อากาศภายนอก 100% (100% Outdoor Air) จะพิจารณาจากค่าสูงสุดของอัตราการจ่ายลมของเครื่องเติม

อากาศ โดยค่า $\dot{V}_{max}$ นี้จะใช้เป็นค่าขอบเขตบนในการวิเคราะห์ช่วงการทำงานของระบบระบายอากาศภายใต้เงื่อนไขสูงสุด

2.3.2 การคำนวณผลประหยัดพลังงานจากระบบระบายอากาศ

การวิเคราะห์ผลประหยัดพลังงานในหัวข้อนี้ยึดตามหลักการของกฎข้อที่หนึ่งของอุณหพลศาสตร์ โดยพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานความร้อนที่เข้าสู่ระบบและพลังงานที่สูญเสียไปในรูปของงาน เพื่อใช้ในการประเมินประสิทธิภาพของระบบระบายอากาศ




**รูปที่ 3** แสดงการเติมอากาศเข้าสู่ห้องปรับอากาศ

ในการวิเคราะห์การถ่ายเทพลังงานของระบบ สามารถประยุกต์ใช้หลักการดุลพลังงาน (Energy Balance) ร่วมกับกฎข้อที่หนึ่งของอุณหพลศาสตร์ เพื่อประเมินการเปลี่ยนแปลงของพลังงานในระบบ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในระบบที่มีการไหลของมวลสารเข้า - ออก เช่น ระบบปรับอากาศ หรือระบบแลกเปลี่ยนความร้อนแบบต่อเนื่อง ซึ่งสามารถเขียนสมการดุลพลังงานในรูปทั่วไปได้ดังนี้

$$Q_{in}+\dot{m}_{in}h_{in}=Q_{out}+\dot{m}_{out}h_{out}+W$$

เมื่อ

$$\dot{m}=\dot{m}_{in}=\dot{m}_{out}$$

จะได้

$$Q_{out}=Q_{in}+\dot{m}(h_{in}+h_{out}) \quad (10)$$

โดยที่

$Q_{in}$ คือ ภาระความร้อนที่เข้ามาในห้อง ซึ่งอาจมาจากหลายแหล่ง เช่น แสงอาทิตย์ที่ส่องผ่านหน้าต่าง, ความร้อนจากอุปกรณ์ไฟฟ้า, หรือความร้อนจากร่างกายของผู้อยู่อาศัย

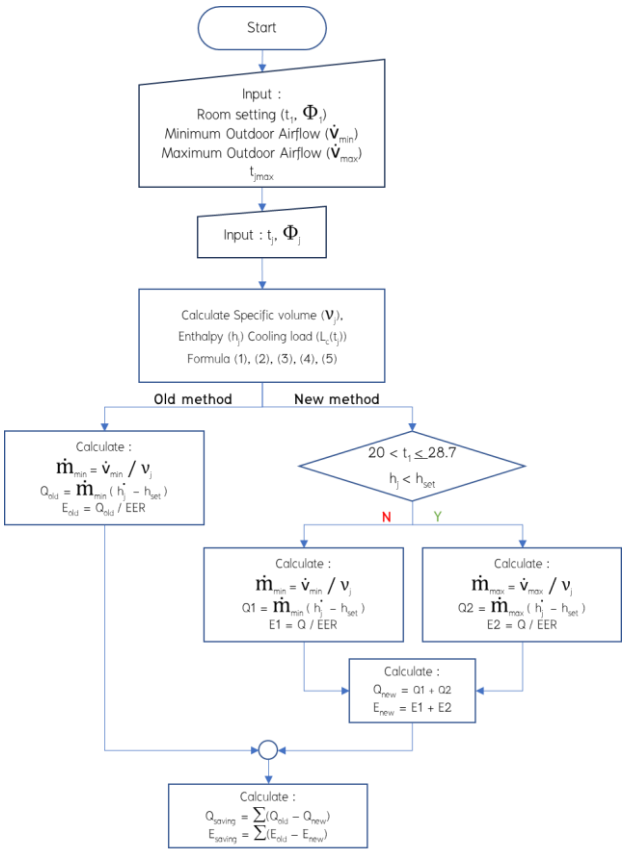
$Q_{out}$ คือ ความร้อนที่ถูกดูดออก จากอากาศภายในห้องโดยเครื่องปรับอากาศ (AC) ผ่านการทำงานของสารทำความเย็น (Refrigerant) ซึ่งจะลดอุณหภูมิของอากาศในห้องลง

$\dot{m}_{in}$ คือ อัตราการไหลเชิงมวล ของอากาศที่ถูกดูดเข้าจากเครื่องเติมอากาศ

$\dot{m}_{out}$ คือ อัตราการไหลเชิงมวล ของอากาศที่ถูกดูดออกจากห้องผ่านทางช่องระบายอากาศ

$h_{in}$ คือ เอนทัลปี (Enthalpy) ของอากาศจากภายนอกอาคาร (Outside Air) ที่ไหลเข้ามา

$h_{out}$ คือเอนทาลปีของอากาศในห้อง (Room Air) ที่ไหลเวียนออกไป




**รูปที่ 4** ผังกระบวนประเมินการศักยภาพในการประหยัดพลังงานของระบบ

## 3. ผลการศึกษา

3.1 ผลการคำนวณค่าเอนทัลปีของอากาศในแต่ละช่วงเวลา แต่ละภูมิภาค

ประเทศไทยมีภูมิอากาศที่หลากหลาย ส่งผลให้ศักยภาพในการใช้ระบบ Economizer แตกต่างกันตามแต่ละภูมิภาค งานวิจัยนี้ได้เลือกจังหวัดตัวแทนจาก 5 ภูมิภาคเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ ได้แก่

ภาคเหนือ: จังหวัดเชียงราย ซึ่งมีอากาศเย็นและแห้งในช่วงฤดูหนาว โดยเฉพาะเวลากลางคืน เหมาะสำหรับการใช้ระบบ Economizer เป็นบางช่วงเวลา

ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ: จังหวัดนครพนม มีอุณหภูมิสูงในฤดูร้อนแต่ความชื้นสัมพัทธ์ยังอยู่ในระดับปานกลางถึงต่ำ

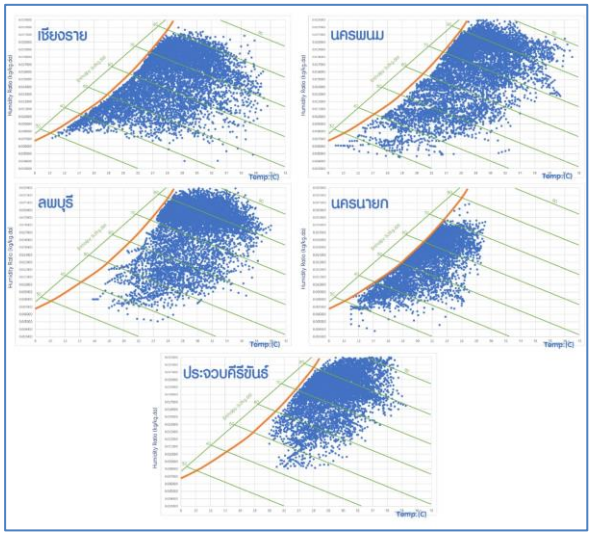
ภาคกลาง: จังหวัดลพบุรี มีลักษณะอากาศร้อนชื้นตลอดทั้งปี ซึ่งเป็นอุปสรรคต่อการใช้ระบบ Economizer เนื่องจากความชื้นแฝงที่สูง

แม้ว่าจังหวัดลพบุรีจะมีลักษณะภูมิอากาศร้อนชื้นตลอดทั้งปี ซึ่งถือเป็นอุปสรรคต่อการใช้ระบบ Economizer อย่างต่อเนื่อง แต่จากผลการวิเคราะห์ข้อมูลพบว่า ในบางช่วงเวลาโดยเฉพาะเวลากลางคืนและช่วงที่ค่าเอนทัลปีต่ำกว่าเกณฑ์ จังหวัดลพบุรีสามารถลดการใช้พลังงานได้สูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับภูมิภาคอื่น ๆ แสดงให้เห็นถึงความสำคัญของการพิจารณาปัจจัยด้านภูมิอากาศเฉพาะพื้นที่และช่วงเวลาในการออกแบบการใช้ Economizer อย่างเหมาะสม

ภาคตะวันออก: จังหวัดนครนายก แม้อยู่ในเขตชื้น แต่มีภูมิประเทศใกล้ภูเขาและป่าไม้ซึ่งอาจช่วยลดอุณหภูมิและความชื้นเฉพาะบางช่วงเวลา

ภาคใต้: จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ มีอากาศร้อนชื้นตลอดทั้งปี โดยเฉพาะในช่วงฤดูฝน ทำให้การนำอากาศภายนอกมาใช้งานต้องมีระบบควบคุมความชื้นอย่างรัดกุม

จากการประเมินค่าเอนทัลปีเฉลี่ยของอากาศภายนอกในแต่ละจังหวัด พบว่าตัวแปรสำคัญที่ส่งผลต่อความเหมาะสมในการนำอากาศภายนอกมาใช้งาน ได้แก่ อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงตามช่วงเวลา ส่งผลให้แต่ละพื้นที่มีศักยภาพในการประหยัดพลังงานจากการใช้งานระบบ Economizer แตกต่างกันไป




**รูปที่ 5** ค่าเอนทัลปีแต่ละภูมิภาคจากตัวแทนละจังหวัด

เพื่อให้ได้ข้อมูลเชิงลึกเกี่ยวกับความเหมาะสมในการนำอากาศภายนอกมาใช้ จึงได้มีการวิเคราะห์โดยแบ่งช่วงเวลาออกเป็น 3 ช่วง ได้แก่ 1) ตลอดทั้งวัน (24 ชั่วโมง) 2) ช่วงเวลาทำงาน (08:00 - 17:00 น.) และ 3) ช่วงเวลากลางคืน (20:00 - 06:00 น.)

ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นถึงสภาวะอากาศภายนอกที่สามารถนำมาใช้เพื่อลดภาระการทำงานของระบบปรับอากาศ ซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 6 โดยข้อมูลดังกล่าวสามารถใช้ในการประเมินโอกาสในการประหยัดพลังงานของแต่ละพื้นที่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

3.2 เกณฑ์การประเมินค่าเอนทัลปีและอุณหภูมิของอากาศภายนอกที่เอื้อต่อการใช้งานระบบ Economizer อย่างมีประสิทธิภาพ

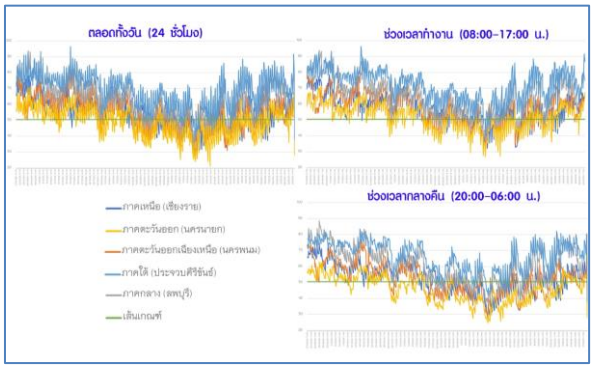
1. อากาศภายนอกจะต้องมีค่าเอนทัลปีต่ำกว่าสภาวะควบคุมของห้องปรับอากาศ (25 °C, 50%)
จากสมการ (1), (2), (3) และ (4)

$h_{set}$ = 50.465 kJ/kg

ค่าเอนทัลปีช่วงฤดูหนาว ประมาณปลายสัปดาห์ที่สาม ของเดือนตุลาคม 2567 ถึงปลายเดือนกุมภาพันธ์ 2568

2. อากาศที่นำเข้ามาแล้วทำให้อุณหภูมิห้องต้องไม่เกิน 25 °C

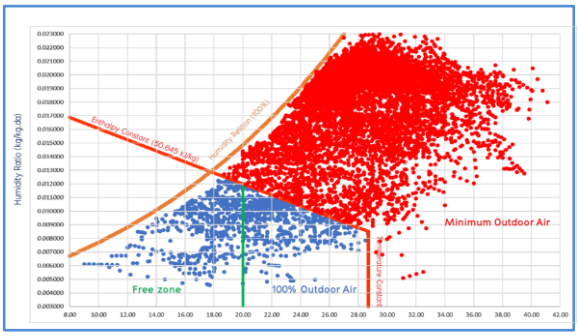
จากผลการวิเคราะห์พบว่า อากาศภายนอกที่มีค่าเอนทัลปีต่ำกว่า 50.465 kJ/kg และมีอุณหภูมิอยู่ในช่วง 20 - 28.7 °C สามารถนำมาใช้เพื่อลดภาระการทำงานของระบบปรับอากาศได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยช่วงเวลาดังกล่าวถือเป็นโซนที่เหมาะสมในการเปิดรับอากาศภายนอก 100% ขณะที่หากอุณหภูมิต่ำกว่า 20 °C จะเข้าสู่โซน Free Cooling ซึ่งสามารถระบายอากาศได้โดยไม่ต้องพึ่งพาระบบทำความเย็นเชิงกล ทำให้ช่วยประหยัดพลังงานได้มากขึ้น ตามรูปที่ 6




**รูปที่ 6** กราฟเปรียบเทียบค่าเอนทัลปี กับ $h_{set}$ แต่ละช่วงเวลา

รูปที่ 6 เป็นกราฟเปรียบเทียบค่าเอนทัลปีกับอุณหภูมิภายนอกในแต่ละช่วงเวลา โดยช่วงที่ค่าเอนทัลปีต่ำกว่า 50.465 kJ/kg และอุณหภูมิอยู่ระหว่าง 20 - 28.7 ℃ เป็นโซนที่เหมาะสมต่อการเปิดรับอากาศภายนอกเพื่อลดภาระการทำความเย็นของระบบปรับอากาศ

ในการออกแบบและควบคุมระบบปรับอากาศ การบริหารจัดการปริมาณอากาศภายนอกที่นำเข้าสู่พื้นที่ปรับอากาศถือเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อภาระการทำความเย็นและการใช้พลังงานโดยรวมของระบบ โดยเฉพาะในอาคารที่มีการใช้ระบบระบายอากาศร่วมกับระบบปรับอากาศ การประเมินสภาวะอากาศภายนอกจึงเป็นแนวทางหนึ่งที่สามารถนำมาใช้ในการเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของระบบ กราฟต่อไปนี้แสดงการจำแนกโซนสภาวะอากาศภายนอกตามศักยภาพในการช่วยลดการใช้พลังงานของเครื่องปรับอากาศ




**รูปที่ 7** โซนการทำงานของระบบปรับอากาศตามสภาวะอากาศภายนอกเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงาน

รูปที่ 7 แสดงการแบ่งโซนการทำงานของระบบปรับอากาศตามสภาวะอากาศภายนอก เพื่อใช้เป็นแนวทางในการลดการใช้พลังงานของเครื่องปรับอากาศ โดยจำแนกออกเป็น 3 โซนหลัก ดังนี้

**1) Minimum Outdoor Air (อากาศภายนอกขั้นต่ำ)** หมายถึงช่วงที่การนำอากาศภายนอกเข้าสู่พื้นที่ปรับอากาศจะส่งผลให้ภาระการทำความเย็นเพิ่มขึ้น ระบบจึงจำกัดการนำนำอากาศภายนอกให้น้อยที่สุด โดยมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อรักษาคุณภาพอากาศภายในอาคารให้เหมาะสมตามมาตรฐาน

**2) 100% Outdoor Air (อากาศภายนอก 100%)** หมายถึงช่วงที่อากาศภายนอกมีคุณสมบัติเอื้อต่อการลดภาระความเย็นของเครื่องปรับอากาศ ระบบจะสั่งให้เปิดรับอากาศภายนอกในปริมาณสูงสุดที่เครื่องสามารถรองรับได้ เพื่อใช้ในการระบายอากาศแทนการทำความเย็นด้วยเครื่องจักร

**3) Free Cooling Zone (โซนการทำความเย็นอิสระ)** เป็นช่วงที่อุณหภูมิของอากาศภายนอกต่ำกว่า 20℃ ส่งผลให้ภาระความร้อนจากภายนอกมีน้อยมาก จึงสามารถระบายอากาศได้โดยไม่จำเป็นต้องใช้เครื่องปรับอากาศ ทำให้ลดการใช้พลังงานของระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพ

3.3 การประเมินจำนวนชั่วโมงที่สามารถใช้งานระบบ Economizer ได้จากข้อมูลสภาพอากาศรายชั่วโมง

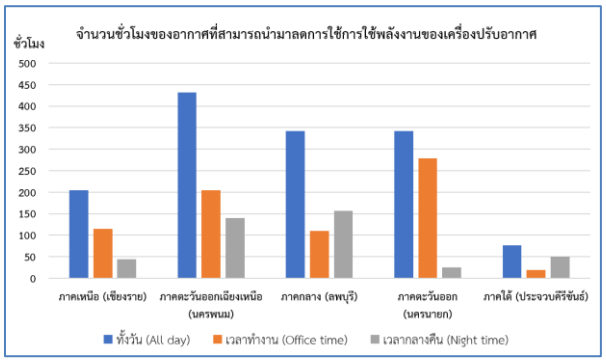
จากการวิเคราะห์จำนวนชั่วโมงที่สามารถปรับอัตราการเติมอากาศจากค่าขั้นต่ำเป็นการเติมอากาศภายนอก 100% ตามเกณฑ์อุณหภูมิและเอนทัลปีที่กำหนด พบว่าในแต่ละภูมิภาคและแต่ละช่วงเวลาจะมีความแตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 8

ช่วงเวลาตลอดทั้งวัน (24 ชั่วโมง): พบว่าจังหวัดนครพนมมีจำนวนชั่วโมงสูงสุดในการใช้อากาศภายนอก คือ 432 ชั่วโมง/ช่วงฤดูหนาว

ช่วงเวลาทำงาน (08:00 - 17:00 น.): จังหวัดนครนายกมีจำนวนชั่วโมงสูงสุดเท่ากับ 279 ชั่วโมง/ช่วงฤดูหนาว

ช่วงเวลากลางคืน (20:00 - 06:00 น.): จังหวัดลพบุรีมีจำนวนชั่วโมงสูงสุดอยู่ที่ 157 ชั่วโมง/ช่วงฤดูหนาว

ข้อมูลข้างต้นแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของศักยภาพในการใช้อากาศภายนอกเพื่อการประหยัดพลังงานของแต่ละพื้นที่ในช่วงเวลาที่แตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 8




**รูปที่ 8** จำนวนชั่วโมงของอากาศที่สามารถนำมาลดการใช้การใช้พลังงานของเครื่องปรับอากาศ

3.4 การวิเคราะห์ศักยภาพการลดการใช้พลังงานของระบบปรับอากาศเพื่อประเมินศักยภาพในการประหยัดพลังงานจากการใช้ระบบ Economizer ซึ่งอาศัยอากาศภายนอกที่มีค่าเอนทัลปีต่ำกว่าสภาวะควบคุมภายในอาคาร การศึกษานี้ได้ดำเนินการคำนวณปริมาณอากาศภายนอกที่สามารถนำเข้ามาใช้ในพื้นที่พักอาศัย และประมาณค่าพลังงานที่สามารถลดลงได้จากการลดภาระความร้อนของระบบปรับอากาศ

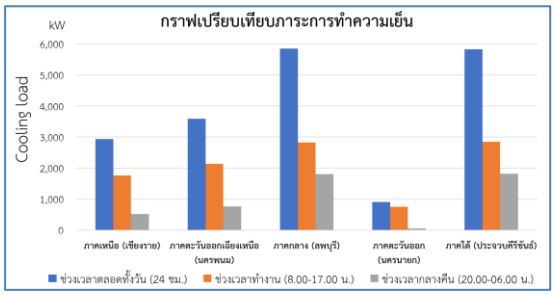
1) ปริมาณอากาศที่เติมเข้าห้อง

กำหนดสมมติฐานจากห้องพักอาศัยขนาด 20 ตารางเมตร (เท่ากับ 215.28 ตารางฟุต) โดยมีผู้อยู่อาศัยจำนวน 2 คน อิงตามมาตรฐาน ASHRAE 62.1 ค่าปริมาณอากาศภายนอกที่ต้องเติมอย่างน้อยสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$V_{bz}=R_p \times P_z + R_a \times A_z$$
$$= 5 \times 2 + 0.06 \times 215.28$$
$$= 22.9168 \text{ ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที}$$

2) คำนวณผลประหยัดพลังงาน

จากผังกระบวนการประเมินศักยภาพในการประหยัดพลังงานของระบบ (รูปที่ 4) ได้มีการจำลองภาระการทำความเย็นในพื้นที่ต่าง ๆ ทั่วประเทศไทย ภายใต้เงื่อนไขช่วงเวลาที่แตกต่างกัน ได้แก่ ช่วงเวลาตลอดทั้งวัน (24 ชั่วโมง), ช่วงเวลาทำงาน (08.00 - 17.00 น.) และช่วงเวลากลางคืน (20.00 - 06.00 น.) เพื่อนำข้อมูลไปใช้ประกอบการวิเคราะห์โอกาสในการลดภาระของเครื่องปรับอากาศผ่านการใช้ระบบ Economizer โดยกราฟต่อไปนี้แสดงผลการเปรียบเทียบภาระการทำความเย็นในแต่ละภูมิภาคตามช่วงเวลาดังกล่าว

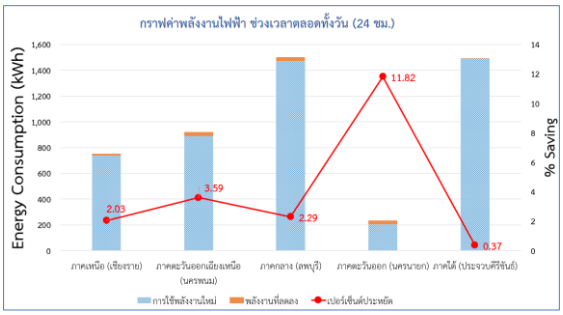



**รูปที่ 9** การเปรียบเทียบภาระการทำความเย็นในแต่ละภูมิภาคของประเทศไทยตามช่วงเวลาต่าง ๆ

จากการประเมินพลังงานที่สามารถลดลงได้จากการใช้ระบบ Economizer ดังรูปที่ 9 พบว่า ภาคกลาง (จ.ลพบุรี) และ ภาคใต้ (จ.ประจวบคีรีขันธ์) มีศักยภาพในการประหยัดพลังงานสูงที่สุดในช่วงเวลา ตลอดทั้งวัน และ ช่วงเวลากลางคืน ตามลำดับ ขณะที่ ภาคตะวันออก (จ.นครนายก) มีศักยภาพต่ำสุดในทุกช่วงเวลา โดยเฉพาะในช่วงกลางคืนที่มีค่าต่ำสุดเพียง 52.50 หน่วย ทั้งนี้แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของศักยภาพการประหยัดพลังงานตามภูมิภาคและช่วงเวลาใช้งาน

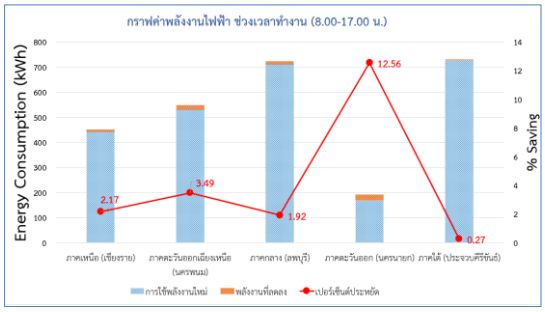
สำหรับช่วงเวลาต่าง ๆ ของการใช้งานระบบปรับอากาศ ผลการวิเคราะห์ค่าพลังงานไฟฟ้าในรูปที่ 10 ถึงรูปที่ 12 แสดงให้เห็นถึงศักยภาพในการประหยัดพลังงานของระบบ Economizer ในแต่ละภูมิภาคอย่างชัดเจน โดยแบ่งตามช่วงเวลาทั้งหมด ได้แก่ ตลอดทั้งวัน (24 ชั่วโมง), ช่วงเวลาทำงาน (08:00 - 17:00 น.) และช่วงเวลากลางคืน (20:00 - 06:00 น.) ข้อมูลจากกราฟเหล่านี้จะช่วยให้เข้าใจถึงประสิทธิภาพและโอกาสในการลดการใช้พลังงานของเครื่องปรับอากาศในแต่ละภูมิภาคและช่วงเวลาใช้งานอย่างละเอียด

สำหรับจังหวัดลพบุรี จากผลการจำลองพบว่ามีศักยภาพในการลดการใช้พลังงานรวมสูงสุดประมาณ 650 kWh ตลอดทั้งวันและช่วงกลางคืน อย่างไรก็ตาม หากพิจารณาเฉพาะบางช่วงเวลา เช่น เวลากลางคืนเพียงอย่างเดียว ปริมาณการลดพลังงานจะอยู่เพียง 260 kWh ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้ค่าพลังงานลดลงมีความแตกต่างกันในแต่ละการนำเสนอ ทั้งนี้การระบุผลทั้งสองลักษณะมีจุดมุ่งหมายเพื่อสะท้อนให้เห็นถึงความหลากหลายของช่วงเวลาการใช้งานระบบ Economizer ในบริบทที่แตกต่างกัน




**รูปที่ 10** กราฟค่าพลังงานไฟฟ้า ช่วงเวลาตลอดทั้งวัน (24 ชม.)

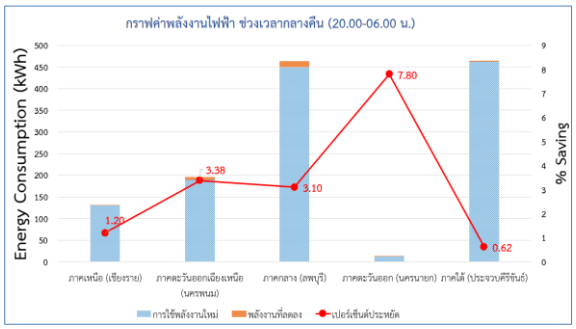
จากผลการวิเคราะห์กราฟค่าพลังงานไฟฟ้า ช่วงเวลาตลอดทั้งวัน (24 ชม.) ดังรูปที่ 10 พบว่า ภาคตะวันออก (จ.นครนายก) มี สัดส่วนการประหยัดพลังงานสูงสุด อยู่ที่ 11.82% แม้ว่าปริมาณพลังงานที่ลดลงจะไม่สูงนัก ขณะที่ ภาคกลาง (จ.ลพบุรี) และ ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ (จ.นครพนม) มีปริมาณพลังงานที่ลดลงมากที่สุด แต่มีเปอร์เซ็นต์การประหยัดเพียง 2.29% และ 3.59% ตามลำดับ ส่วน ภาคใต้ (จ.ประจวบคีรีขันธ์) มีศักยภาพการประหยัดต่ำที่สุดในทั้งสองด้าน




**รูปที่ 11** ค่าพลังงานไฟฟ้าของเครื่องปรับอากาศ ช่วงเวลาทำงาน (08:00 - 17:00 น.)

จากข้อมูลรูปที่ 11 ค่าพลังงานไฟฟ้าของเครื่องปรับอากาศ ช่วงเวลาทำงาน (08:00 - 17:00 น.) พบว่า ภาคตะวันออก (จ.นครนายก) แม้มีพลังงานลดลงไม่สูงนัก แต่กลับมีสัดส่วนการประหยัดพลังงานสูงสุดถึง 12.56% ในช่วงเวลาทำงาน ซึ่งสอดคล้องกับงานของ Seem & House [3] ที่เสนอว่าการปรับกลยุทธ์ Economizer ตามเงื่อนไขท้องถิ่นช่วยเพิ่มประสิทธิภาพได้มากกว่าการควบคุมแบบทั่วไป และยังสอดคล้องกับ Yao & Wang [11] ที่ชี้ว่า VAV system ในภูมิอากาศจีนก็มีผลใกล้เคียงกัน ขณะที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ (จ.นครพนม) และ ภาคเหนือ (จ.เชียงราย) มีการลดพลังงานและเปอร์เซ็นต์การประหยัดอยู่ในระดับปานกลาง ส่วน ภาคใต้ (จ.ประจวบคีรีขันธ์) มีเปอร์เซ็นต์ประหยัดต่ำสุดที่ 0.27% แม้จะมีการใช้พลังงานใหม่สูงสุด

ในการประเมินเปอร์เซ็นต์การประหยัดพลังงาน พบว่าค่าร้อยละ 12.56% สะท้อนถึงสัดส่วนการประหยัดพลังงานที่เกิดขึ้นเฉพาะในช่วงเวลาทำงาน (08:00 - 17:00 น.) ขณะที่ค่าร้อยละ 11.82% เป็นค่าเฉลี่ยการประหยัดพลังงานตลอดทั้งวัน (24 ชั่วโมง) ดังนั้น แม้ตัวเลขทั้งสองจะมีค่าที่ใกล้เคียงกัน แต่ช่วงเวลาอ้างอิงมีความแตกต่าง ซึ่งเป็นประเด็นสำคัญที่ควรพิจารณาในการตีความผลลัพธ์




**รูปที่ 12** ค่าพลังงานไฟฟ้าของเครื่องปรับอากาศ ช่วงเวลากลางคืน (20:00 - 06:00 น.)

จากข้อมูลรูปที่ 12 ค่าพลังงานไฟฟ้าของเครื่องปรับอากาศ ช่วงเวลากลางคืน (20:00 - 06:00 น.) พบว่า ภาคตะวันออก (จ.นครนายก) ซึ่งสอดคล้องกับงานของ Seem & House [12] ยังคงมี เปอร์เซ็นต์การประหยัดพลังงานสูงที่สุดอยู่ที่ 7.80% แม้ปริมาณพลังงานรวมจะน้อยที่สุด ขณะที่ภาคกลาง (จ.ลพบุรี) และ ภาคใต้ (จ.ประจวบคีรีขันธ์) มีปริมาณพลังงานที่ลดลงสูง แต่เปอร์เซ็นต์การประหยัดอยู่ในระดับปานกลางและต่ำ ส่วน ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ (จ.นครพนม) มีความสมดุลระหว่างพลังงานที่ลดลงและเปอร์เซ็นต์การประหยัดที่ดี

## 4. สรุปผลการศึกษา

การศึกษานี้ได้วิเคราะห์ศักยภาพการประหยัดพลังงานจากการใช้ระบบ Economizer ที่อาศัยอากาศภายนอกซึ่งมีค่าเอนทัลปีต่ำกว่าสภาวะภายในอาคาร ผลการวิเคราะห์พบว่า ภาคกลาง (จ.ลพบุรี) และภาคใต้ (จ.ประจวบคีรีขันธ์) มีศักยภาพในการประหยัดพลังงานสูงสุดในช่วงเวลาตลอดทั้งวันและช่วงเวลากลางคืนตามลำดับ ขณะที่ภาคตะวันออก (จ.นครนายก) แม้จะมีการใช้พลังงานใหม่ในระดับต่ำ แต่มีเปอร์เซ็นต์การประหยัดพลังงานสูงสุดในทุกช่วงเวลา โดยเฉพาะช่วงเวลาทำงานที่สูงถึงกว่า 12% ในทางตรงกันข้าม ภาคใต้มีเปอร์เซ็นต์การประหยัดต่ำสุด แม้ว่าจะมีการใช้พลังงานสูง นอกจากนี้ จำนวนชั่วโมงที่สามารถใช้ระบบ Economizer ได้แตกต่างกันไปในแต่ละภูมิภาคและช่วงเวลา โดยภาคตะวันออกเฉียงเหนือและภาคเหนือมีจำนวนชั่วโมงใช้งานได้สูงในช่วงเวลาตลอดทั้งวันและช่วงทำงานตามลำดับ

อย่างไรก็ตาม ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าความแตกต่างของศักยภาพการประหยัดพลังงานในแต่ละภูมิภาคอาจได้รับอิทธิพลจากปัจจัยหลายประการ เช่น ลักษณะสภาพอากาศเฉพาะถิ่น ความแปรปรวนของอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ รวมถึงช่วงเวลาการใช้งานของระบบปรับอากาศ นอกจากนี้ ค่าการประหยัดพลังงานในบางพื้นที่แม้จะมีเปอร์เซ็นต์สูง แต่ปริมาณพลังงานที่ลดลงจริงอาจต่ำ เนื่องจากปริมาณการใช้พลังงานเริ่มต้นที่ต่ำ ซึ่งเป็นประเด็นสำคัญที่ควรพิจารณาในการออกแบบและประยุกต์ใช้ระบบ Economizer เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด

การนำผลการวิเคราะห์ไปประยุกต์ใช้ในเชิงปฏิบัติควรคำนึงถึงลักษณะเฉพาะของแต่ละภูมิภาคและช่วงเวลาใช้งาน เพื่อปรับแต่งการทำงานของระบบให้เหมาะสมและเกิดประโยชน์สูงสุดในการลดการใช้พลังงาน ทั้งนี้ยังจำเป็นต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับความแม่นยำของข้อมูลภูมิอากาศและพฤติกรรมการใช้งานจริง เพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือและประสิทธิผลของระบบในอนาคต โดยเฉพาะอย่างยิ่ง การประยุกต์ใช้ระบบ Economizer ในบริบทของประเทศไทยควรดำเนินการในลักษณะการออกแบบเชิงพื้นที่ (Climate-specific design) และยึดถือมาตรฐานสากล เช่น ASHRAE [7,10] เพื่อสร้างความสมดุลระหว่างปริมาณพลังงานที่ลดลงและสัดส่วนการประหยัดพลังงาน นอกจากนี้ยังควรมีการศึกษาต่อเนื่องตามข้อเสนอของ Asim et al. [13] เกี่ยวกับความยั่งยืนของระบบ HVAC ในระยะยาว ซึ่งจะช่วยยกระดับคุณภาพของการออกแบบและการใช้งานระบบปรับอากาศให้สอดคล้องกับแนวทางการพัฒนาอาคารประหยัดพลังงานอย่างยั่งยืน

## 5. เอกสารอ้างอิง


[1] K. Lundgren-Kownacki, E. D. Hornyanszky, T. A. Chu, J. Alkan Olsson, and P. Becker, " Challenges of using air conditioning in an increasingly hot climate," *International Journal of Biometeorology*, vol. 62, Special Issue on Trans-disciplinary approaches to climate change, pp.401-412, Mar.2018.

[2] Z. Tao, X. Zhu, G. Xu, D. Zou, and G. Li, "A comparative analysis of outdoor thermal comfort indicators applied in China and other countries," *Sustainability*, vol. 15, no. 22, Art.no.16029, 2023. doi: 10.3390/su152216029.

[3] J. Feng, M. Liu, and X. Pang, *Economizer control using mixed air enthalpy*. Energy Systems Laboratory, University of Nebraska–Lincoln, 2007.

[4] B. Li, P. Wild, and A. Rowe, "Free cooling potential of air economizer in residential houses in Canada," *Building and Environment*, vol. 167, Art.no.106460, 2019. doi: 10. 1016/j. buildenv.2019.106460.

[5] H. Selamat, M. Mohammad, M. Badiei, and H. Razali, "Review on HVAC system optimization towards energy saving building operation," *International Energy Journal*, vol. 20, no.3, pp. 345-358, 2020.

[6] S. T. Taylor and C. H. Cheng, "Why enthalpy economizers don't work," *ASHRAE Journal*, vol. 52, no. 11, pp. 12–20, Nov. 2010.

[7] ASHRAE, "ASHRAE journal QA: Why enthalpy economizers don't work," *ASHRAE Journa*l, Nov. 2010.

[8] R. Jirakanvasan, *Air conditioning*. Bangkok: Thai Air Conditioning Engineering Association, 2018. (in Thai).

[9] Ministry of Industry, TIS 2714 Part 1-2558: *Standard for air-cooled air conditioners and heat pumps - Testing and seasonal performance factor calculation, Part 1: Cooling seasonal performance factor*, 2016. (in Thai).

[10] T. Manee-wattana, "Ventilation rate calculation according to ASHRAE 62.1 standard," Technical article of Thai Air Conditioning Engineering Association, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University. (in Thai).

[11] Y. Yao and L. Wang, "Energy analysis on VAV system with different air-side economizers in China," *Energy and Buildings*, vol. 42, no. 8, pp. 1220–1230, 2010. doi: 10.1016/jenbuild. 2010. 02.015.

[12] J. E. Seem and J. M. House, "Development and evaluation of optimization-based air economizer strategies," *Applied Energy*, vol. 87, no. 3, pp. 910–924, 2010. doi: 10.1016/j. apenergy.2009.08.044.

[13] N. Asim, M. Badiei, M. Mohammad, H. Razali, A. Rajabi, and L. C. Haw, "Sustainability of heating, ventilation and air-conditioning (HVAC) systems in buildings – An overview," *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 19, no. 2, Art.no. 1016, 2022. doi: 10.3390/ ijerph19021016.

# การเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์โดยใช้ครีบนำความร้อนรูปทรงกระบอกสำหรับอบแห้งขมิ้นชัน

# Thermal Efficiency Enhancement of a Solar-Powered Dryer Equipped with Cylindrical Heat Fins for Turmeric Drying

สมมาตร สุบรรณพงษ์[1] และ จารุมาศ รักทองหล่อ[2]*
Sommart Subannapong[1], and Jarumast Raktonglor[2]*

[1]คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี
[2]สาขาวิชาการจัดการโลจิสติกส์ คณะวิทยาการจัดการ มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี
[1]Department of Industrial Technology, Faculty of Industrial Technology, Thepsatri Rajabhat University
[2]Department of Logistics Management, Faculty of Management Science, Thepsatri Rajabhat University
*Email: Jarumast.r@lawasri.tru.ac.th
Received: May 7, 2025; Revised: September 17, 2025; Accepted: November 14, 2025

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์โดยติดตั้งครีบนำความร้อนรูปทรงกระบอกสำหรับการอบแห้งขมิ้นชัน โดยตู้อบแห้งต้นแบบมีขนาดพื้นที่ 1×1 $m^2$ เป็นรูปแบบหลังคาพาราโบลาพร้อมติดตั้งครีบนำความร้อนที่มีความยาวต่างๆ (10, 20, 30, 40 และ 50 mm) เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิภายในห้องอบแห้ง อัตราการถ่ายเทความร้อน ประสิทธิภาพเชิงพลังงาน และประสิทธิภาพเชิงความร้อนตู้อบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ การศึกษาเชิงทดลองดำเนินการภายใต้สภาวะจำลองด้วยรังสีแสงอาทิตย์ด้วยหลอดฮาโลเจนขนาด 1500 วัตต์ พบว่าครีบที่มีความยาว 40 mm สามารถเพิ่มอุณหภูมิภายในตู้อบได้สูงสุด 54 °C และให้อัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุดถึง 37 W และส่งผลให้ประสิทธิภาพเชิงพลังงานสูงสุดเฉลี่ยในช่วง 4.7–6.3% ที่อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศอยู่ในช่วง $2.5\times10^{-3}$–$7.0\times10^{-3}$ kg/s ซึ่งสูงกว่าครีบนำความร้อนที่ค่าความยาวอื่นๆ สำหรับการศึกษาประสิทธิภาพเชิงความร้อนระหว่างตู้อบแห้งที่ติดครีบและไม่ติดครีบพบว่า ตู้อบแห้งที่ติดครีบจะมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนเฉลี่ยตลอดการอบแห้งสูงกว่ากรณีไม่ติดครีบประมาณ 2% โดยเฉพาะในช่วงเริ่มต้นกระบวนการอบแห้ง (10.30–12.00 น.) ตู้อบแห้งที่ติดครีบจะมีค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงสุดถึง 36% และตู้อบแห้งที่ติดครีบสามารถลดอัตราความชื้นได้รวดเร็วกว่าในช่วงแรก โดยไม่มีผลกระทบต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ทั้งด้านความชื้น เนื้อสัมผัส สี และกลิ่น จากการประยุกต์ใช้งานจริงในระดับชุมชนตู้อบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ที่พัฒนาขึ้นสามารถลดต้นทุนค่าไฟฟ้าเฉลี่ยได้ประมาณ 5 บาท/กิโลกรัม/วัน เมื่อเทียบกับการใช้ตู้อบไฟฟ้าแบบดั้งเดิม โดยการใช้งานตู้อบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ได้ผลการประเมินความพึงพอใจของผู้รับบริการในภาพรวมอยู่ในระดับระดับดีมากโดยมีคะแนนเฉลี่ยร้อยละ 91.55 สะท้อนถึงความเหมาะสมของเทคโนโลยีนี้ในการนำไปขยายผลใช้งานจริงสำหรับการแปรรูปผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรในระดับชุมชน

**คำสำคัญ :** ตู้อบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์, ครีบนำความร้อนรูปทรงกระบอก, ประสิทธิภาพเชิงความร้อน, การอบแห้งขมิ้นชัน

## Abstract

This research aimed to enhance the thermal efficiency of a solar-powered dryer by integrating cylindrical heat fins for turmeric drying. The prototype dryer was designed with a drying area of 1×1 m² and a parabolic-shaped roof, equipped with cylindrical heat fins of varying lengths (10, 20, 30, 40, and 50 mm) to investigate their effects on internal temperature, heat transfer rate, energy efficiency, and thermal efficiency of the solar dryer. Experimental studies were conducted under simulated solar radiation conditions using a 1,500 watt halogen lamp. The results indicated that the heat fin with a length of 40 mm achieved the highest internal temperature of 54°C and the highest heat transfer rate of 37 W. Additionally, it provided the highest average energy efficiency, ranging between 4.7% and 6.3%, at an air mass flow rate of $2.5\times10^{-3}$–$7.0\times10^{-3}$ kg/s, which outperformed fins of other lengths. When comparing

the thermal efficiency between dryers with and without heat fins, the fin-equipped dryer exhibited an average thermal efficiency approximately 2% higher throughout the drying process, with a peak thermal efficiency of 36% during the initial drying stage (10:30–12:00 hrs). Moreover, the fin-equipped dryer demonstrated a faster reduction in moisture content during the initial drying phase without compromising the quality attributes of the product, including moisture content, texture, color, and aroma. From practical application at the community level, the developed solar-powered dryer was able to reduce electricity costs by approximately 5 baht/kilogram/day compared to conventional electric dryers. The evaluation of user satisfaction revealed an overall satisfaction rating at a "very good" level, with an average score of 91.55%, reflecting the suitability of this technology for further application in community-based agricultural product processing.

**Keywords :** Solar-powered dryer, Cylindrical heat fins, Thermal efficiency, Turmeric drying

## 1. บทนำ

กลุ่มแม่บ้านเกษตรกรตำบลบ้านทราย อำเภอบ้านหมี่ จังหวัดลพบุรี ที่ทำธุรกิจแปรรูปขมิ้นชันอบแห้ง ประสบปัญหาต้นทุนพลังงานที่สูงจากการใช้ตู้อบไฟฟ้าในการอบขมิ้นชัน ซึ่งส่งผลกระทบต่อการมีกำไรและศักยภาพในการแข่งขันของผลิตภัณฑ์ ดังนั้น การวิจัยนี้จึงมีที่มาจากความจำเป็นในการหาแนวทางในการลดต้นทุนด้านพลังงานการใช้ไฟฟ้าในการอบแห้ง และได้เห็นถึงแนวทางการแก้ไขปัญหาดังกล่าวโดยการใช้ประโยชน์จากพลังงานแสงอาทิตย์ซึ่งเป็นทางเลือกที่ยั่งยืน เนื่องจากระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์มีต้นทุนต่ำ สามารถนำมาเป็นพลังงานทดแทน ระบบการทำงานไม่ซับซ้อน เหมาะสมที่จะนำมาประยุกต์ใช้กับเกษตรกรทั่วไป งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการพัฒนาเทคโนโลยีอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและลดต้นทุนการผลิต ซึ่งเป็นแนวทางในการแก้ไขปัญหาดังกล่าว โดย Ajay Kumar et al. [1] ได้เสริมแนวคิดการกระจายลมร้อนแบบหลายจุด (MPAS) ภายในตู้อบหลายชั้นเพื่อแก้ไขปัญหาความไม่สม่ำเสมอในการอบแห้ง ช่วยลดระยะเวลาอบลง 22% และเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานเฉลี่ยขึ้น 23.3% ขณะเดียวกันในประเทศไทยมีการพัฒนาเทคโนโลยีอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์อย่างต่อเนื่อง ในปี 2022 Barghi Jahromi et al. [2] ได้ประยุกต์ใช้วัสดุเปลี่ยนสถานะ (PCM) ในตู้อบพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อเสถียรภาพอุณหภูมิระหว่างกลางวันและกลางคืน ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพทางความร้อนของระบบได้สูงสุดถึง 39% ต่อมา Kebede et al. [3] ได้นำแนวคิดการเพิ่มประสิทธิภาพด้วยการเสริมพัดลมโซลาร์เซลล์และกระจกสะท้อนแสงในตู้อบขนาดเล็กสำหรับพื้นที่สูงในเอธิโอเปีย ทำให้ลดความชื้นของเมล็ดกาแฟได้อย่างรวดเร็วภายใน 2 วัน พร้อมเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนได้ถึง 35.2% นอกจากนี้ Kerse et al. [4] ได้พัฒนาต่อยอดโดยรวมระบบกักเก็บพลังงาน PCM และออกแบบแผงรับแสงแบบ Double Pass Solar Air Heater เพื่อเร่งกระบวนการอบแห้งพริกแดงและรักษาคุณภาพสีได้อย่างมีประสิทธิภาพ ต่อเนื่องด้วยการศึกษาของ Kumar et al. [5] ที่นำเสนอการออกแบบโรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบผสมผสานรูปทรงโค้งและสี่เหลี่ยม ซึ่งช่วยลดเวลาการอบหัวหอมและลดต้นทุนพลังงานลงอย่างชัดเจน พร้อมเพิ่มอัตราการคืนทุนในระยะเวลาอันสั้น ในปี 2564 กฤษฎางค์ ศุกระมูล และคณะ [6] ได้ออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบตากแห้งโดยตรงสำหรับกล้วยน้ำว้าในระดับชุมชน โดยได้ดำเนินการทดลองเปรียบเทียบอุณหภูมิและประสิทธิภาพการกระจายความร้อนระหว่างตู้อบพลังงานแสงอาทิตย์กับเครื่องอบลมร้อนทั่วไป โดยใช้การวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ในห้องอบทุก 15 นาที ตั้งแต่ 09.00–16.00 น. เป็นเวลา 10 วัน พบว่าเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์สามารถทำอุณหภูมิเฉลี่ยได้ 62.68°C ซึ่งช่วยลดการปนเปื้อนและใช้พลังงานทดแทนได้อย่างมีประสิทธิภาพ ต่อมาในปี 2565 ชาญฉจิต วรรณนุรักษ์ [7] ได้พัฒนาเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์โดยใช้ตัวเก็บรังสีแบบแผ่นเรียบที่ติดตั้งท่อทองแดงพ่นสีดำจำนวน 30 ท่อ เพื่อเพิ่มการดูดซับพลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งผลการอบกล้วยน้ำว้าพบว่าสามารถลดน้ำหนักจาก 1 กิโลกรัมเหลือ 0.35 กิโลกรัมภายใน 5 วัน โดยมีค่าความชื้นเฉลี่ยลดลงได้ถึง 74.29% และมีประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนสูงสุดที่ 63.5% อีกทั้งสามารถคืนทุนได้ภายใน 9 วัน และสร้างรายได้สุทธิสูงถึง 52,459.68 บาทต่อปีในปีเดียวกัน เสริมศักดิ์ ทิพย์วงศ์ และคณะ [8] ได้พัฒนาเทคโนโลยีห้องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ต้นทุนต่ำโดยใช้แผ่นโพลีคาร์บอเนตโปร่งแสงแทนกระจก ซึ่งสามารถลดการซึมผ่านของรังสี UVA และ UVB ได้มากถึง 88% ขณะที่ยังสามารถเพิ่มอุณหภูมิภายในห้องอบได้สูงสุดถึง 58 °C ในช่วงกลางวัน การอบแห้งเนื้อมะขามพบว่าสามารถลดน้ำหนักได้สูงสุด 1,217 กรัม และลดค่าความชื้นได้ 30% ภายในเวลา 8 ชั่วโมง พร้อมผลการประเมินความพึงพอใจในระดับ "มากที่สุด" เฉลี่ย 4.70 คะแนน จากการถ่ายทอดองค์ความรู้ให้แก่กลุ่มวิสาหกิจชุมชน ต่อเนื่องในปี 2567 เอกราช

นาคนวล และ แม้นวาด รชนีกรไกรลาศ [9] ได้ออกแบบตู้อบพลังงานร่วมที่ใช้พลังงานจากแสงอาทิตย์และพลังงานไฟฟ้าสำรองจากแบตเตอรี่ ทำให้สามารถควบคุมอุณหภูมิระหว่าง 35–40 °C ได้อย่างต่อเนื่องแม้ในช่วงที่ไม่มีแสงแดด โดยผลการทดสอบพบว่า สามารถรักษาเสถียรภาพของอุณหภูมิในทุกสภาวะอากาศได้อย่างมีประสิทธิภาพ เหมาะสมต่อการแปรรูปผลิตผลทางการเกษตรในทุกฤดูกาล ขณะที่ อภิญญา สายศรีแก้ว และคณะ [10] ได้นำเทคโนโลยี Internet of Things (IoT) มาใช้ควบคุมตู้อบพลังงานแสงอาทิตย์ ผ่านเซ็นเซอร์ DHT21 และระบบควบคุมผ่านสมาร์ทโฟน โดยผลการทดสอบพบว่า ในโหมดใช้พลังงานแสงอาทิตย์อย่างเดียว สามารถอบหมูแดดเดียวเสร็จภายใน 2 ชั่วโมง และในโหมดพลังงานรวมสามารถลดระยะเวลาอบเหลือเพียง 1 ชั่วโมง ทั้งนี้ระบบได้รับการประเมินคุณภาพจากผู้เชี่ยวชาญในระดับ “มากที่สุด” ด้วยคะแนนเฉลี่ย 4.78 คะแนน

จากพื้นฐานแนวคิดและผลงานวิจัยที่ผ่านมา ผู้วิจัยจึงพัฒนาเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ต้นแบบแบบเรือนกระจกที่ติดตั้งครีบนำความร้อนทรงกระบอกบริเวณหลังคารับแสง เพื่อเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่ภายในตู้อบแห้ง สำหรับช่วยให้สามารถเพิ่มอุณหภูมิภายในตู้อบได้เร็วขึ้น ลดระยะเวลาในการอบแห้งขมิ้นชันและส่งผลให้มีการใช้พลังงานเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ โดยตอบโจทย์ทั้งทางด้านวิศวกรรมและความยั่งยืนทางเศรษฐกิจสำหรับกลุ่มเกษตรกรระดับชุมชน

## 2. วิธีการวิจัย

### 2.1 ตู้อบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ต้นแบบ

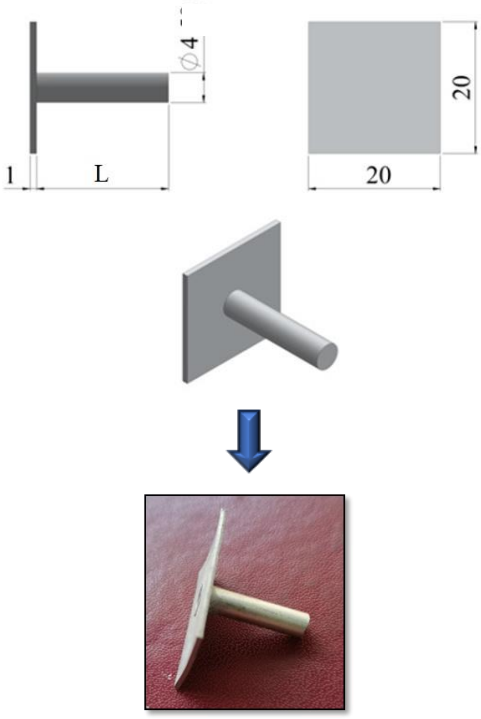
ตู้อบแห้งพลังงานความร้อนแสงอาทิตย์ต้นแบบเป็นชนิดหลังคารับแสงอาทิตย์แบบพาราโบลามีขนาดพื้นที่อบแห้งเท่ากับ 1x1 $m^2$ และมีพื้นที่รับแสงอาทิตย์ ($A_s$) เท่ากับ 1.16 $m^2$ ตู้อบแห้งมีโครงสร้างเป็นเหล็กกล่องเคลือบสารป้องกันสนิมและปิดผิวด้วยแผ่นโพลีคาบอเนตชนิดโปร่งใส ดังรูปที่ 1



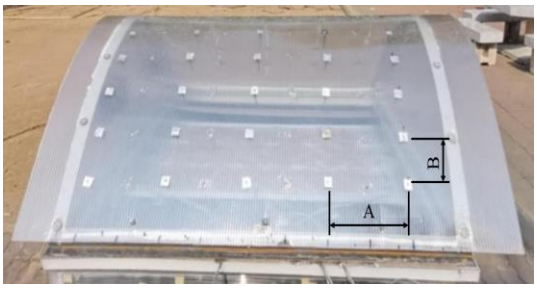
**รูปที่ 1** ตู้อบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดหลังคาพาราโบลา ขนาด 1x1 m2

### 2.2 การติดตั้งครีบนำความร้อน

การวิจัยด้านการเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนของตู้อบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ โดยทำการติดตั้งครีบนำความร้อนทรงกระบอกที่มีความยาวแตกต่างกัน (L) 10, 20, 30, 40 และ 50 mm. ตามลำดับ ดังรูปที่ 2 เพื่อประเมินผลกระทบของความยาวครีบต่อการถ่ายเทความร้อนภายในตู้อบแห้ง ครีบทั้งหมดถูกติดตั้งในตำแหน่งที่ระยะ A=200 mm. และ B=100 mm. จากจุดอ้างอิงภายในตู้อบแห้ง ดังรูปที่ 3 เพื่อศึกษาอิทธิพลของความยาวครีบที่ค่าต่าง ๆ ต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อน




**รูปที่ 2** ครีบนำความร้อนแบบทรงกระบอก




**รูปที่ 3** ตู้อบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดหลังคาสามเหลี่ยมมุมฉากที่ติดตั้งครีบตัวนำความร้อน

### 2.3 ตู้อบแห้งไฟฟ้า

ตู้อบแห้งที่ใช้งานในปัจจุบันของกลุ่มแม่บ้านเกษตรกรตำบลบ้านทราย เป็นตู้อบแห้งที่ใช้พลังงานไฟฟ้าสำหรับการอบแห้ง มีอัตราการผลิตขมิ้นชันอบแห้ง จำนวน 10 กิโลกรัม/ครั้ง

ซึ่งมีต้นทุนการอบแห้งเฉลี่ยอยู่ที่ 50 บาท/วัน คิดเป็น 5 บาท/กิโลกรัม/วัน (8 ชั่วโมง) โดยเก็บผลต้นทุนการอบแห้งจากเครื่องมือวัดวัตต์มิเตอร์



**รูปที่ 4** ตู้อบแห้งไฟฟ้า

## 3. การดำเนินงานวิจัย

### 3.1 วิธีการทดลอง

**1) เก็บผลในห้องทดลอง**

ทดลองการเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนตู้อบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งครีบตัวนำความร้อนที่ความยาวต่าง ๆ โดยจ่ายพลังงานความร้อนจากแหล่งกำเนิดความร้อนเสมือนจากหลอดไฟฮาโลเจน ขนาด 1500 W จำนวน 1 หลอด ทำการทดสอบดังนี้

1.1) ทดสอบหาค่าความเข้มรังสีแสงอาทิตย์เสมือนของหลอดไฟฮาโลเจน ด้วยเครื่องวัดค่าความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ จำนวน 100 จุด ดังรูปที่ 5

1.2) ทดสอบหาค่าอัตราการไหลจากเครื่องวัดค่าความเร็วของอากาศ รุ่น DT-619 บริเวณทางเข้าและทางออกอากาศของตู้อบแห้ง จำนวน 6 ค่าความเร็ว ดังรูปที่ 6

1.3) ทดสอบหาค่าอุณหภูมิภายในตู้อบแห้งบริเวณพื้นที่อบแห้ง (ถาดอบแห้ง) โดยติดตั้งจุดวัดอุณหภูมิ จำนวน 10 จุด เฉลี่ยเท่า ๆ กัน เต็มพื้นที่ ดังรูปที่ 7

1.4) นำผลการทดสอบมาคำนวณหาค่าอัตราการไหลของอากาศ การถ่ายเทความร้อน และประสิทธิภาพเชิงพลังงานตู้อบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ ($\eta_E$) ที่ค่าอัตราการไหลต่าง ๆ

**2) ทดสอบเก็บผลผลิตภัณฑ์**

2.1) ทดสอบหาค่าน้ำหนักผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการอบแห้ง ณ ช่วงเวลาทดสอบต่าง ๆ

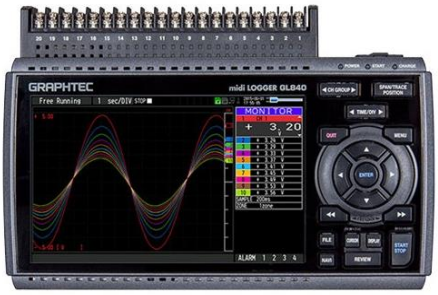
2.2) นำผลการทดสอบมาคำนวณหาอัตราความชื้นของผลิตภัณฑ์ (drying rate) และประสิทธิภาพเชิงความร้อนของตู้อบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์




**รูปที่ 5** เครื่องวัดค่าความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ รุ่น SMP-1116SD



**รูปที่ 6** เครื่องวัดค่าความเร็วของอากาศ รุ่น DT-619




**รูปที่ 7** เครื่องวัดค่าอุณหภูมิ รุ่น midi logger gl840

### 3.2 สมการ

อัตราส่วนความชื้น คือ สัดส่วนของปริมาณน้ำที่มีอยู่ภายในวัตถุดิบเมื่อเทียบกับมวลของวัตถุดิบ โดยสามารถแสดง 2 รูปแบบ ได้แก่ อัตราส่วนความชื้นมาตรฐานเปียก (Wet Basis) และอัตราส่วนความชื้นมาตรฐานแห้ง (Dry Basis)

ความชื้นมาตรฐานเปียก (wet basis): $M_w$

$$M_w = \frac{W-d}{W} \times 100 \qquad (1)$$

ความชื้นมาตรฐานแห้ง (Dry basis): $M_d$

$$M_d = \frac{W-d}{d} \times 100 \qquad (2)$$

เมื่อ $M_W$ คือ ความชื้นมาตรฐานเปียก ,*% w.b.*

$M_d$ คือ ความชื้นมาตรฐานแห้ง, *% db.*

$W$ คือ มวลของวัสดุ, *kg*

$d$ คือ มวลของวัสดุแห้ง, *kg*

อัตราการไหลเชิงมวล (Mass Flow Rate) คือ อัตราการไหลของปริมาณของไหลที่แสดงโดยมวลในหนึ่งหน่วยเวลา

$$\dot{m} = \rho \bar{V} A_c \quad (3)$$

เมื่อ $\dot{m}$ คือ อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ, kg/s

$\rho$ คือ ความหนาแน่นของอากาศ, kg/m$^3$

$\bar{V}$ คือ ค่าเร็วเฉลี่ยของอากาศ, m/s

$A_c$ คือ พื้นที่หน้าตัดทางเข้าและทางออก, m$^2$

อัตราการถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer) คือ ความสามารถในการถ่ายโอนพลังงานจากแหล่งสะสมความร้อนที่มีอุณหภูมิสูงไปยังแหล่งสะสมความร้อนที่มีอุณหภูมิต่ำ

$$\dot{Q} = \dot{m} C_p \left( T_e - T_i \right) \quad (4)$$

เมื่อ $\dot{Q}$ คือ อัตราการถ่ายโอนความร้อน, W

$\dot{m}$ คือ อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ, kg/s

$C_p$ คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะเฉลี่ย, J/kg.$^\circ$C

$T_i$ คือ อุณหภูมิที่ทางเข้าตู้อบแห้ง, $^\circ C$

$T_e$ คือ อุณหภูมิที่ทางออกตู้อบแห้ง, $^\circ C$

ประสิทธิภาพเชิงพลังงาน $\left( \eta_E \right)$ คือ ความ สามารถการเปลี่ยนพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์เป็นพลังงานความร้อนที่ใช้สำหรับอบแห้ง

$$\eta_E = \frac{\dot{m} C_p \left( T_e - T_i \right)}{G_T A_s} \quad (5)$$

เมื่อ $\eta_E$ คือ ประสิทธิภาพเชิงพลังงาน

$A_s$ คือ พื้นที่รับแสงอาทิตย์, $m^2$

$G_T$ คือ รังสีแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบบนระนาบพื้นที่รับแสงอาทิตย์, $W/m^2$

ประสิทธิภาพเชิงความร้อนตู้อบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ ($\eta_T$) หมายถึง อัตราส่วนของพลังงานความร้อนที่ใช้ในการระเหยน้ำออกจากผลิตภัณฑ์เทียบกับพลังงานแสงอาทิตย์ที่ให้กับตู้อบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์

$$\eta_T = \frac{\dot{m}_w h_{fg}}{G_T A_s} \times 100 \quad (6)$$

เมื่อ $\eta_T$ คือ ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของแผงเก็บรังสีดวงอาทิตย์, %

$\dot{m}_w$ คือ อัตราน้ำที่ระเหยออกจากผลิตภัณฑ์, kg/s

$h_{fg}$ คือ ความร้อนแฝงของน้ำที่ระเหยออกจากผลิตภัณฑ์ (ไอน้ำ), kJ/kg

สถิติในงานวิจัย หมายถึง สถิติพื้นฐานที่ใช้ในงานวิจัย โดยเน้นการวิเคราะห์ข้อมูลเบื้องต้นของผู้ตอบแบบสอบถาม โดยใช้สถิติคำนวณค่าร้อยละ (Percentage) เพื่อแปลความหมายข้อมูลส่วนบุคคล และใช้สูตรค่าเฉลี่ยเลขคณิต (Arithmetic Mean) ดังนี้

การหาค่าร้อยละ (Percentage)

$$P = \frac{f}{n} \times 100 \quad (7)$$

เมื่อ $P$ คือ ค่าร้อยละ

$f$ คือ ความถี่ที่ต้องการแปลงค่าร้อยละ

$n$ คือ จำนวนความถี่ทั้งหมด

การหาค่าเฉลี่ยเลขคณิต (Arithmetic mean)

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^{n} x_i}{n} \quad (8)$$

เมื่อ $\bar{x}$ คือ ค่าเฉลี่ยเลขคณิต

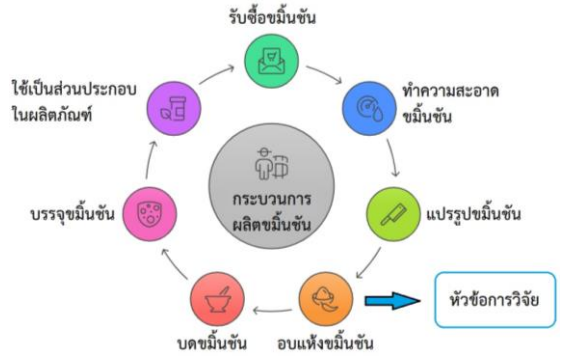
$x_i$ คือ ค่าความถี่ที่ตำแหน่งใด ๆ

## 4. ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

### 4.1 การวิเคราะห์กระบวนการผลิตขมิ้นชันอบแห้ง

จากการลงพื้นที่เก็บข้อมูลวิจัยสำหรับพัฒนาฯ กับประธานกลุ่มแม่บ้านเกษตรกรตำบลบ้านทราย พบว่ากระบวนการผลิตขมิ้นชันอบแห้งในระดับชุมชนเริ่มต้นจากการรับซื้อขมิ้นชันสดจากชาวบ้านในพื้นที่ใกล้เคียงเพื่อเป็นการสร้างรายได้แก่เกษตรกรท้องถิ่น พร้อมทั้งช่วยลดต้นทุนด้านการขนส่งวัตถุดิบ ต่อมาได้นำขมิ้นชันมาทำความสะอาดเพื่อขจัดสิ่งสกปรกและเศษดินออก ก่อนจะนำแปรรูปเป็นแผ่นบาง ๆ เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสสำหรับการอบแห้ง ลดระยะเวลาในการทำแห้ง และรักษาคุณภาพของสาร สำคัญในขมิ้นชัน จากนั้นจะนำขมิ้นชันเข้าเครื่องอบแห้ง โดยใช้เวลาประมาณ 6 – 8 ชั่วโมง หลังจากขมิ้นชันผ่านกระบวนการอบแห้งแล้วจะมีนำขมิ้นชันมาบดเป็นผงละเอียดเพื่อให้ง่ายต่อการนำไปแปรรูปในผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ถัดมาจะทำการบรรจุขมิ้นชันผงลงในภาชนะที่มีฝาปิดสนิท เพื่อป้องกันความชื้นจากภายนอกซึ่งเป็นการรักษาคุณภาพและความปลอดภัยของผลิตภัณฑ์ในระยะยาว สุดท้ายจะนำขมิ้นชันไปใช้

เป็นวัตถุดิบในการผลิตผลิตภัณฑ์สมุนไพรต่าง ๆ เช่น ยาหม่อง น้ำยาสระผม ครีมนวด หรือผลิตภัณฑ์เสริมสุขภาพอื่น ๆ ดังรูปที่ 8




**รูปที่ 8** แผนภาพกระบวนการผลิตผงขมิ้นชันสำหรับนำไปเป็นส่วนผลิตผลิตภัณฑ์

จากการศึกษากระบวนการผลิตผงขมิ้นชันของกลุ่มวิสาหกิจชุมชน พบว่ากระบวนการผลิตประกอบด้วยหลายขั้นตอน ได้แก่ การรับซื้อวัตถุดิบ การทำความสะอาด การแปรรูปเป็นแผ่นบาง การอบแห้ง การบด การบรรจุ และการนำไปใช้ในผลิตภัณฑ์สมุนไพร ซึ่งในแต่ละขั้นตอนมีต้นทุนที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ ต้นทุนวัตถุดิบ ค่าแรงงาน และต้นทุนพลังงาน โดยข้อมูลเชิงคุณภาพที่ได้จากการสัมภาษณ์ประธานกลุ่มฯ และผู้ปฏิบัติงานระบุว่าต้นทุนด้านวัตถุดิบและค่าแรงเป็นตัวแปรที่มีความผันผวนและไม่สามารถควบคุมได้ ในขณะที่ต้นทุนพลังงานโดยเฉพาะจากกระบวนการอบแห้งเป็นปัจจัยที่สามารถบริหารจัดการได้

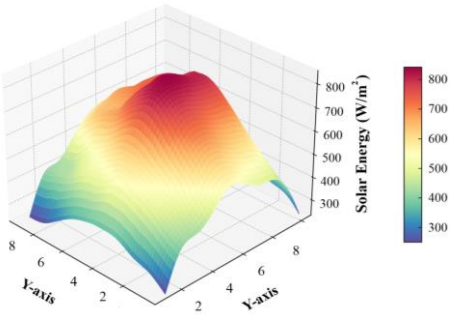
ดังนั้นเพื่อแก้ไขปัญหาต้นทุนการผลิตอย่างเป็นรูปธรรม ผู้วิจัยจึงมุ่งเน้นการพัฒนาอุปกรณ์อบแห้งที่สามารถลดการใช้พลังงาน โดยอาศัยข้อมูลกระบวนการผลิตขมิ้นชันอบแห้งที่วิเคราะห์ได้เป็นฐานในการออกแบบวิจัย โดยเน้นการพัฒนาตู้อบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพสูง เพื่อทดแทนการใช้ตู้อบแห้งไฟฟ้าแบบดั้งเดิม การดำเนินการดังกล่าวเป็นแนวทางที่สอดคล้องกับความต้องการของกลุ่มวิสาหกิจชุมชน ทั้งในด้านการลดต้นทุนการผลิตและการส่งเสริมการใช้พลังงานทดแทนอย่างยั่งยืนในภาคการเกษตร

### 4.2 การกระจายความเข้มรังสีแสงอาทิตย์

รูปที่ 9 (ก) จากการทดลองการกระจายพลังงานแสงอาทิตย์ที่วัดได้ภายในตู้อบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ภายใต้การจำลองรังสีแสงอาทิตย์ด้วยหลอดฮาโลเจนถูกนำเสนอในรูปแบบแผนภาพ 3 มิติ โดยแสดงค่าพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar Radiation) บนแกนตั้ง (z-axis) ส่วนแกนระนาบ (x-y axis) แทนตำแหน่งพื้นที่รับแสงของหลังคาตู้อบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ โดยทำการแบ่งพื้นที่ออกเป็นช่วงแนวระนาบเพื่อแสดงตำแหน่งที่วัดค่าได้จริง




(ก) แผนภาพการกระจายรังสีความร้อนเสมือน

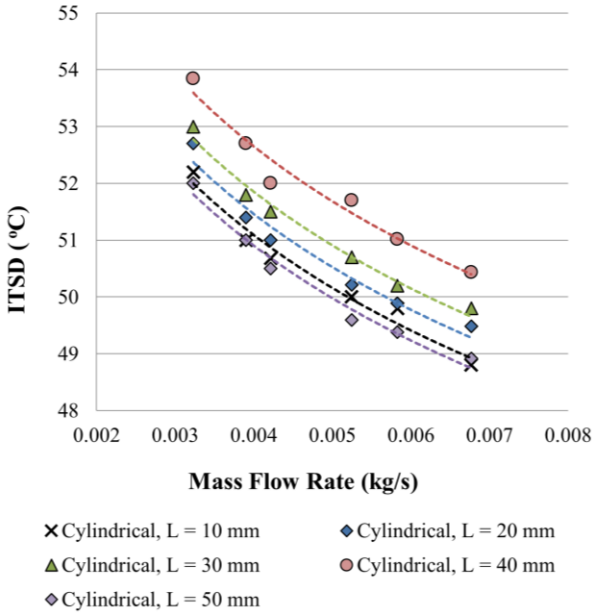



(ข) การกระจายรังสีความร้อนเสมือน 3 มิติ

**รูปที่ 9** การกระจายความร้อนเสมือนที่หลังคาตู้อบแห้ง

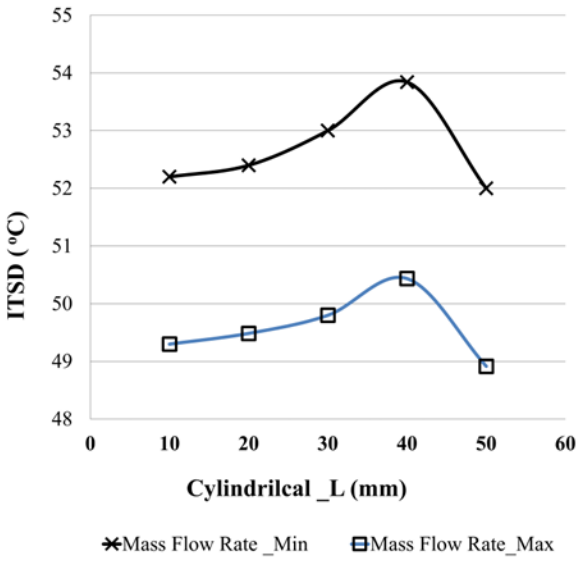
รูปที่ 9 (ข) แสดงการกระจายรังสีความร้อนเสมือน 3 มิติ พบว่า ลักษณะการกระจายรังสีพลังงานแสงอาทิตย์มีลักษณะรูปแบบโดมคว่ำ ซึ่งมีค่าสูงสุดบริเวณกึ่งกลางพื้นที่รับแสงและลดลงตามระยะห่างจากจุดศูนย์กลางไปยังขอบพื้นที่ ทำให้พลังงานรังสีจากหลอดฮาโลเจนถูกส่งออกแบบสมมาตรในแนวรัศมี โดยพื้นที่ของหลังคาตู้อบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์สามารถรับรังสีพลังงานแสงอาทิตย์มีค่าระหว่าง 237–834 W/m² โดยมีบางตำแหน่งที่สามารถรับได้สูงถึงช่วง 834 W/m² ซึ่งเป็นค่าสูงสุดของระบบ โดยค่าเฉลี่ยพลังงานแสงอาทิตย์ที่วัดได้ตลอดพื้นผิวอยู่ที่ 547 W/m² ซึ่งแสดงถึงประสิทธิภาพการกระจายรังสีที่เหมาะสมสำหรับการทดลอง

### 4.3 อิทธิพลของครีบตัวนำความร้อนที่มีผลต่ออุณหภูมิภายในตู้อบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์




**รูปที่ 10** ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลเชิงมวลกับอุณหภูมิภายในตู้อบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ (ITSD) ที่ติดตั้งครีบทรงกระบอก

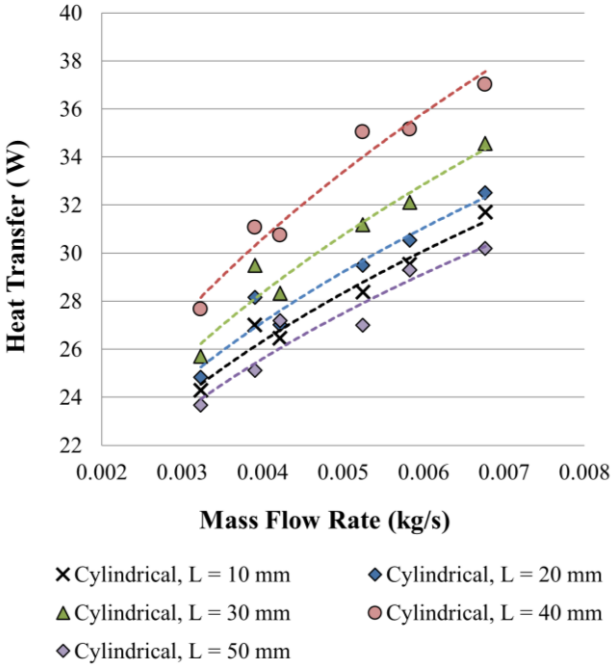
รูปที่ 10 แสดงผลข้อมูลเชิงทดลองที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลเชิงมวลกับอุณหภูมิภายในตู้อบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ (ITSD) ที่มีการติดตั้งครีบทรงกระบอกที่มีความยาวแตกต่างกัน (L=10–50 mm.) พบว่า ความยาวของครีบจะส่งผลโดยตรงต่อระดับอุณหภูมิภายในตู้อบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ โดยครีบที่มีความยาว 40 mm. สามารถเพิ่มอุณหภูมิภายในตู้อบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ได้สูงสุดระหว่าง 54–51 ℃ รองลงมาคือครีบยาว 30 mm. (53–50 ℃), 20 mm. (52–49.5 ℃), 10 mm. (51–49 ℃) และ ต่ำสุดคือครีบยาว 50 mm. ซึ่งให้ค่าอุณหภูมิระหว่าง 50.5–48.5 ℃ ตามลำดับ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า การเลือกความยาวของครีบที่เหมาะสมมีบทบาทสำคัญต่อประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อน และเมื่อเลือกใช้ครีบที่มีความยาวมากเกินไป เช่น ครีบยาว 50 mm. อาจส่งผลให้เกิดการสูญเสียพลังงานความร้อนระหว่างทางการนำภายในครีบ ทำให้อุณหภูมิภายในตู้อบแห้งลดลงอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากความสามารถในการนำความร้อนของครีบมีขีดจำกัด ซึ่งสัมพันธ์กับความยาว ระยะการนำ และการสูญเสียพลังงานโดยการแผ่รังสี




**รูปที่ 11** ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวครีบทรงกระบอกกับอุณหภูมิภายในตู้อบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์

จากรูปที่ 11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวครีบทรงกระบอกกับอุณหภูมิภายในตู้อบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ (ITSD) ที่อัตราการไหลต่ำสุดและสูงสุด พบว่าเมื่ออัตราการไหลเชิงมวลเพิ่มขึ้นจาก $2.5\times10^{-3}$ เป็น $7.0\times10^{-3}$ kg/m$^3$ อุณหภูมิภายในตู้อบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์มีแนวโน้มลดลงอย่างชัดเจนในทุกความยาวครีบ ซึ่งเกิดจากการเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลของอากาศจะส่งผลให้พลังงานความร้อนภายในระบบถูกพาออกไปมากขึ้น ทำให้เกิดการสะสมความร้อนภายในตู้อบน้อยลง แม้ในกรณีที่ใช้ครีบที่มีประสิทธิภาพสูงอย่าง L=40 mm. ก็ยังได้รับผลกระทบจากการลดลงของอุณหภูมิ อย่างไรก็ตามค่าของอุณหภูมิภายในตู้อบพลังงานแสงอาทิตย์ในทุกช่วงการไหลของอากาศที่ติดตั้งครีบ L=40 mm. ยังคงมีค่าสูงกว่าการใช้ครีบความยาวอื่นภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน ซึ่งสะท้อนถึงความเหมาะสมของการออกแบบครีบที่มีความยาว 40 mm. จะช่วยในการเพิ่มอุณหภูมิภายในตู้อบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์

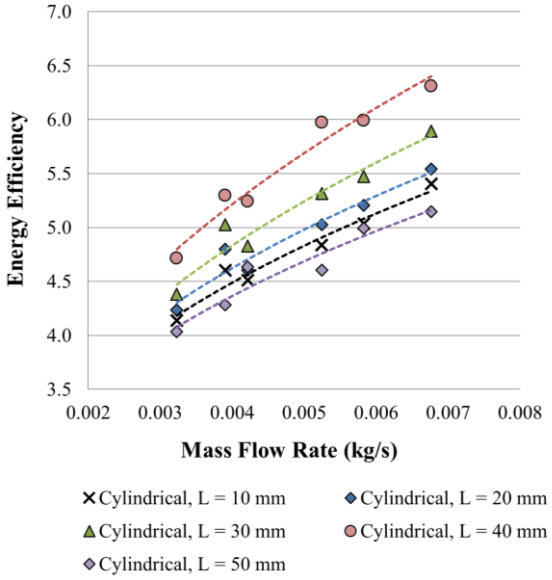
**4.4 อิทธิพลของครีบตัวนำความร้อนที่มีผลต่อการถ่ายโอนความร้อนของตู้อบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์**




**รูปที่ 12** ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลเชิงมวลกับการถ่ายเทความร้อน

รูปที่ 12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลเชิงมวลกับการถ่ายเทความร้อน พบว่าการถ่ายเทความร้อนเกิดความสัมพันธ์เชิงบวกระหว่างอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศกับค่าการถ่ายเทความร้อนภายใต้เงื่อนไขการติดตั้งครีบทรงกระบอกที่มีความยาวแตกต่างกัน (L=10–50 mm.) โดยเฉพาะครีบที่มีความยาว L=40 mm. ให้ค่าการถ่ายเทความร้อนสูงสุดตลอดช่วงอัตราการไหลเชิงมวลทดสอบ โดยเริ่มต้นมีค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนเท่ากับ 28 W และเพิ่มขึ้นจนถึง 37 W เมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้น ผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องผลของการเพิ่มอุณหภูมิภายในตู้อบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ (รูปที่ 10-11) ที่แสดงว่า L=40 mm. สามารถเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนให้กับตู้อบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ให้อยู่ในระดับสูงสุดและส่งผลให้อุณหภูมิภายในตู้อบแห้งเพิ่มขึ้นสูงสุด สะท้อนให้เห็นถึงประสิทธิภาพของครีบที่มีความยาวเหมาะสมต่อการแลกเปลี่ยนความร้อน การเพิ่มความยาวของครีบช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสในการแลกเปลี่ยนพลังงานความร้อนระหว่างแหล่งพลังงานกับอากาศที่ไหลผ่าน ส่งผลให้การถ่ายเทพลังงานมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น อย่างไรก็ตามครีบที่มีความยาวเกินเงื่อนไขที่เหมาะสม เช่น L=50 mm. ที่มีพื้นที่ผิวมากที่สุดในเงื่อนไขทดสอบ แต่กลับทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานความร้อนผ่านครีบมากกว่าที่สามารถถ่ายโอนได้ ส่งผลให้ค่าการถ่ายเทความร้อนลดลงอย่างชัดเจน นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่ออัตราการไหลเชิงมวลของอากาศเพิ่มขึ้น ค่าการถ่ายเทความร้อนจะเพิ่มขึ้นตามในทุกความยาวของครีบ เนื่องมาจากการพาความร้อนที่เพิ่มขึ้นจากการไหลของอากาศที่มีความเร็วสูงขึ้น แต่อัตราการแลกเปลี่ยนพลังงานกลับมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น โดยเฉพาะในกรณีของครีบ L=40 mm. ซึ่งสามารถเพิ่มค่าการถ่ายเทความร้อนให้กับตู้อบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ได้ในระดับสูงสุดในทุกช่วงของอัตราการไหลที่ทำการทดลอง

**4.5 อิทธิพลของครีบตัวนำความร้อนที่มีผลต่อประสิทธิภาพเชิงพลังงานของตู้อบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์**

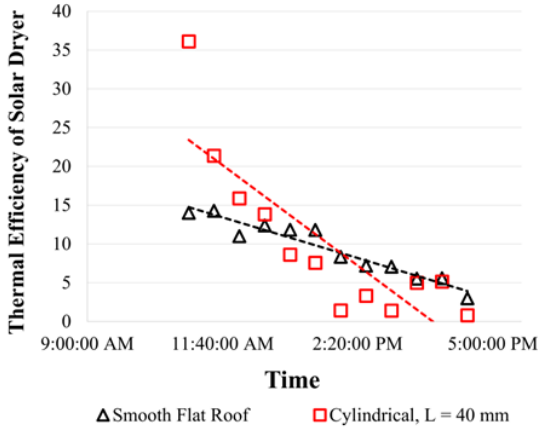



**รูปที่ 13** ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศกับประสิทธิภาพเชิงพลังงานของตู้อบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์

รูปที่ 13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ (Mass Flow Rate) กับประสิทธิภาพเชิงพลังงาน (Energy Efficiency) ของตู้อบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ภายใต้เงื่อนไขการติดตั้งครีบทรงกระบอกที่มีความยาวแตกต่างกัน (L=10-50 mm.) พบว่าครีบที่มีความยาว L=40 mm. ให้ค่าประสิทธิภาพเชิงพลังงานสูงที่สุดในทุกช่วงของอัตราการไหลเชิงมวล โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วงประมาณ 4.7–6.3% ซึ่งสูงกว่าครีบความยาวอื่นอย่างชัดเจน ขณะที่ครีบ L=30 mm. ให้ค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 4.4–5.9% ตามด้วย L=20 mm. (4.2–5.5%), L=10 mm. (4.1–5.4%) และต่ำสุดคือครีบ L=50 mm. (4.0–5.1%) ตามลำดับ จากข้อมูลดังกล่าวสอดคล้องกับทฤษฎีการถ่ายเทความร้อนผ่านครีบ (รูปที่ 12) ที่ระบุว่า ความยาวครีบที่เหมาะสมจะช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวในการแลกเปลี่ยนพลังงานจากพื้นผิวดูดซับเข้าสู่อากาศได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะในระบบที่อาศัยการพาความร้อนจากการไหลของอากาศ แต่เมื่อครีบมีความยาวมากเกินเงื่อนไขที่เหมาะสมจะเกิดการสูญเสียพลังงานจากการนำและแผ่รังสีความร้อนออกจากผิวครีบ

ก่อนที่จะถ่ายโอนไปยังอากาศ ส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพเชิงพลังงานโดยรวมลดลง

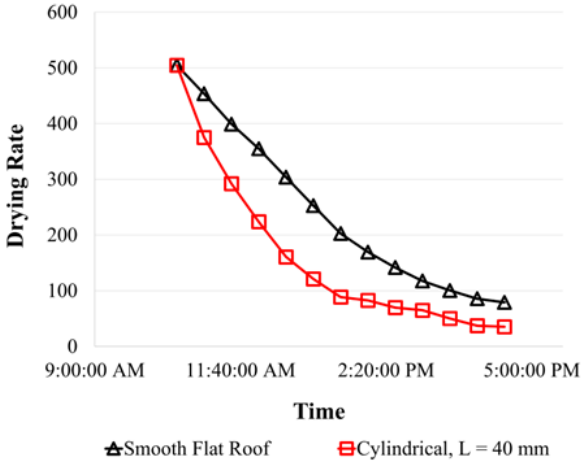
### 4.6 อิทธิพลของครีบตัวนำความร้อนที่มีผลต่อประสิทธิภาพตู้อบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์




**รูปที่ 14** เปรียบเทียบประสิทธิภาพเชิงความร้อนของตู้อบพลังงานแสงอาทิตย์ระหว่างตู้อบแห้งที่ไม่ติดครีบและระบบที่ติดตั้งครีบทรงกระบอกยาว

รูปที่ 14 แสดงผลประสิทธิภาพเชิงความร้อนของตู้อบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ระหว่างกรณีที่ไม่ติดตั้งครีบนำความร้อนกับกรณีที่ติดตั้งครีบทรงกระบอกยาว 40 mm. พบว่าในกรณีของตู้อบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ที่ไม่มีการติดครีบมีแนวโน้มของค่าประสิทธิภาพที่ค่อนข้างสม่ำเสมอตลอดระยะเวลาอบแห้ง โดยเฉพาะในช่วงเวลา 10.30–16.30 น. ค่าประสิทธิภาพอยู่ในช่วงประมาณ 3–14% และมีค่าประสิทธิภาพเฉลี่ยประมาณ 9% ซึ่งแสดงถึงความสามารถของระบบในการรักษาการถ่ายเทพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ไปยังวัสดุได้ในระดับคงที่ แม้จะไม่มีอุปกรณ์เสริมในการช่วยเพิ่มการถ่ายเทความร้อน ในขณะที่ระบบที่ติดตั้งครีบ L = 40 mm. แสดงให้เห็นถึงค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่สูงกว่าอย่างชัดเจนในช่วงเริ่มต้นของการอบแห้ง โดยมีค่าสูงสุดที่ประมาณ 36% ในเวลา 10.30 น. และยังคงสูงกว่ากรณีไม่ติดครีบอย่างต่อเนื่องจนถึงประมาณเวลา 12.30 น. และเมื่อเข้าช่วงบ่ายค่าประสิทธิภาพกลับลดลงอย่างรวดเร็ว โดยมีค่าเฉลี่ยลดลงเหลือต่ำกว่า 10% ในช่วงบ่าย และต่ำกว่า 5% ในช่วงเวลา 14.00–16.30 น. ส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพเฉลี่ยตลอดช่วงการอบของระบบที่ติดตั้งครีบอยู่ที่ประมาณ 11% ผลการทดลองนี้ชี้ให้เห็นว่าการติดตั้งครีบจะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพได้ในช่วงต้นของกระบวนการอบแห้ง แต่การสูญเสียพลังงานความร้อนในช่วงบ่ายอาจเกิดจากการสะสมความร้อนที่ไม่สามารถถ่ายเทได้ทันหรือการไหลของอากาศที่เปลี่ยนแปลงไป

### 4.7 อัตราการอบแห้งของผลิตภัณฑ์ขมิ้นชัน




**รูปที่ 15** เปรียบเทียบระหว่างอัตราการอบแห้งขมิ้นชันภายในตู้อบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบไม่ติดครีบและแบบติดครีบทรงกระบอกยาว 40 mm.

รูปที่ 15 แสดงผลการเปรียบเทียบอัตราการอบแห้งของขมิ้นชันระหว่างตู้อบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบไม่ติดครีบและแบบที่ติดตั้งครีบทรงกระบอกยาว 40 mm. พบว่าในช่วงเริ่มต้นระหว่างเวลา 10.30 น. ทั้งสองระบบมีอัตราการอบแห้งเริ่มต้นเท่ากันที่ 500% db โดยตู้อบแห้งที่ติดครีบมีค่าอัตราการอบแห้งลดลงอย่างรวดเร็วกว่าตู้อบแห้งไม่ติดครีบโดยเฉพาะในช่วงเวลา 10.30-12.00 น. ซึ่งสะท้อนให้เห็นถึงประสิทธิภาพของการถ่ายเทความร้อนที่มีประสิทธิภาพในช่วงต้นของกระบวนการอบแห้ง โดยครีบทรงกระบอกมีบทบาทสำคัญในการถ่ายเทพลังงานความร้อนไปยังพื้นผิวของขมิ้นชันได้อย่างรวดเร็ว ส่งผลให้น้ำอิสระที่อยู่บนผิววัสดุสามารถระเหยออกได้ในระยะเวลาอันสั้น ซึ่งเป็นลักษณะของช่วงอบแห้งแบบอัตราเร็ว (constant rate period) ขณะที่ระบบที่ไม่ติดครีบมีแนวโน้มลดลงของอัตราการอบแห้งที่ช้ากว่าและต่อเนื่องมากกว่า สะท้อนถึงกระบวนการถ่ายเทความร้อนที่จำกัดในระบบที่ไม่มีครีบช่วยนำความร้อน เมื่อเข้าสู่ช่วงบ่ายทั้ง 2 ระบบ เข้าสู่ช่วงอบแห้งช้าลงอย่างชัดเจน เนื่องจากน้ำที่เหลืออยู่ในวัสดุส่วนใหญ่เป็นน้ำที่จับตัวแน่น (bound moisture) ซึ่งต้องใช้พลังงานในการระเหยมากขึ้น ทำให้เกิดการลดลงของอัตราการอบแห้งอย่างต่อเนื่อง ผลลัพธ์ดังกล่าวจึงยืนยันว่าการติดตั้งครีบสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนและเร่งการลดความชื้นของผลิตภัณฑ์ได้ในช่วงต้นของกระบวนการอบแห้งอย่างมีประสิทธิภาพ

### 4.8 การลดต้นทุนด้านพลังงานด้วยการตู้อบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์

การใช้งานตู้อบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ในระดับชุมชนพบว่าการนำระบบดังกล่าวมาใช้แทนการอบแห้งด้วยตู้อบ

พลังงานไฟฟ้ามีส่วนสำคัญในการช่วยลดต้นทุนพลังงานได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกลุ่มเกษตรกรชุมชนที่มีข้อจำกัดด้านค่าใช้จ่ายการผลิต การประยุกต์ใช้พลังงานแสงอาทิตย์ที่เป็นแหล่งพลังงานสะอาดและไม่ต้องเสียค่าใช้จ่ายเพิ่มเติมจะช่วยลดภาระค่าไฟฟ้าเฉลี่ยประมาณ 5 บาท/กิโลกรัม/วัน ในการอบแห้งขมิ้นชันเมื่อเทียบกับระบบอบแห้งด้วยพลังงานไฟฟ้าที่กลุ่มแม่บ้านเกษตรกรตำบลบ้านทรายใช้งานในปัจจุบัน ผลลัพธ์นี้สะท้อนถึงศักยภาพของพลังงานทดแทนในการยกระดับความสามารถในการแข่งขันทางเศรษฐกิจของผลิตภัณฑ์

การใช้ตู้อบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ยังมีข้อจำกัดในเรื่องของฤดูกาล โดยตู้อบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์จะสามารถใช้งานได้เต็มประสิทธิภาพในช่วงเดือนมกราคม - พฤษภาคม (ฤดูร้อน) เป็นช่วงที่มีค่าความหนาแน่นพลังงานแสงอาทิตย์ระดับสูงในประเทศไทย และเดือนพฤศจิกายน-ธันวาคม (ฤดูหนาว) เป็นช่วงที่มีค่าความหนาแน่นพลังงานแสงอาทิตย์ระดับปานกลางในประเทศไทย โดยในช่วงที่มีระดับพลังงานแสงอาทิตย์ไม่เพียงพอสำหรับการใช้ตู้อบแห้งขมิ้นชันทางกลุ่มจึงนำเครื่องอบแห้งมาใช้งานทดแทน โดยปัญหาดังกล่าวจึงเป็นปัจจัยที่ต้องนำมาพิจารณาในการวางแผนการผลิตสินค้าเกษตรแปรรูปเพื่อให้สอดคล้องกับฤดูกาลและความพร้อมของพลังงานจากธรรมชาติ

ด้านประสิทธิภาพกระบวนการอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์จะใช้เวลาในการลดความชื้นของขมิ้นชันนานกว่าตู้อบแห้งไฟฟ้าประมาณ 30% แต่ก็ไม่มีผลกระทบเชิงลบต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้ ความชื้นสุดท้ายที่วัดได้ยังคงอยู่ในช่วงมาตรฐานที่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้งานการแปรรูปเชิงพาณิชย์ ซึ่งเป็นตัวชี้วัดที่สำคัญว่าสามารถใช้เทคโนโลยีนี้ได้โดยไม่ส่งผลกระทบต่อมาตรฐานผลิตภัณฑ์

**ตารางที่ 1** ความพึงพอใจของผู้รับบริการ

| ที่ | หัวข้อ | คะแนนความพึงพอใจ | | | | | $\bar{X}$ | SD | ร้อยละ | ความหมาย |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | | | | |
| 1 | การออกแบบเครื่องอบแห้ง | 65 | 28 | - | - | - | 4.65 | 0.49 | 93.00 | มากที่สุด |
| 2 | ความปลอดภัยของเครื่องอบแห้ง | 70 | 24 | - | - | - | 4.70 | 0.47 | 94.00 | มากที่สุด |
| 3 | การบำรุงรักษาเครื่องอบแห้ง | 85 | 12 | - | - | - | 4.85 | 0.37 | 97.00 | มากที่สุด |
| 4 | คุณภาพของผลิตภัณฑ์ | 65 | 28 | - | - | - | 4.65 | 0.49 | 93.00 | มากที่สุด |
| 5 | ความคุ้มค่าในการลงทุน | 20 | 52 | 9 | - | - | 4.05 | 0.60 | 81.00 | มาก |
| ภาพรวม | | | | | | | 4.58 | 0.55 | 91.60 | มากที่สุด |

จากตารางพบว่า ผู้ตอบแบบสอบถามมีความพึงพอใจต่อโครงการ “การเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์โดยใช้ครีบน้ำความร้อนรูปทรงกระบอก”

ในภาพรวมอยู่ในระดับมากที่สุด ( $\bar{x}$= 4.58, SD = .55) คิดเป็นร้อยละ 91.60 เมื่อพิจารณาเป็นรายข้อ โดยเรียงลำดับจากค่าเฉลี่ยมากที่สุดไปน้อยที่สุด 3 อันดับแรก ได้แก่ การบำรุงรักษาเครื่องอบแห้ง ($\bar{x}$= 4.85, SD = .37) คิดเป็นร้อยละ 97 รองลงมา คือ ความปลอดภัยของเครื่องอบแห้ง ($\bar{x}$= 4.70, SD = .47) คิดเป็นร้อยละ 94 และการออกแบบเครื่องอบแห้งและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ มีค่าเฉลี่ยเท่ากัน ($\bar{x}$= 4.65, SD = .49) คิดเป็นร้อยละ 93 โดยผู้รับบริการเห็นว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ต้นแบบมีคุณภาพตรงตามความต้องการใช้งาน ทั้งในเรื่องของความชื้นที่เหมาะสม ลักษณะเนื้อสัมผัส สี และกลิ่นของขมิ้นชันที่คงคุณลักษณะเดิม นอกจากนี้ ด้านความปลอดภัยในการใช้งานของเครื่องได้รับการประเมินว่าสามารถใช้งานได้อย่างมั่นใจ ไม่มีความเสี่ยงต่อการเกิดอันตรายจากความร้อนหรือการสัมผัสชิ้นส่วนที่เป็นอันตราย ขณะเดียวกันด้านการออกแบบก็ได้รับการยอมรับว่าเอื้อต่อการใช้งานจริง มีความสะดวกทั้งในด้านการจัดวางผลิตภัณฑ์ การเปิด-ปิด และการดูแลรักษาเครื่อง ทั้งนี้การได้รับคะแนนประเมินในระดับสูงสะท้อนว่าการพัฒนาเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดครีบนำความร้อนรูปทรงกระบอกนั้นไม่เพียงแต่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพทางเทคนิคในการอบแห้งเท่านั้น แต่ยังตอบสนองต่อความต้องการและความคาดหวังของผู้ใช้งานในเชิงปฏิบัติได้เป็นอย่างดี เป็นสัญญาณเชิงบวกต่อการขยายผลนำไปใช้จริงในระดับชุมชนหรือวิสาหกิจที่มีการผลิตสินค้าในด้านอื่น ๆ

## 5. สรุปผลการวิจัย

จากผลการทดลอง พบว่าการติดตั้งครีบตัวนำความร้อนรูปทรงกระบอกในตู้อบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อการเพิ่มอุณหภูมิภายในและการถ่ายเทความร้อนภายในตู้อบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ โดยเฉพาะครีบที่มีความยาว 40 mm. สามารถเพิ่มอุณหภูมิได้สูงสุดถึง 54 °C และให้การถ่ายเทความร้อนสูงสุดถึง 37 W เมื่ออัตราการไหลเชิงมวลของอากาศเพิ่มขึ้น นอกจากนี้การศึกษายังแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์เชิงบวกระหว่างความยาวครีบกับการถ่ายเทพลังงาน ซึ่งความยาวครีบที่เหมาะสมสามารถเพิ่มพื้นที่ผิวในการแลกเปลี่ยนความร้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในทางกลับกัน ครีบที่มีความยาวมากเกินไป เช่น 50 mm. ส่งผลให้เกิดการสูญเสียความร้อนผ่านผิวครีบมากเกินไป ทำให้ประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อนลดลง ส่งผลให้ประสิทธิภาพโดยรวมของระบบลดลงตามไปด้วย

สำหรับการติดครีบที่ความยาว 40 mm. จะส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพเชิงพลังงานเพิ่มขึ้นสูงสุดในทุกช่วงของอัตราการไหล โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง 4.7–6.3% ซึ่งสูงกว่าครีบที่ความยาวอื่นอย่างชัดเจน แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของการออกแบบครีบที่เหมาะสมในการส่งผ่านพลังงานความร้อนจากพื้นผิวดูดซับไปสู่อากาศภายในตู้อบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ สำหรับประสิทธิภาพเชิงความร้อนของตู้อบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งครีบกับไม่ติดครีบพบว่า ตู้อบแห้งที่ติดครีบจะให้ค่าประสิทธิภาพสูงกว่าอย่างชัดเจนในช่วงต้น (10.30-12.00 น.) โดยมีค่าสูงสุดถึง 36% เมื่อเข้าสู่ช่วงบ่ายค่าประสิทธิภาพจะลดลงแต่ค่าเฉลี่ยตลอดช่วงการอบแห้งยังคงสูงถึง 11% เทียบกับระบบไม่ติดครีบที่มีค่าเฉลี่ยเพียง 9% แสดงให้เห็นว่าการติดตั้งครีบสามารถเพิ่มประสิทธิภาพระบบได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะในช่วงเวลาที่มีพลังงานแสงอาทิตย์สูง

การนำตู้อบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้งานในระดับชุมชนสามารถลดต้นทุนค่าไฟฟ้าได้เฉลี่ยประมาณ 5 บาท/กิโลกรัม/วัน โดยเฉพาะในช่วงที่มีพลังงานแสงอาทิตย์หนาแน่นสูง (เดือนพฤศจิกายน-พฤษภาคม) แม้ว่าจะมีข้อจำกัดด้านฤดูกาลที่ต้องบริหารจัดการการผลิตให้เหมาะสมกับฤดูกาล สำหรับการสำรวจความพึงพอใจผู้รับบริการ พบว่าผู้ใช้งานมีความพึงพอใจอยู่ในระดับดีมาก คิดเป็นร้อยละ 91.55 สะท้อนถึงความเหมาะสมของเทคโนโลยีนี้ในการประยุกต์ใช้เพื่อพัฒนากระบวนการผลิตระดับชุมชนอย่างยั่งยืน

## 6. เอกสารอ้างอิง


[1] P.V. A. Kumar, A. James, and M. Srinivas, “Performance investigation of a novel multi-tray solar cabinet dryer with multi-point air supply,” *Thermal Science and Engineering Progress*, vol. 61, Art.no. 103515, 2025.

[2] M. S. Barghi Jahromi, V. Kalantar, H. S. Akhijahani, and H. Kargarsharifabad, “Recent progress on solar cabinet dryers for agricultural products equipped with energy storage using phase change materials,” *Journal of Energy Storage*, vol. 51, Art.no. 104434, 2022.

[3] A. Y. Kebede, M. T. Tigabu, A. T. Admase, and A. J. Bezie, “Performance evaluation of diminutive solar dryer for drying of green coffee beans: In Ethiopian highlands,” *Case Studies in Thermal Engineering,* vol. 65, Art.no. 105653, 2025.

[4] A. Y. Kerse, D. T. Embiale, and D. G. Gunjo, “Dehydration of red chilli using an indirect type forced convection solar dryer integrated with thermal energy storage,” *International Journal of Thermofluids,* vol. 26, Art.no. 101045, 2025.

[5] M. Kumar, P. Prabhansu, and P. V. Bhale, “Experimental investigation on dual-shaped solar greenhouse dryer: Performance and technoeconomic analysis,” *The Journal of Stored Products Research,* vol. 112, Art.no. 102621, 2025.

[6] C. Wannurak, “Solar dryer with solar collector to increase community economic value,” The *Journal of Industrial Technology Suan Sunandha Rajabhat University,* vol.12, no.2, pp.38–51, 2024. (In Thai).

[7] P.Maneechote, K.Thiansa, C. Nakornchaisri, T. Keothavikul, W. Maneechote, and K. Panya-ud, “Development of a Solar Dryer with LPG Gas with Automatic Temperature Control,” *Energy Innovation Journal*, vol.6,no.38, pp.418-422, 2021. (In Thai).

[8] S. Thipphawong, S.Srisawat, and S.Khieonok, “Development of Low-cost Solar Radiation Protection Drying Technology for Duangthong Community Enterprise Group, Phetchabun Province,” *The Journal of Industrial Technology Suan Sunandha Rajabhat University*, vol.17, no.2, pp.167–180, 2022. (In Thai).

[9] E. Nakwanon and M. Rachaneekornkrailas, “Design and Development of a Combined Energy Dryer for Temperature Control in All Weather Conditions,” *The Journal of Industrial Technology Suan Sunandha Rajabhat University*, vol.12, no.1, pp.71–78, 2024. (in Thai).

[10] A. Saisrikaew, A. Wannakayon, A. Praisinthu, and S. Dumnil, “Development of a solar oven for food processing controlled by Internet of Things (IoT) system,” *Surindra Rajabhat University Industrial Technology Journal*, vol.7, no.2, pp.42–52, 2022. (In Thai).

# เมตาเวิร์สสำหรับแหล่งการเรียนรู้และการท่องเที่ยวเชิงเกษตรจังหวัดลพบุรี
# Metaverse for learning resources and agricultural tourism in Lopburi Province

สจีวรรณ ปราชญ์ศรี
Sajeewan Pratsri

สาขาวิชาเทคโนโลยีดิจิทัล คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี
Digital Technology Program, Faculty of Information Technology, Thepsatri Rajaphat University
Email: Sajeewan.p@lawasri.tru.ac.th
Received: May 7, 2025; Revised: July 10, 2025; Accepted: November 14, 2025

**บทคัดย่อ**

งานวิจัยและพัฒนานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ (1) พัฒนาเมตาเวิร์สสำหรับแหล่งการเรียนรู้และการท่องเที่ยวเชิงเกษตรจังหวัดลพบุรี (2) ประเมินประสิทธิภาพของเมตาเวิร์สสำหรับแหล่งการเรียนรู้และการท่องเที่ยวเชิงเกษตรจังหวัดลพบุรี และ (3) ประเมินความพึงพอใจที่มีต่อการใช้เทคโนโลยีเมตาเวิร์สสำหรับแหล่งการเรียนรู้และการท่องเที่ยวเชิงเกษตรจังหวัดลพบุรี กลุ่มตัวอย่างที่ใช้ ในการวิจัย ได้แก่ กลุ่มตัวอย่าง จำนวน 150 คน ซึ่งคัดเลือกแบบเฉพาะเจาะจง เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย ประกอบด้วย (1) เมตาเวิร์สสำหรับแหล่งการเรียนรู้และการท่องเที่ยวเชิงเกษตรจังหวัดลพบุรี ประกอบด้วย บ้านสวนขวัญ ศูนย์อนุรักษ์ผึ้ง ฟาร์มเห็ดขจรวิทย์ โอเอซิสฟาร์ม และ สวนเหรียญทอง (2) แบบประเมินประสิทธิภาพของเมตาเวิร์สสำหรับแหล่งการเรียนรู้และการท่องเที่ยวเชิงเกษตรจังหวัดลพบุรี และ (3) แบบประเมินความพึงพอใจที่มีต่อการใช้เทคโนโลยีเมตาเวิร์สสำหรับแหล่งการเรียนรู้และการท่องเที่ยวเชิงเกษตรจังหวัดลพบุรี สถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล ได้แก่ ค่าเฉลี่ย ( $\mu$ )และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) ผลการวิจัยพบว่า ผลการประเมินประสิทธิภาพจากผู้เชี่ยวชาญมีคุณภาพอยู่ในระดับมาก ($\mu$ = 4.37, S.D. = 0.75) แสดงให้เห็นถึงการจัดการเนื้อหาและประสบการณ์ที่มีคุณภาพในการเรียนรู้และการท่องเที่ยวผ่านเทคโนโลยีเมตาเวิร์สสำหรับแหล่งการเรียนรู้และการท่องเที่ยวเชิงเกษตรจังหวัดลพบุรี และสามารถสร้างความตระหนักรู้และดึงดูดผู้ใช้จากกลุ่มเป้าหมายได้อย่างมีประสิทธิภาพ และประเมินความพึงพอใจจากกลุ่มตัวอย่างผู้ใช้งานอยู่ในระดับมาก ( $\mu$ = 4.42, S.D. = 0.77) แสดงให้เห็นถึงการตอบรับที่ดีจากผู้ใช้ที่ได้สัมผัสกับประสบการณ์ในเมตาเวิร์ส การใช้เทคโนโลยีนี้สามารถช่วยเสริมสร้างความรู้และเข้าใจในด้านการเกษตรและการท่องเที่ยวเชิงเกษตรได้ และช่วยเสริมสร้างความน่าสนใจให้กับการท่องเที่ยวอีกด้วย

**คำสำคัญ :** เทคโนโลยีเมตาเวิร์ส, แหล่งเรียนรู้, ท่องเที่ยวเชิงเกษตร

**Abstract**

The purpose of this study was to (1) develop a metaverse for agricultural learning and tourism in Lopburi Province, (2) evaluate the effectiveness of the metaverse for agricultural learning and tourism in Lopburi Province, and (3) assess the satisfaction of users regarding the use of metaverse technology for agricultural learning and tourism in Lopburi Province. The sample group for this research consisted of 150 individuals, selected through purposive sampling. The research tools included (1) the metaverse for agricultural learning and tourism in Lopburi Province consist Baan Suan Kwan, Bee Conservation Center, Kajonwit Mushroom Farm, Oasis Farm and Gold Medal Garden, (2) an evaluation form for the effectiveness of the metaverse for agricultural learning and tourism in Lopburi Province, and (3) an evaluation form for user satisfaction with the use of metaverse technology for agricultural learning and tourism in Lopburi Province. The statistical methods used for data analysis were mean ($\mu$) and standard deviation (S.D.). The research findings revealed that the effectiveness of the metaverse, as evaluated by experts, was of high

quality ($\mu$ = 4.37, S.D. = 0.75), indicating the effective management of content and high-quality experiences in agricultural learning and tourism through the metaverse technology in Lopburi Province. The metaverse was found to effectively raise awareness and attract the target audience. Furthermore, the evaluation of user satisfaction from the sample group indicated a high level of satisfaction ($\mu$ = 4.42, S.D. = 0.77), reflecting positive feedback from users who experienced the metaverse. The use of this technology was shown to enhance knowledge and understanding of agriculture and agricultural tourism while also making tourism more engaging.

**Keywords :** Metaverse technology, learning resources, agricultural tourism

## 1. บทนำ

เมตาเวิร์ส จัดเป็นเทคโนโลยีความจริงเสริมและสภาพแวดล้อมเสมือนจริงในการสร้างประสบการณ์เมตาเวิร์สของสภาพแวดล้อมและผลิตภัณฑ์ผ่านสื่อต่างๆ เช่น โซเชียลมีเดีย เว็บไซต์ วิดีโอเกม และอีสปอร์ต และเทคโนโลยีต่างๆ หมายความว่า โลกที่สร้างโดยคอมพิวเตอร์โดยแยกความแตกต่างจากแนวคิดเชิงปรัชญาหรือจิตวิญญาณของโดเมนที่อยู่เหนือขอบเขตทางกายภาพ [1] และเมตาเวิร์สสำหรับแหล่งการเรียนรู้และการท่องเที่ยวเชิงเกษตรจังหวัดลพบุรี จะเป็นสถานที่แหล่งท่องเที่ยว ที่พัก ร้านค้าต่างๆแบบในชีวิตจริง เป็นการสร้างอวาตาร์ หรือตัวตนใหม่จนเกิดเป็นคอมมิวนิทีส คือ การที่ผู้คนมาอยู่รวมกันเป็นสังคม มีกิจกรรมร่วมกันในโลกเสมือน [2,3]

การท่องเที่ยวเชิงเกษตร (agricultural tourism) หมายถึง การท่องเที่ยวทางด้านการเรียนรู้วิถีเกษตรกรรมของชาวชนบท โดยเน้นการมีส่วนร่วมของกลุ่มตัวอย่างในการดำเนินกิจกรรมให้เกิดการเรียนรู้มาทำให้เกิดประโยชน์ ก่อให้เกิดรายได้ต่อชุมชนและเกษตรกร การท่องเที่ยวเชิงเกษตรมีบทบาทสำคัญต่อระบบเศรษฐกิจของประเทศไทย การส่งเสริมการท่องเที่ยวเชิงเกษตรเป็นการเพิ่มรายได้และขยายโอกาสให้แก่ประชาชนในภาคเกษตร

จังหวัดลพบุรี มีแหล่งท่องเที่ยวเชิงเกษตร ประกอบด้วย บ้านสวนขวัญ ศูนย์อนุรักษ์ผึ้ง ฟาร์มเห็ดขจรวิทย์ โอเอซิสฟาร์ม สวนเหรียญทอง แต่ไม่ค่อยเป็นที่รู้จักนัก นักท่องเที่ยวส่วนใหญ่เดินมาทางมาท่องเที่ยวจังหวัดลพบุรี แต่ข้อมูลการท่องเที่ยวเชิงเกษตรส่วนใหญ่จะเป็นแผ่นพับสื่อประชาสัมพันธ์แนะนำสถานที่ต่างๆ ซึ่งบางครั้งสำหรับผู้ที่มาท่องเที่ยวที่มาไม่ใช่คนในพื้นที่ ทำให้การท่องเที่ยวบางครั้งเดินทางไม่ถูกหรืออาจเสียเวลาในการหาข้อมูลจากข้อมูลการประชาสัมพันธ์การท่องเที่ยวเชิงเกษตรที่ยังมีไม่มาก กลุ่มตัวอย่างส่วนใหญ่จึงไม่ค่อยรู้จักสถานที่ท่องเที่ยวเชิงเกษตร ด้านการท่องเที่ยวในจังหวัดลพบุรีซึ่งจะส่งผลให้กลุ่มตัวอย่างเกิดความสนใจ และเข้ามาท่องเที่ยวเพิ่มมากขึ้น เป็นการสร้างรายได้ให้แก่พื้นที่ผลที่คาดว่าจะได้รับกลุ่มตัวอย่างเข้ามาท่องเที่ยวในจังหวัดลพบุรีเพิ่มมากขึ้น

ดังนั้น ผู้วิจัยจึงเห็นความสำคัญของการนำเทคโนโลยีเมตาเวิร์ส มาส่งเสริมแหล่งเรียนรู้และการท่องเที่ยวเชิงเกษตรเพื่อเป็นทางเลือกของกลุ่มตัวอย่างและผู้ที่สนใจสามารถเข้ามาชมและเพื่อสร้างประสบการณ์ในการท่องเที่ยว ยังช่วยจัดระบบข้อมูลไว้ในรูปแบบของสื่อดิจิทัล อีกทั้งยังเป็นเครื่องมือในการประชาสัมพันธ์การท่องเที่ยวที่ทันสมัยและเกิดประโยชน์เชิงเศรษฐกิจ ชุมชนสามารถนำองค์ความรู้ไปใช้ประโยชน์ได้

## 2. วัตถุประสงค์การวิจัย

2.1 พัฒนาเมตาเวิร์สสำหรับแหล่งเรียนรู้และท่องเที่ยวเชิงเกษตรจังหวัดลพบุรี

2.2 ประเมินประสิทธิภาพของเมตาเวิร์สสำหรับแหล่งการเรียนรู้และการท่องเที่ยวเชิงเกษตรจังหวัดลพบุรี

2.3 ประเมินความพึงพอใจที่มีต่อการใช้เทคโนโลยีเมตาเวิร์สสำหรับแหล่งการเรียนรู้และการท่องเที่ยวเชิงเกษตรจังหวัดลพบุรี

## 3. ขอบเขตการวิจัย

### 3.1 ขอบเขตเนื้อหา

การศึกษาครั้งนี้ใช้แนวคิดการพัฒนาเทคโนโลยีเมตาเวิร์ส ร่วมกับแนวคิดเกี่ยวกับแหล่งเรียนรู้และท่องเที่ยวเชิงเกษตร โดยพิจารณาจากสถานที่ที่มีเอกลักษณ์ตามองค์ประกอบของแหล่งท่องเที่ยวเชิงเกษตร โดยเนื้อหาจะบอกเล่าถึงประวัติความเป็นมา เอกลักษณ์ของท้องถิ่น การทำเกษตร และสินค้าของแหล่งท่องเที่ยว

**3.2 ขอบเขตด้านประชากรและกลุ่มตัวอย่าง**

ประชากรและกลุ่มตัวอย่างในการศึกษาครั้งนี้ คือ กลุ่มตัวอย่างและประชาชนในพื้นที่โดยการสุ่มจำนวน 150 คน

**3.3 ขอบเขตด้านพื้นที่**

แหล่งท่องเที่ยวเชิงเกษตรในพื้นที่จังหวัดลพบุรี จำนวน 5 สถานที่ ได้แก่ บ้านสวนขวัญ ศูนย์อนุรักษ์ผึ้ง ฟาร์มเห็ดขจรวิทย์ โอเอซิสฟาร์ม สวนเหรียญทอง

## 4. ทบทวนวรรณกรรม

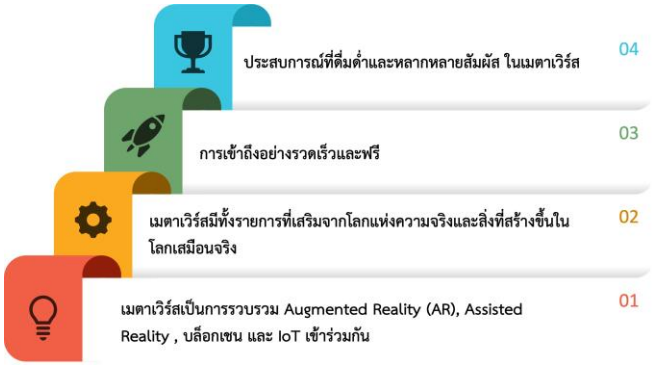
**4.1 ความหมายของเทคโนโลยีเมตาเวิร์ส (Metaverse)**

เมตาเวิร์ส เป็นพื้นที่เสมือนจริงที่เปิดโอกาสให้ผู้ใช้งานสามารถโต้ตอบกันได้แบบเรียลไทม์ มีศักยภาพในการพลิกโฉมรูปแบบการจัดการเรียนการสอน ด้วยคุณลักษณะที่เสมือนจริงและสามารถโต้ตอบได้อย่างมีประสิทธิภาพ เมตาเวิร์ส จึงสามารถมอบประโยชน์อันหลากหลายแก่ผู้เรียน ครูผู้สอน และสถาบันการศึกษา โดยประโยชน์ที่สำคัญ ได้แก่ การเพิ่มระดับของการมีส่วนร่วมและการมีปฏิสัมพันธ์ในกระบวนการเรียนรู้ โอกาสในการเรียนรู้ที่ยืดหยุ่นและเข้าถึงได้ง่ายมากยิ่งขึ้น การส่งเสริมประสบการณ์การเรียนรู้แบบเฉพาะบุคคล ตลอดจนการเรียนรู้ผ่านประสบการณ์เสมือนจริงซึ่งส่งผลต่อการพัฒนาทักษะและความเข้าใจในเนื้อหาอย่างลึกซึ้ง [4] โดย [5] ได้กล่าวว่า เมตาเวิร์ส เป็นเครือข่ายโลกเสมือนจริง 3 มิติที่สร้างขึ้นแบบเรียลไทม์ที่มีขนาดและทำงานร่วมกันได้อย่างล้ำลึก ซึ่งไม่จำกัดจำนวนผู้ใช้ สามารถเข้าร่วมได้พร้อมกันและต่อเนื่องกันอย่างเป็นอิสระ ทั้งในรูปแบบภาพและด้วยความต่อเนื่องของข้อมูล เช่น การสื่อสาร และการเชิงธุรกิจ โดย [6] ได้กล่าวว่า เมตาเวิร์ส คือ การสร้างสภาพแวดล้อมของโลกแห่งความเป็นจริงและเทคโนโลยีเสมือนจริงเข้าด้วยกัน จนกลายเป็น ชุมชนโลกเสมือนจริงที่สามารถผสานวัตถุรอบตัวและสภาพแวดล้อมให้เชื่อมต่อกันเป็นหนึ่งเดียว โดยอาศัยเทคโนโลยี AR และ VR เข้ามาช่วยเพิ่มประสิทธิภาพและเชื่อมโยงอย่างไร้รอยต่อให้กลายเป็นพื้นที่โลกเดียวกัน

โดยสรุปได้ว่า เมตาเวิร์ส คือ การผสานเทคโนโลยีแห่งโลกเสมือน ที่สร้างสิ่งแวดล้อมของโลกจริง ๆ และเทคโนโลยีเข้าด้วยกัน เพื่อให้ผู้คนเข้ามามีปฏิสัมพันธ์และทำกิจกรรมร่วมกัน ผ่านตัวตนที่เป็นอวตาร (Avatar) ในรูปแบบกราฟิก 3 มิติ แทนเราในการทำกิจกรรมต่าง ๆ ทำให้รู้สึกเหมือนชีวิตจริงมากกว่าโซเชียลมีเดียที่ใช้ในปัจจุบัน

**4.2 คุณลักษณะของเมตาเวิร์ส (Metaverse Features)**

คุณลักษณะของเมตาเวิร์สสามารถทำให้สมจริงและจับต้องได้มากขึ้น ดังนี้ (1) Assisted Reality เทคโนโลยีผู้ช่วยที่อำนวยความสะดวกให้ผู้คนสามารถดูหน้าจอและโต้ตอบกับหน้าจอได้โดยไม่ต้องใช้มือให้ผู้ใช้สื่อสารและสั่งการผ่านเสียง อำนวยความสะดวกให้ผู้คนสามารถดูหน้าจอและโต้ตอบกับได้มากขึ้น ดังนี้ (1) Assisted Reality เทคโนโลยีผู้ช่วยที่อำนวยความสะดวกให้ผู้คนสามารถดูหน้าจอและโต้ตอบกับหน้าจอได้โดยไม่ต้องใช้มือให้ผู้ใช้สื่อสารและสั่งการผ่านเสียง ข้อมูลก็จะขึ้นสู่สายตาทันที (2) Augmented Reality (AR) เทคโนโลยีโลกเสมือนที่สามารถปรากฏอยู่ในโลกแห่งความเป็นจริง (3) Meatspace คำที่ใช้เรียกโลกทางกายภาพ หรือโลกที่เราใช้ชีวิตอยู่เป็นส่วนใหญ่ (4) Multiverse หรือ จักรวาลโลกคู่ขนานใช้เรียกแพลตฟอร์มหรือ community ในโลกดิจิทัลที่ทำงานอิสระจากกันและกัน โดยตามทฤษฎีแล้ว เมตาเวิร์สสามารถดึง Multiverse เหล่านี้มาทำงานอยู่ในที่เดียวกันได้ (5) NFT หรือ Non-Fungible Tokens เป็นเสมือนเครื่องยืนยันว่าใครก็ตามสามารถครอบครอง ซื้อ ขาย และสร้างมูลค่าให้กับผลิตภัณฑ์ใดก็ตามที่ปรากฏอยู่ในโลกดิจิทัลเท่านั้น โดยมีเทคโนโลยีบล็อกเชนคอยกำกับความเป็นเจ้าของและป้องกันการขโมย ตัวอย่างของ NFT ได้แก่ ผลงานศิลปะ บัตรกีฬา ของสะสมโดย NFT สามารถซื้อขายได้โดยสกุลดิจิทัล Cryptocurrency และ (6) Virtual Reality หรือประสบการณ์เสมือนจริง เป็นการใช้อุปกรณ์ หรือเทคโนโลยีเพื่อเชื่อมโยงผู้ใช้งานกับโลกดิจิทัล [6] โดย [7] ได้กล่าวว่า คุณลักษณะของเมตาเวิร์ส ประกอบด้วย 1) เมตาเวิร์สเป็นการรวบรวมชุดเทคโนโลยีที่เกิดใหม่ เช่น 5G, AI, VR, AR, โฮโลแกรม หรือ IoT 2) เมตาเวิร์สมีทั้งรายการที่แมปหรือเสริมจากโลกแห่งความจริงและสิ่งที่สร้างขึ้นในโลกเสมือนจริง ช่องว่างระหว่างโลกเสมือนจริงและโลกกายภาพจะแคบลงหรือถูกกำจัดในเมตาเวิร์ส ซึ่งจะทำให้ประสบการณ์ของผู้ใช้ในเมตาเวิร์สนั้นดื่มด่ำมากขึ้น มีประสาทสัมผัสหลายอย่าง และใกล้เคียงกับของจริงมากขึ้น 3) การเข้าถึงอย่างรวดเร็วและฟรี ในเมตาเวิร์ส ผู้ใช้แต่ละคนสามารถปรับแต่งตัวตนดิจิทัลเฉพาะตัวของตนได้ในรูปแบบของอวตาร การสร้างตัวตนดิจิทัลนั้นถูกกำหนดโดยผู้ใช้และมีความก้าวหน้ามากกว่าเดิม เช่น สามารถแก้ไขรายละเอียดใบหน้า ร่างกาย การแสดงออกทางสีหน้าของอวตาร ซึ่งเป็นตัวตนทดแทนของผู้ใช้ในโลกเสมือนจริงซึ่งสะท้อนถึงบุคลิกของผู้ใช้และแสดงถึงอัตตาในโลกแห่งความเป็นจริงได้ 4) ประสบการณ์ที่ดื่มด่ำและหลากหลายสัมผัสในเมตาเวิร์ส ฉากเสมือนจริงที่สดใสและมีสีสันซึ่งจำลองโดยเทคโนโลยีสามารถมอบความรู้สึกที่ล้ำลึกให้กับผู้ใช้ได้




**รูปที่ 1** คุณลักษณะของเมตาเวิร์ส (Metaverse Features)

จากรูปที่ 1 เป็นคุณลักษณะของเมตาเวิร์ส ที่ได้จากการศึกษา และหาข้อมูล โดยสรุปคุณลักษณะของ เมตาเวิร์ส โดยประกอบด้วย 4 ลักษณะ ได้แก่ 1) เมตาเวิร์สเป็นการรวบรวม Augmented Reality (AR), Assisted Reality , บล็อกเชน และ IoT เข้าร่วมกัน 2) เมตาเวิร์สมีทั้งรายการที่เสริมจากโลกแห่งความจริงและสิ่งที่สร้างขึ้นในโลกเสมือนจริง 3) การเข้าถึงอย่างรวดเร็ว 4) ประสบการณ์ในเมตาเวิร์สที่ดื่มด่ำและหลากหลายสัมผัส

**4.3 แหล่งเรียนรู้และการท่องเที่ยวเชิงเกษตร**

แหล่งเรียนรู้ออนไลน์เป็นนวัตกรรมทางการศึกษาที่สถาบันการศึกษาต่างๆทั่วโลกกำลังให้ความสนใจเพราะเป็นการเพิ่มช่องทางการเข้าถึงแหล่งการเรียนรู้และเพิ่มโอกาสทางการศึกษาการเรียนการสอนซึ่งจะเป็นการจัดการเรียนการสอนผ่านระบบเครือข่ายคอมพิวเตอร์หรือระบบออนไลน์ที่เชื่อมโยงคอมพิวเตอร์ของผู้เรียนเข้ากับเครื่องคอมพิวเตอร์ของผู้ให้บริการเครือข่ายและเครื่องคอมพิวเตอร์ของผู้ให้บริการเว็บซึ่งอาจเป็นการเชื่อมโยงระยะใกล้หรือระยะไกลผ่านทางระบบอินเทอร์เน็ตที่ผู้สอนออกแบบระบบการเรียนการสอนให้มีกิจกรรมและสื่อต่างๆผ่านเว็บไซต์และให้ผู้เรียนเข้าสู่เว็บไซต์เป็นการศึกษาผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ต [8]

การท่องเที่ยวเชิงเกษตร (agricultural tourism) เป็นการท่องเที่ยวที่มุ่งเน้นทางด้านการเรียนรู้วิถีเกษตรกรรมของชาวชนบท โดยเน้นการมีส่วนร่วมของกลุ่มตัวอย่างในการดำเนินกิจกรรมให้เกิดการเรียนรู้มาทำให้เกิดประโยชน์ ก่อให้เกิดรายได้ต่อชุมชนและเกษตรกร [9] การท่องเที่ยวเชิงเกษตรมีบทบาทสำคัญต่อระบบเศรษฐกิจของประเทศไทย การส่งเสริมการท่องเที่ยวเชิงเกษตรเป็นการเพิ่มรายได้และขยายโอกาสให้แก่ประชาชนในภาคเกษตรซึ่งเป็นการสร้างช่องทางตลาดให้กับชุมชน [10], [3] รวมทั้งการให้บริการกลุ่มตัวอย่างเรื่องของที่พัก อาหาร เครื่องดื่ม การให้บริการผู้นำชมท้องถิ่น ซึ่งก่อให้เกิดรายได้โดยตรงจากการจำหน่ายสินค้า และเป็นการสร้างโอกาสทางเศรษฐกิจให้กับเกษตรกรและชุมชนได้เป็นอย่างดี

แหล่งเรียนรู้และท่องเที่ยวเชิงเกษตร จังหวัดลพบุรี ประกอบด้วย บ้านสวนขวัญ ศูนย์อนุรักษ์ผึ้ง ฟาร์มเห็ดขจรวิทย์ โอเอซิสฟาร์ม สวนเหรียญทอง ซึ่งแต่ละสถานที่จะมีศึกษาเก็บรวบรวมข้อมูล

การวิจัยครั้งนี้ใช้แนวคิดเทคโนโลยีเมตาเวิร์ส เป็นเครื่องมือในการเชื่อมโยงไปยังแหล่งท่องเที่ยว ในรูปแบบวิดีโอคลิป ภาพถ่าย และข้อมูล เพื่อเป็นแหล่งรวบรวมข้อมูลและใช้ในการประชาสัมพันธ์การท่องเที่ยว เป็นการผสมผสานระหว่างเทคโนโลยีสมัยใหม่กับการการสร้างประสบการณ์ใหม่ในการท่องเที่ยว

## 5. วิธีการดำเนินงานวิจัย

การวิจัยครั้งนี้เป็นการวิจัยและพัฒนาเมตาเวิร์สสำหรับแหล่งการเรียนรู้และการท่องเที่ยวเชิงเกษตรจังหวัดลพบุรี พัฒนาด้วยเทคโนโลยีเมตาเวิร์ส มีขั้นตอนการดำเนินงานดังนี้

**5.1 การศึกษาในเชิงเอกสาร**

ทำการศึกษาและรวบรวมข้อมูลจากเอกสารและหลักฐานที่เกี่ยวข้อง บทความทางวิชาการ รายงานผลการศึกษา โดยวิเคราะห์ตามวัตถุประสงค์ของการศึกษาที่ $\mu$ ต้องการศึกษา วิเคราะห์สภาพปัญหาและสิ่งที่ต้องการพัฒนาขึ้นมาเพื่อแก้ปัญหาที่เกิดขึ้น

**5.2 ทำการลงพื้นที่ในการจัดเก็บข้อมูล**

ผู้วิจัยได้ทำการลงพื้นที่ในการจัดเก็บข้อมูลแหล่งเรียนรู้และท่องเที่ยวเชิงเกษตร จังหวัดลพบุรี ประกอบด้วย บ้านสวนขวัญ ศูนย์อนุรักษ์ผึ้ง ฟาร์มเห็ดขจรวิทย์ โอเอซิสฟาร์ม สวนเหรียญทอง โดยผู้ให้ข้อมูลคือผู้ประกอบการชุมชน วิสาหกิจชุมชน และเจ้าของพื้นที่

**5.3 การพัฒนาเมตาเวิร์ส**

ในการพัฒนาเมตาเวิร์สสำหรับแหล่งการเรียนรู้และการท่องเที่ยวเชิงเกษตรจังหวัดลพบุรี ผู้วิจัยใช้เว็บไซต์ที่ชื่อว่า

https://www.spatial.io/ เพื่อสร้างโลกเสมือนจริง และผู้ชมจะถูกเชื่อมโยงเข้าหากันด้วยการใช้ตัวตนจำลอง หรืออวตาร์ (Avatar) บนโลกสังคมใหม่ที่สร้างขึ้น โดยจะเห็นภาพเสมือนที่ซ้อนทับสภาพแวดล้อมจริงที่ประกอบด้วยวิดีโอคลิป ภาพถ่าย และข้อมูลแหล่งเรียนรู้และท่องเที่ยวเชิงเกษตรผสานคำสั่งเชื่อมโยงข้อมูลที่โต้ตอบได้โดยผ่านสมาร์ทโฟน หรือแท็บเล็ต โดยใช้กระบวนการพัฒนาระบบด้วยโมเดล ADDIE 5 ขั้นตอน ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1: Analysis (การวิเคราะห์) ขั้นตอนนี้วิเคราะห์ความต้องการ ระบุปัญหา และศึกษาทรัพยากรกลุ่มตัวอย่างได้แก่นักเรียนและนักท่องเที่ยวเชิงเกษตร โดยมุ่งเน้นสร้างประสบการณ์เสมือนจริงและประเมินความพร้อมทางเทคโนโลยี เช่น อุปกรณ์ อินเทอร์เน็ต และผู้ใช้

ขั้นตอนที่ 2: Design (การออกแบบ) เป็นขั้นตอนการวางแผนและออกแบบโครงสร้างการเรียนรู้ กำหนดเนื้อหาและออกแบบสภาพแวดล้อมในการท่องเที่ยวใน Spatial.io ที่มีสื่อมัลติมีเดียและข้อมูลเพื่อการนำเที่ยว

ขั้นตอนที่ 3: Development (การพัฒนา) เป็นขั้นตอนการสร้างและพัฒนาเนื้อหาโดยมีการผลิตสื่อและเทคโนโลยีโดยการนำเข้ารูปภาพ 3D วิดีโอ เสียง ข้อความ เพื่อจำลองสถานการณ์จริง และเพิ่มความน่าสนใจ ในขั้นตอนนี้ผู้วิจัยได้ดำเนินการทดสอบการทำงานของเมตาเวิร์ส การแสดงภาพและเสียง เพื่อทำการประเมินประสิทธิภาพของการใช้เมตาเวิร์สสำหรับการท่องเที่ยวเชิงเกษตรด้วยผู้วิจัยและผู้เชี่ยวชาญ เมื่อพบข้อผิดพลาดได้นำมาปรับปรุงตามข้อเสนอแนะ

ขั้นตอนที่ 4: Implementation (การนำไปใช้) มีการเผยแพร่และใช้งานจริง โดยจัดทำคู่มือสำหรับเข้าใช้งานผ่าน Web browser

ขั้นตอนที่ 5: Evaluation (การประเมินผล)ประเมินประสิทธิภาพและผลลัพธ์รวบรวมข้อมูลป้อนกลับวางแผนการปรับปรุงด้วยแบบสอบถามความพึงพอใจเพื่อสัมภาษณ์ผู้ใช้เพื่อปรับปรุงเนื้อหาและประสบการณ์และพัฒนาเวอร์ชันต่อไป

## 6. เครื่องมือการวิจัย

เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย คือ 1) เมตาเวิร์สสำหรับแหล่งการเรียนรู้และการท่องเที่ยวเชิงเกษตรจังหวัดลพบุรี ที่พัฒนาขึ้นด้วยเทคโนโลยีเสมือนผสานกับโลกจริง 2) แบบประเมินประสิทธิภาพของเมตาเวิร์สสำหรับแหล่งการเรียนรู้และการท่องเที่ยวเชิงเกษตรจังหวัดลพบุรี 3) ประเมินความพึงพอใจที่มีต่อการใช้เทคโนโลยีเมตาเวิร์สสำหรับการท่องเที่ยวเชิงเกษตรเป็นแบบสอบถามสำหรับประเมินประสิทธิภาพและความพึงพอใจ โดยแบ่งการประเมินออกเป็น 2 ส่วน คือ 1. ข้อมูลทั่วไปของผู้ตอบแบบสอบถาม 2. ข้อมูลความคิดเห็นเกี่ยวกับความพึงพอใจที่มีต่อระบบการประเมินประสิทธิภาพและความพึงพอใจของการใช้งานได้กำหนดเกณฑ์ตามวิธีของ ลิเคิร์ท (Likert) เป็นวิธีการประเมินแบบรวมค่ามาตราส่วนประมาณค่า(Rating Scale) 5 ระดับ ได้ตรวจสอบคุณภาพของแบบสอบถามโดยผู้เชี่ยวชาญ

## 7. การเก็บรวบรวมข้อมูล

ในการเก็บข้อมูลความพึงพอใจของผู้ใช้เมตาเวิร์สสำหรับการท่องเที่ยวเชิงเกษตร ผู้วิจัยใช้การแจกแบบสอบถามกลุ่มตัวอย่างที่เป็นกลุ่มตัวอย่างในจังหวัดลพบุรี จำนวน 150 คน โดยให้สแกน QR Code เพื่อเข้าระบบแล้วทำการเลือกสถานที่เพื่อเข้าชมแหล่งเรียนรู้และท่องเที่ยวเชิงเกษตร เมื่อเข้าสู่โลกอวตาร์ สามารถเดินชมรูปภาพ วิดีโอคลิป รวมถึงข้อมูลประวัติความเป็นมา ข้อมูลแหล่งเรียนรู้ต่างๆ จากนั้นกลุ่มตัวอย่างทำการประเมิน ความพึงพอใจ และเสนอแนะเพิ่มเติม

## 8. การวิเคราะห์ข้อมูล

เมื่อมีการเก็บแบบประเมินประสิทธิภาพของระบบ และแบบประเมินความพึงพอใจที่มีต่อระบบแล้ว ก็นำข้อมูลมาวิเคราะห์ค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

## 9. ผลการวิจัย

### 9.1 เมตาเวิร์สสำหรับแหล่งการเรียนรู้และการท่องเที่ยวเชิงเกษตรจังหวัดลพบุรี

ในการพัฒนาเมตาเวิร์สสำหรับแหล่งการเรียนรู้และการท่องเที่ยวเชิงเกษตรจังหวัดลพบุรี เรามีการพัฒนาแหล่งเรียนรู้และท่องเที่ยวเชิงเกษตร จังหวัดลพบุรี ประกอบด้วย บ้านสวนขวัญ ศูนย์อนุรักษ์ผึ้ง ฟาร์มเห็ดขจรวิทย์ โอเอซิสฟาร์ม สวนเหรียญทอง ดังรูปที่ 2




**รูปที่ 2** เมตาเวิร์สสำหรับแหล่งการเรียนรู้และการท่องเที่ยวเชิงเกษตรจังหวัดลพบุรี

จากรูปที่ 2 จะเป็นการแสดงภาพที่เกิดขึ้นในเมตาเวิร์ส ในการเลือกเข้าชมแหล่งการเรียนรู้และการท่องเที่ยวเชิงเกษตร โดยผู้เข้าชมจะเป็นอวาตาร์ในการเดินชม โดยมีข้อมูลในรูปแบบ ภาพถ่าย และ วิดีโอคลิป ของแต่ละสถานที่ เพื่อตอบสนองต่อเป้าหมายในการสร้างประสบการณ์ การเข้าชมที่สมจริง (Immersive Experience) ให้กับผู้ใช้งานภายในเมตาเวิร์สมีการจำลองบรรยากาศของแต่ละแหล่งท่องเที่ยว ผู้ใช้งานสามารถเดินชม ศึกษา และมีปฏิสัมพันธ์กับแหล่งข้อมูลต่างๆ ได้

**9.2 ผลการประเมินประสิทธิภาพของเมตาเวิร์สสำหรับแหล่งการเรียนรู้และการท่องเที่ยวเชิงเกษตร จังหวัดลพบุรี**

**ตารางที่ 1 ผลการประเมินประสิทธิภาพของเมตาเวิร์สสำหรับแหล่งการเรียนรู้และการท่องเที่ยวเชิงเกษตร จังหวัดลพบุรี**

| รายการ | $\mu$ | S.D. | แปลผล |
|---|---|---|---|
| **1. ด้านเนื้อหา** | | | |
| 1) เนื้อหามีความน่าสนใจและเข้าใจง่าย | 4.29 | 0.79 | มาก |
| 2) เนื้อหาที่ใช้อธิบายมีความเหมาะสม | 4.25 | 0.81 | มาก |
| 3) เนื้อหาด้านสถานที่ท่องเที่ยวมีความเหมาะสม | 4.28 | 0.73 | มาก |
| 4) ลำดับการนำเสนอเนื้อหามีความเหมาะสม | 4.33 | 0.82 | มาก |
| 5) ภาพคมชัด สวยงาม สื่อความความได้ตรงเนื้อหา | 4.53 | 0.62 | มากที่สุด |
| 6) เนื้อหาเป็นประโยชน์ต่อการท่องเที่ยว | 4.63 | 0.87 | มากที่สุด |
| **รวม** | **4.39** | **0.77** | **มาก** |
| **2. ด้านการออกแบบเมตาเวิร์ส** | | | |
| 1) ความเหมาะสมของหลักการ แนวคิดและทฤษฎีที่ใช้เป็นพื้นฐานในการพัฒนารูปแบบการเรียนรู้ | 4.53 | 0.86 | มากที่สุด |
| 2) รูปแบบ ขนาด สีของข้อความเหมาะสม และสวยงาม | 4.62 | 0.78 | มากที่สุด |
| 3) ภาพประกอบคมชัด สวยงาม น่าสนใจ | 4.45 | 0.87 | มาก |
| 4) การออกแบบเมตาเวิร์สช่วยส่งเสริมการท่องเที่ยวเชิงเกษตร | 4.33 | 0.75 | มาก |
| **รวม** | 4.48 | 0.82 | มาก |

**ตารางที่ 1 (ต่อ )ผลการประเมินประสิทธิภาพของเมตาเวิร์สสำหรับแหล่งการเรียนรู้และการท่องเที่ยวเชิงเกษตร จังหวัดลพบุรี**

| รายการ | $\mu$ | S.D. | แปลผล |
|---|---|---|---|
| **3. ด้านสื่อวิดีโอคลิป** | | | |
| 1) รูปภาพวิดีโอสื่อความหมายได้เข้าใจง่าย | 4.29 | 0.79 | มาก |
| 2) เสียงบรรเลงและดนตรีประกอบมีความเหมาะสม | 4.25 | 0.81 | มาก |
| 3) สื่อวิดีโอที่นำเสนอมีความชัดเจน และระยะเวลาการนำเสนอเหมาะสม | 4.28 | 0.73 | มาก |
| 4) รูปแบบและเทคนิคการนำเสนอของสื่อวิดีโอน่าสนใจ | 4.33 | 0.82 | มาก |
| 5) สื่อวิดีโอมีความเหมาะสมกับการส่งเสริมการท่องเที่ยวเชิงเกษตร | 4.53 | 0.62 | มากที่สุด |
| **รวม** | **4.34** | **0.75** | **มาก** |
| **4. ด้านเทคนิคของเมตาเวิร์ส** | | | |
| 1) เมตาเวิร์สมีความแปลกใหม่ ทันสมัย | 4.29 | 0.79 | มาก |
| 2) เมตาเวิร์สมีการแสดงเนื้อและสื่อความหมายได้ดี | 4.25 | 0.81 | มาก |
| 3) เมตาเวิร์สสร้างประสบการณ์ที่ดีในการใช้งาน | 4.28 | 0.73 | มาก |
| 4) เมตาเวิร์สสามารถทำให้รู้สึกอยู่ในโลกเสมือนจริงได้ | 4.58 | 0.57 | มากที่สุด |
| 5) เมตาเวิร์สสามารถการเข้าถึงอย่างรวดเร็ว | 4.33 | 0.82 | มาก |
| 6) อวตาร์ในเมตาเวิร์สสามารถปรับแต่งให้คล้ายเราได้ | 4.44 | 0.58 | มาก |
| 7) เมตาเวิร์สสามารถสร้างประสบการณ์ที่ดื่มด่ำและหลากหลายสัมผัสได้ | 4.24 | 0.25 | มาก |
| **รวม** | **4.34** | **0.65** | **มาก** |
| **5. ด้านการออกแบบ** | | | |
| 1) เมตาเวิร์สช่วยสร้างความน่าสนใจด้านการท่องเที่ยวมากขึ้น | 4.29 | 0.79 | มาก |
| 2) เมตาเวิร์สช่วยกระตุ้นการท่องเที่ยวเชิงเกษตร | 4.25 | 0.81 | มาก |
| 3) เมตาเวิร์สช่วยสนับสนุนการท่องเที่ยวเชิงเกษตร | 4.28 | 0.73 | มาก |
| 4) เมตาเวิร์สช่วยให้อยากไปสัมผัสสถานที่จริง | 4.41 | 0.58 | มาก |
| 5) เมตาเวิร์สช่วยสร้างประสบการณ์การท่องเที่ยว | 4.33 | 0.82 | มาก |
| **รวม** | **4.31** | **0.75** | **มาก** |
| **โดยรวม** | **4.37** | **0.75** | **มาก** |

จากตารางที่ 1 สรุปได้ว่าผลการประเมินประสิทธิภาพของเมตาเวิร์สสำหรับแหล่งการเรียนรู้และการท่องเที่ยวเชิงเกษตรจังหวัดลพบุรี ภาพรวมเฉลี่ยอยู่ในระดับมาก ($\mu$ = 4.37, S.D. = 0.75) พิจารณาทั้ง 5 ด้าน คือ 1) ด้านเนื้อหา มีค่าเฉลี่ยอยู่ในระดับมาก ($\mu$ = 4.39, S.D. = 0.77) “เนื้อหาเป็นประโยชน์ต่อการท่องเที่ยว” มีค่าเฉลี่ยอยู่ในระดับมากที่สุด ($\mu$ =4.63) และ “ภาพคมชัด สวยงาม สื่อความได้ตรงเนื้อหา” มีค่าเฉลี่ยอยู่ในระดับมากที่สุด ($\mu$ =4.53) 2) ด้านการออกแบบเมตาเวิร์ส มีค่าเฉลี่ยอยู่ในระดับมาก ($\mu$ = 4.48, S.D. = 0.82) โดย “รูปแบบ ขนาด สีของข้อความเหมาะสม และสวยงาม”มีค่าเฉลี่ยอยู่ในระดับมากที่สุด ($\mu$ =4.62) และ “ความเหมาะสมของหลักการแนวคิด และทฤษฎีที่ใช้เป็นพื้นฐานในการพัฒนา”มีค่าเฉลี่ยอยู่ในระดับมากที่สุด ($\mu$ =4.53) 3) ด้านสื่อวิดีโอคลิป มีค่าเฉลี่ยอยู่ในระดับมาก ($\mu$ = 4.34, S.D. = 0.75) โดย “สื่อวิดีโอมีความเหมาะสมกับการส่งเสริมการท่องเที่ยวเชิงเกษตร” มีค่าเฉลี่ยอยู่ในระดับมากที่สุด ($\mu$ =4.53) 4) ด้านเทคนิคของเมตาเวิร์ส มีค่าเฉลี่ยอยู่ในระดับมาก ($\mu$ = 4.34, S.D. = 0.65) โดย “เมตาเวิร์สสามารถทำให้รู้สึกอยู่ในโลกเสมือนจริงได้” มีค่าเฉลี่ยอยู่ในระดับมากที่สุด ($\mu$ =4.58) เป็นหัวข้อที่ได้รับคะแนนสูงสุดในหมวดนี้ อยู่ในระดับ มากที่สุด และ 5) ด้านการออกแบบ มีค่าเฉลี่ยอยู่ในระดับมาก ($\mu$ = 4.31, S.D. = 0.75) โดย “เมตาเวิร์สช่วยให้อยากไปสัมผัสสถานที่จริง” มีค่าเฉลี่ยอยู่ในระดับมาก ($\mu$ =4.41)

**9.2 ผลประเมินความพึงพอใจที่มีต่อการใช้เทคโนโลยีเมตาเวิร์สสำหรับแหล่งการเรียนรู้และการท่องเที่ยวเชิงเกษตร จังหวัดลพบุรี**

**ตารางที่ 2** แสดงความถี่ และร้อยละข้อมูลส่วนบุคคลของผู้ตอบแบบสอบถาม

| ข้อมูลส่วนบุคคล | จำนวน | ร้อยละ |
|---|---|---|
| เพศหญิง / เพศชาย | 86/64 | 57.33/42.67 |
| อายุ 21-30 ปี | 58 | 34 |
| พนักงานเอกชน | 40 | 26.67 |
| ปริญญาตรี | 65 | 43.33 |

จากตารางที่ 2 พบว่า กลุ่มตัวอย่างที่มาท่องเที่ยวจังหวัดลพบุรี เป็นเพศหญิง จำนวน 86 คน เพศชาย 64 คนส่วนใหญ่อายุระหว่าง 21-30 ปี อาชีพพนักงานเอกชน และระดับการศึกษาอยู่ในระดับปริญญาตรีผลการประเมินความพึงพอใจของกลุ่มตัวอย่าง จำนวน 150 คนที่มีต่อการใช้เทคโนโลยีเมตาเวิร์สสำหรับแหล่งการเรียนรู้และการท่องเที่ยวเชิงเกษตรจังหวัดลพบุรี ทั้ง 5 ด้าน ได้แก่ ด้านเนื้อหา ด้านการออกแบบเมตาเวิร์ส ด้านสื่อวิดีโอคลิป ด้านเทคนิคของเมตาเวิร์ส และด้านการนำไปใช้ประโยชน์ ผลการประเมินดังตาราง ต่อไปนี้

**ตารางที่ 3** ผลประเมินความพึงพอใจที่มีต่อการใช้เทคโนโลยีเมตาเวิร์สสำหรับการท่องเที่ยวเชิงเกษตร จังหวัดลพบุรี

| รายการ | $\mu$ | S.D. | แปลผล |
|---|---|---|---|
| **1. ด้านประสิทธิภาพการทำงานของระบบ** | | | |
| 1) ความถูกต้องในการจัดเก็บข้อมูลนำเข้า | 4.49 | 0.79 | มาก |
| 1) ความรวดเร็วในการประมวลผล | 4.73 | 0.86 | มากที่สุด |
| 2) ความน่าเชื่อถือของระบบ | 4.82 | 0.78 | มากที่สุด |
| 3) ความครอบคลุมของระบบที่พัฒนา | 4.25 | 0.87 | มาก |
| 4) ความถูกต้องในการจัดเก็บข้อมูลนำเข้า | 4.63 | 0.75 | มากที่สุด |
| **รวม** | **4.58** | **0.81** | **มากที่สุด** |
| **2. ด้านความง่ายต่อการใช้งานระบบ (Usability Test)** | | | |
| 1) ความง่ายต่อการใช้งานของระบบในภาพรวม | 4.29 | 0.79 | มาก |
| 2) ความเหมาะสมในการเลือกใช้ชนิดและ ตัวอักษรบนจอภาพ | 4.25 | 0.81 | มาก |
| 3) สื่อวิดีโอที่นำเสนอมีความชัดเจน และระยะเวลาการนำเสนอเหมาะสม | 4.28 | 0.73 | มาก |
| 4) รูปแบบและเทคนิคการนำเสนอของสื่อวิดีโอน่าสนใจ | 4.33 | 0.82 | มาก |
| 5) สื่อวิดีโอมีความเหมาะสมกับการส่งเสริมการท่องเที่ยวเชิงเกษตร | 4.53 | 0.62 | มากที่สุด |
| 6) ความเหมาะสมในการใช้สีของตัวอักษรบน จอภาพ | 4.12 | 0.81 | มาก |
| 7) ความเหมาะสมในการใช้สัญลักษณ์หรือ รูปภาพในการสื่อความหมาย | 4.52 | 0.72 | มากที่สุด |
| 8) ความเป็นมาตรฐานเดียวกันในการออกแบบจอภาพ | 4.30 | 0.82 | มาก |
| 9) ความเหมาะสมในการปฏิสัมพันธ์โต้ตอบ กับผู้ใช้งานระบบ | 4.42 | 0.66 | มาก |
| 10) ความเหมาะสมในการวางตำแหน่งของส่วน ประกอบบนจอภาพ | 4.48 | 0.65 | มาก |
| 11) ความเหมาะสมของการใช้คำศัพท์ที่มีความคุ้นเคยและสามารถปฏิบัติตามได้โดยง่าย | 4.42 | 0.80 | มาก |
| 12) ความเหมาะสมของหน้าจอที่รองรับได้ หลายขนาดกับอุปกรณ์ที่แตกต่างกัน | 4.41 | 0.70 | มาก |
| **รวม** | **4.36** | **0.74** | **มาก** |

| รายการ | $\mu$ | S.D. | แปลผล |
|---|---|---|---|
| **3. ด้านเทคนิคของเมตาเวิร์ส** | | | |
| 1) เมตาเวิร์สมีความแปลกใหม่ ทันสมัย | 4.29 | 0.79 | มาก |
| 2) เมตาเวิร์สมีการแสดงเนื้อและสื่อความหมายได้ดี | 4.25 | 0.81 | มาก |
| 3) เมตาเวิร์สสร้างประสบการณ์ที่ดีในการใช้งาน | 4.28 | 0.73 | มาก |
| 4) เมตาเวิร์สสามารถทำให้รู้สึกอยู่ในโลกเสมือนจริงได้ | 4.13 | 0.85 | มาก |
| 5) เมตาเวิร์สสามารถการเข้าถึงอย่างรวดเร็ว | 4.33 | 0.82 | มาก |
| 6) อวตาร์ในเมตาเวิร์สสามารถปรับแต่งให้คล้ายเราได้ | 4.47 | 0.54 | มาก |
| 7) เมตาเวิร์สสามารถสร้างประสบการณ์ที่ดื่มด่ำและหลากหลายสัมผัสได้ | 4.52 | 0.87 | มากที่สุด |
| **รวม** | **4.32** | **0.77** | **มาก** |
| **โดยรวม** | **4.42** | **0.77** | **มาก** |

จากตารางที่ 3 พบว่าผลประเมินความพึงพอใจที่มีต่อการใช้เทคโนโลยีเมตาเวิร์สสำหรับการท่องเที่ยวเชิงเกษตร จังหวัดลพบุรีโดยรวมจากการวิเคราะห์ทั้ง 3 ด้าน พบว่าภาพรวมเฉลี่ยอยู่ในระดับมาก ($\mu$ = 4.42, S.D. = 0.77) สามารถสรุปได้เป็น 3 ด้านหลัก ดังนี้ 1) ด้านประสิทธิภาพการทำงานของระบบ โดยผลการประเมินอยู่ในระดับมากที่สุดโดยมีมีค่าเฉลี่ยอยู่ในระดับมาก ($\mu$ = 4.58, S.D. = 0.81) โดย “ความน่าเชื่อถือของระบบ” ($\mu$ =4.82) “ความรวดเร็วในการประมวลผล” ($\mu$ =4.73) และ “ความถูกต้องในการจัดเก็บข้อมูล” ($\mu$ =4.63) 2) ด้านความง่ายต่อการใช้งานระบบ (Usability Test) ผลการประเมินภาพรวมอยู่ในระดับมาก ($\mu$ = 4.36, S.D. = 0.74) โดย ”ความเหมาะสมของสื่อวิดีโอกับการท่องเที่ยวเชิงเกษตร” ($\mu$ =4.53) “การใช้สัญลักษณ์/รูปภาพในการสื่อความหมาย” ($\mu$ =4.52) “การวางตำแหน่งองค์ประกอบบนจอภาพ” ($\mu$ =4.48) และ”การใช้คำศัพท์ที่เข้าใจง่าย” ($\mu$ =4.42) 3) ด้านเทคนิคของเมตาเวิร์ส ผลการประเมินอยู่ในระดับมาก ($\mu$ = 4.32, S.D. = 0.77) โดย“การสร้างประสบการณ์ที่ดื่มด่ำและหลากหลายสัมผัส” ($\mu$ =4.52) “ความสามารถในการปรับแต่งอวาตาร์ให้คล้ายผู้ใช้งาน” ($\mu$ =4.47) และ “ความรวดเร็วในการเข้าถึงระบบ” ($\mu$ =4.33) แสดงให้เห็นว่าระบบเมตาเวิร์สที่พัฒนาขึ้นได้รับการตอบรับที่ดีจากกลุ่มตัวอย่างทั้งในด้านประสิทธิภาพ การใช้งาน และเทคโนโลยี โดยเฉพาะความเหมาะสมของสื่อที่ใช้และการสร้างประสบการณ์ที่เสมือนจริง

## 10. อภิปรายผล

10.1 การวิจัยครั้งนี้ได้พัฒนาเมตาเวิร์สเพื่อส่งเสริมแหล่งเรียนรู้และการท่องเที่ยวเชิงเกษตรในจังหวัดลพบุรี โดยใช้เทคโนโลยีเมตาเวิร์สในการสร้างโลกเสมือนจริง พร้อมระบบอวาตาร์ที่ผู้ใช้งานสามารถปรับแต่งให้ใกล้เคียงกับตัวตนจริง ซึ่งช่วยให้ผู้ใช้งานมีส่วนร่วมและเกิดประสบการณ์เสมือนจริงในการเยี่ยมชมแหล่งท่องเที่ยวทางการเกษตร โดยภายในระบบประกอบด้วยสื่อหลากหลายรูปแบบ ได้แก่ วิดีโอคลิป อัลบั้มภาพ และเสียงบรรยายประกอบข้อมูลประวัติ ความเป็นมา และอัตลักษณ์ของสถานที่ต่าง ๆ ทั้ง 5 แห่ง ผลการพัฒนานี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ [10] ที่ประยุกต์ใช้สื่อเสมือนจริงผสานกับโลกจริง เพื่อส่งเสริมการท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรมในอำเภอแม่สาย จังหวัดเชียงราย โดยมุ่งเน้นให้นักท่องเที่ยวเข้าถึงข้อมูลสถานที่ด้วยประสบการณ์ที่เสมือนจริงและเข้าใจง่าย นอกจากนี้ยังสอดคล้องกับงานวิจัยของ [11] ที่พัฒนาเมตาเวิร์ส 3 มิติ กรณีศึกษาคลองแม่ข่า จังหวัดเชียงใหม่ ซึ่งผู้ใช้สามารถจำลองตนเองเป็นอวตาร์เพื่อเดินชมสถานที่ต่าง ๆ ในรูปแบบเสมือนจริง ส่งผลให้เกิดความพึงพอใจต่อเทคนิคการนำเสนอข้อมูล และช่วยส่งเสริมการประชาสัมพันธ์แหล่งท่องเที่ยวได้อย่างมีประสิทธิภาพ

10.2 ประสิทธิภาพของเมตาเวิร์สเพื่อส่งเสริมการเรียนรู้และการท่องเที่ยวจากผลการประเมินประสิทธิภาพของเมตาเวิร์ส พบว่าเทคโนโลยีที่นำมาใช้มีความเหมาะสมอยู่ในระดับมาก ($\mu$ = 4.37, S.D. = 0.75) โดยผู้ใช้งานสามารถเข้าถึงข้อมูลผ่านสมาร์ตโฟนได้อย่างสะดวก และเลือกเยี่ยมชมสถานที่ต่าง ๆ ได้อัตโนมัติ ซึ่งส่งผลต่อการสื่อสารข้อมูลเกี่ยวกับแหล่งท่องเที่ยวได้อย่างชัดเจนและเข้าใจง่าย ส่งเสริมให้เกิดการเรียนรู้และความสนใจต่อแหล่งท่องเที่ยวเชิงเกษตรในพื้นที่ได้อย่างแพร่หลายผลดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ [12] ที่พัฒนาแพลตฟอร์มโลกเสมือนเพื่อยกระดับแหล่งเรียนรู้แห่งอนาคต โดยเน้นการออกแบบระบบที่มีเนื้อหาสาระครบถ้วน ส่งเสริมการเรียนรู้ผ่านประสบการณ์เสมือนจริง ทั้งยังช่วยกระตุ้นความคิดสร้างสรรค์ แรงบันดาลใจ และแรงจูงใจของผู้ใช้งาน ซึ่งเป็นแนวทางที่สำคัญในการสร้างสื่อการเรียนรู้ที่มีประสิทธิภาพในยุคดิจิทัล

10.3 ความพึงพอใจของผู้ใช้งานต่อเมตาเวิร์ส ผลการประเมินความพึงพอใจของผู้เข้าชมต่อเมตาเวิร์สเพื่อส่งเสริม

แหล่งเรียนรู้และการท่องเที่ยวเชิงเกษตรในจังหวัดลพบุรี พบว่าอยู่ในระดับมาก ($\mu$ = 4.42, S.D. = 0.77) โดยผู้เข้าชมมีความพึงพอใจทั้งในด้านประสิทธิภาพการใช้งาน ความสะดวกในการเข้าถึง และความเหมาะสมของเทคโนโลยี โดยเฉพาะอย่างยิ่ง การนำเสนอข้อมูลผ่านโลกเสมือนจริงที่ช่วยเสริมสร้างประสบการณ์การเรียนรู้และการท่องเที่ยวได้อย่างสมจริง ผลการวิจัยนี้สอดคล้องกับงานของ [10] ซึ่งพบว่า นักท่องเที่ยวมีความพึงพอใจในระดับมากต่อการใช้สื่อเสมือนจริงผสานกับโลกจริงในการส่งเสริมการท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรม อีกทั้งยังสามารถใช้เป็นเครื่องมือในการประชาสัมพันธ์สถานที่ท่องเที่ยวได้อย่างมีประสิทธิภาพ นำไปสู่การเพิ่มจำนวนผู้สนใจ และส่งเสริมภาพลักษณ์ของแหล่งท่องเที่ยวในระยะยาว

## 11. สรุปผล

จากการวิจัยเรื่องการพัฒนาเมตาเวิร์สเพื่อส่งเสริมแหล่งเรียนรู้และการท่องเที่ยวเชิงเกษตร จังหวัดลพบุรี พบว่า การนำเทคโนโลยีเมตาเวิร์สมาใช้ในการพัฒนาแหล่งเรียนรู้และส่งเสริมการท่องเที่ยวเชิงเกษตรสามารถยกระดับประสบการณ์ของผู้เรียนและนักท่องเที่ยวได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยผลการวิจัยสามารถสรุปได้ในประเด็นสำคัญดังนี้

11.1 ความเหมาะสมของเนื้อหาและประสบการณ์เสมือนจริง เนื้อหาที่นำเสนอภายในโลกเสมือนจริงมีความสอดคล้องกับบริบทของพื้นที่จริงในจังหวัดลพบุรี โดยเฉพาะในเรื่องของเกษตร วัฒนธรรม และแหล่งท่องเที่ยวสำคัญ ทำให้ผู้ใช้งานสามารถเข้าถึงข้อมูลและเรียนรู้ได้อย่างสนุกสนานและเข้าใจง่าย

11.2 การออกแบบและพัฒนาระบบเมตาเวิร์สที่เน้นการมีส่วนร่วมของผู้ใช้งาน ทั้งในรูปแบบ VR (Virtual Reality) และแบบ Web-based 3D environment ทำให้ผู้ใช้สามารถเข้าใช้งานได้จากหลายอุปกรณ์ มีความยืดหยุ่น และรองรับการเข้าถึงจากกลุ่มเป้าหมายที่หลากหลาย

11.3 ระดับความพึงพอใจของกลุ่มเป้าหมาย กลุ่มผู้เรียน นักท่องเที่ยว และเกษตรกรที่เข้าร่วมทดสอบการใช้งานเมตาเวิร์สมีระดับความพึงพอใจในระดับมาก โดยเฉพาะในด้านความแปลกใหม่ของประสบการณ์ การเข้าใจในเนื้อหาการท่องเที่ยวเชิงเกษตร และความสามารถในการใช้งานระบบได้ด้วยตนเอง

11.4 ผลกระทบต่อการเรียนรู้และการตัดสินใจเดินทางท่องเที่ยวจริง ผู้ใช้งานส่วนใหญ่เห็นว่า ประสบการณ์ที่ได้จากเมตาเวิร์สมีผลต่อความตั้งใจในการเดินทางท่องเที่ยวจริงในจังหวัดลพบุรี โดยเฉพาะแหล่งเกษตรที่ปรากฏในระบบ ส่งผลให้มีโอกาสเกิดการท่องเที่ยวเชิงสร้างสรรค์และยั่งยืนมากขึ้น

## 12.ข้อเสนอแนะเพิ่มเติม

12.1 การขยายผลสู่พื้นที่อื่น สามารถนำโมเดลเมตาเวิร์สที่พัฒนาแล้วไปปรับใช้กับพื้นที่อื่น ๆ ที่มีศักยภาพด้านเกษตรหรือการท่องเที่ยวเชิงอนุรักษ์ หรือพื้นที่เกษตรกรรมเฉพาะทาง โดยปรับเนื้อหาและบริบทให้เหมาะสมกับท้องถิ่น

12.2 พัฒนาสื่อการเรียนรู้ด้านอื่นในรูปแบบเมตาเวิร์ส นำแนวคิดและเทคนิคจากการพัฒนาเมตาเวิร์สไปต่อยอดสื่อการเรียนรู้ในรูปแบบ immersive learning สำหรับวิชาอื่น ๆ เช่น วิทยาศาสตร์ ประวัติศาสตร์ ภูมิศาสตร์ หรือศิลปวัฒนธรรม เพื่อกระตุ้นการเรียนรู้เชิงประสบการณ์

12.3 การสร้างแพลตฟอร์มท่องเที่ยวเสมือนจริงระดับจังหวัดหรือประเทศ การพัฒนาเมตาเวิร์สเป็นแพลตฟอร์มขนาดใหญ่ที่รวบรวมสถานที่ท่องเที่ยวสำคัญของจังหวัดหรือของประเทศ เพื่อเป็นเครื่องมือส่งเสริมการท่องเที่ยวแบบ Virtual Tour รองรับนักท่องเที่ยวทั้งในและต่างประเทศ

12.4 ต่อยอดเชิงธุรกิจเกษตรและการตลาดดิจิทัล ทั้งทางเกษตรกรสามารถใช้เมตาเวิร์สเป็นพื้นที่แสดงสินค้าเกษตรในรูปแบบเสมือนจริง พัฒนาเป็น ตลาดเกษตรออนไลน์ ในโลกเมตาเวิร์ส เพื่อให้ผู้ซื้อสามารถเข้าชมแปลงปลูก และสั่งซื้อสินค้าผ่านระบบออนไลน์ได้แบบ interactive

12.5 เชื่อมโยงกับนโยบายภาครัฐและ Smart Tourism นำผลการวิจัยเสนอต่อหน่วยงานภาครัฐที่ดูแลด้านการท่องเที่ยวหรือการเกษตร เพื่อเป็นต้นแบบของโครงการ Smart Tourism หรือ Smart Agriculture

## 13.เอกสารอ้างอิง

[1] H. Go & M. Kang. Metaverse tourism for sustainable tourism development: Tourism agenda 2030. Tourism Review. [Online]. (2024) [Cited April 2, 2025] Available : https://doi.org/10.1108/TR-02-2022-0102

[2] M. Siripinyokij. The role of 3D modeling technology in the design process in Thailand. [Online]. (2023). [Cited March 3, 2025] Available : https:// www. researchgate.net/profile/Manop-Siripinyokij/ publication/325894470 (in Thai).

[3] N. Singnual and P. Tiasuthikul, “A study on the potential of community-based agro-tourism management: A case study of Ban Khlong Arang, Ban Kaeng Subdistrict, Mueang Sa Kaeo District, Sa Kaeo Province,” *MCU Social Science Review Journal*, vol. 10, no. 13, pp. 143-154, 2021 (in Thai).

[4] H. Alhakimi, “Development of the Metaverse and Learning,” *Indonesian Journal of Learning and*

*Instructional Innovation*, vol. 1, no. 11, pp. 12-15, 2023.

[5] G. Özdemir Uçgun, "The Effects of Metaverse on the Tourism Industry," *Journal of Metaverse*, vol. 4, no. 11, pp. 71-83, 2024.

[6] J. Suksajja. World heritage city management in the Metaverse context: A case study of Ayutthaya Island. [Online]. (2021). [Cited March 3, 2025] Available : https://www.dpu.ac.th/grad/admin/upload/content/files/year10-3/10-31.pdf (in Thai).

[7] X. Zhang, Y. Chen, L. Hu, and Y. Wang, "The metaverse in education: Definition, framework, features, potential applications, challenges, and future research topics," *Education and Information Technologies*, vol. 13, pp. 1-18, 2022.

[8] N. Donchankhiao, T. Phengphum, and A. Wannachai, "Development of an online learning resource on the King's philosophy for upper elementary students," *Journal of Educational Technology*, vol. 7, no. 12, pp. 125-134, 2022 (in Thai).

[9] K. Phutchan, *Agro-tourism*, Bangkok : Kasetsart University Press, 2020 (in Thai).

[10] A. Kritawanit, "Development of smart virtual media integrated with the real world to promote cultural tourism in Mae Sai District, Chiang Rai Province," *Journal of Communication Arts*, vol. 17, no. 153, pp. 331-346, 2023 (in Thai).

[11] C. Buncheun, T. Chueanonkwai, and S. Kanthat, "Development of 3D learning media through the Metaverse: A case study of Khlong Mae Kha," *Journal of Learning Innovation*, vol. 1, no. 12, pp. 27-35, 2023 (in Thai).

[12] R. Rawiwong, "Guidelines for developing a virtual world platform (Metaverse) to enhance future learning and service spaces," *Journal of Research and Development*, vol. 64, no. 13, pp. 32-41, 2022 (in Thai).

[13] J. Saenok and S. Pratsri, "Development of an organic agro-tourism route media in Lopburi Province using augmented reality technology," in *Proceedings of the 4th National Academic Conference, Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi*, Ayutthaya, 2020 (in Thai).

# การพัฒนาต้นแบบระบบคำนวณค่าไฟฟ้าตามปริมาณการใช้จริงผู้จำหน่ายสินค้าตลาดถนนคนดอย อำเภอแม่จัน จังหวัดเชียงราย

# Development of a Prototype for an Electricity Billing System Based on Actual Consumption for Vendors at the Khon Doi Walking Street Market in Mae Chan District, Chiang Rai Province

ศุภวัฒน์ ลาวัณย์วิสุทธิ์[1], ประพนธ์ เด่นดวง[2], กวี ขยันดี[3] และ ภูมิพงษ์ ดวงตั้ง[3*]
Supawat Lawanwisut[1], Prapon Denduang[2], Kavee Khayandee and Pumipong Duangtang[3*]

[1]สาขาวิชาวิศวกรรมสารสนเทศและการสื่อสาร คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี
[2]สาขาวิชาคอมพิวเตอร์ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี
[3]สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะเทคโนโลยีดิจิทัล มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงราย

[1]Department of Communication Engineering and Information, Faculty of Industrial Technology, Thepsatri Rajabhat University
[2]Department of Computer, Faculty of Industrial Technology, Thepsatri Rajabhat University
[3]Department of Computer Engineering, Faculty of Digital Technology, Chiang Rai Rajabhat University
*Email: pumipong@crru.ac.th
Received: August 22, 2025; Revised: November 17, 2025; Accepted: November 24, 2025

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการพัฒนาต้นแบบระบบคำนวณค่าไฟฟ้าตามปริมาณการใช้จริงผู้จำหน่ายสินค้าตลาดถนนคนดอย อำเภอแม่จัน จังหวัดเชียงราย เพื่ออำนวยความสะดวกในการจัดเก็บค่าไฟฟ้าจากผู้จำหน่ายสินค้าภายในตลาดอย่างถูกต้องเป็นไปตามปริมาณการใช้งานจริงรวมไปถึงการบริหารจัดการตลาดอย่างมีประสิทธิภาพ โดยการนำเทคโนโลยีอินเตอร์เน็ตของสรรพสิ่ง IoT มาเป็นส่วนหลักในการออกแบบระบบในด้าน hard ware โดยใช้โปโตคอล MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) ในการรับส่งข้อมูลระหว่างอุปกรณ์กับฐานข้อมูลและ เว็บแอปพลิเคชัน โดยสามารถแสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ แบบทันท่วงทีและประมวลผลอัตโนมัติและมีการบันทึกข้อมูลต่างๆ ลงในฐานข้อมูลซึ่งสามารถเรียกดูข้อมูลย้อนหลังผ่านระบบออนไลน์ เมื่อทำการพัฒนาต้นแบบระบบคำนวณค่าไฟฟ้าตามปริมาณการใช้จริงผู้จำหน่ายสินค้าตลาดถนนคนดอย อำเภอแม่จัน จังหวัดเชียงรายเรียบร้อยได้ทำการทดสอบการทำงานของระบบในแต่ละส่วนเพื่อทดสอบประสิทธิภาพการทำงานในแต่ละด้าน พบว่าจากทำประสิทธิภาพการทำงานของระบบต้นแบบพบว่าระบบมีประสิทธิภาพการทำงานเฉลี่ยร้อยละ 97.45 หลังจากนั้นคณะผู้วิจัยได้นำต้นแบบระบบคำนวณค่าไฟฟ้าตามปริมาณการใช้จริงผู้จำหน่ายสินค้าตลาดถนนคนดอย อำเภอแม่จัน จังหวัดเชียงราย ให้กลุ่มตัวอย่างเพื่อประเมินความพึงพอใจของระบบต้นแบบในแต่ละด้านจำนวน 30 คน พบว่าค่าเฉลี่ยโดยรวมในทุกด้านคิดเป็นร้อยละความพึงพอใจเท่ากับ 4.48 มีความพึงพอใจในระดับมาก

**คำสำคัญ :** อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง, เว็บแอปพลิเคชัน, ตลาดถนนคนดอย

## Abstract

This research presents the development of a prototype for an electricity billing system based on actual consumption for vendors at the Khon Doi Walking Street Market in Mae Chan District, Chiang Rai Province. This system aims to facilitate accurate electricity fee collection from market vendors based on their actual usage, as well as to improve efficient market management. The system design primarily utilizes Internet of Things (IoT) technology. For the hardware aspect, the MQTT protocol is used to transmit data between devices and the database/web application. The system can display various parameters in real-time and process them automatically. It also records data in a database, which allows for viewing historical data

online. After the development of the prototype was completed, its performance was tested in each component to evaluate its efficiency. The average operational efficiency of the prototype system was found to be 97.45%. Subsequently, the researchers had 30 sample participants evaluate their satisfaction with each aspect of the prototype system. The overall average satisfaction score was found to be 4.48, which is a high level of satisfaction.

**Keywords:** Internet of Things, web application, Khon Doi Walking Street Market

## 1. บทนำ

ตลาดนัดชุมชนแม่จัน หรือ ถนนคนเดินถนนคนดอย อำเภอแม่จัน จังหวัดเชียงราย เป็นตลาดนัดขนาดใหญ่ระดับต้นของจังหวัดเชียงรายภายใต้การบริหารจัดการโดยเทศบาลตำบลแม่จัน โดยตลาดจะเปิดให้จำหน่ายสินค้าในทุกเย็นวันศุกร์ของสัปดาห์ตั้งแต่ 16.00 น.เป็นต้น ถนนคนเดินถนนคนดอยเป็นตลาดนัดที่เปิดโอกาศให้ผู้จำหน่ายสินค้าจากภายในและภายนอกเขตพื้นที่มาจำหน่ายสินค้า จุดเด่นของตลาดมีความหลากหลายของประเภทสินค้าที่นำมาจำหน่าย ทั้งสินค้าอุปโภคบริโภค อาหารต่างๆ มากมาย นอกจากนี้ยังมีผู้จำหน่ายสินค้าที่มากจากพื้นที่สูงนำผลผลิตทางการเกษตร พืชผัก ผลไม้ตามฤดูกาล และผลิตภัณฑ์จากหลากหลายชนเผ่าบนพื้นที่สูงมาจำหน่ายในตลาดเป็นจำมากจึงเป็นที่มาของชื่อตลาด “ถนนคนเดินถนนคนดอย” ดังรูปที่ 1 เนื่องด้วยตลาดมีจำนวนผู้มาจำหน่ายสินค้าเป็นจำนวนมากทางเทศบาลตำบลแม่จันได้ทำการบริหารจัดการพื้นที่จำหน่ายสินค้าออกเป็นล๊อคเพื่อความเป็นระเบียบและการจัดเก็บค่าบำรุงและบริหารจัดการตลาดได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีล๊อคสำหรับผู้จำหน่ายสินค้าประมาณ 1,500 ล๊อค โดยผู้จำหน่ายสินค้าจะมีจำนวนล๊อคสำหรับจำหน่ายสินค้าที่แตกต่างกันไป ในการบริหารจัดการตลาดสำหรับการจับจองพื้นที่สำหรับจำหน่ายสินค้านั้นทางเทศบาลได้เปิดให้ผู้ที่ต้องการจำหน่ายสินค้ามาลงทะเบียนผู้จำหน่ายสินค้า เลือกพื้นที่และจำนวนล๊อคที่ต้องการ แล้วทำการออกบัตรผู้จำหน่ายสินค้าให้และมีการอัพเดทข้อมูลผู้จำหน่ายสินค้าทุกปี ดังนั้นทางเทศบาบตำบลแม่จันจะมีข้อมูลผู้จำหน่ายสินค้ากับล๊อคจำหน่ายสินค้าสำหรับบริหารจัดการการจัดเก็บค่าบำรุงตลาด




**รูปที่ 1** ถนนคนเดินถนนคนดอย อำเภอแม่จัน

ในการจัดเก็บค่าบำรุงตลาดของผู้จำหน่ายสินค้าจะประกอบไปด้วย 2 ส่วน คือ ค่าล๊อคจำหน่ายสินค้าโดยคิดตามจำนวนล๊อคที่ผู้ขายได้ลงทะเบียนไว้และค่าไฟฟ้า ในการจัดเก็บค่าบำรุงตลาดของผู้จำหน่ายสินค้า โดยพนักงารจากเทศบาลจะเป็นผู้เดินเก็บค่าบำรุงรักษาตลาดและค่าไฟฟ้าของผู้จำหน่ายสินค้า ในการจัดเก็บค่าไฟฟ้าของผู้จำหน่ายสินค้าจะทำการจัดเก็บตามจำนวนอุปกรณ์ไฟฟ้าและประเภทของอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ผู้จำหน่ายสินค้านำมาใช้ภายในล๊อคจำหน่ายสินค้าของตนเอง จากที่ผ่านมาในการจัดเก็บค่าไฟฟ้านั้นเมื่อพนักงานจากเทศบาลมาทำการจัดเก็บผู้จำหน่ายสินค้าจะไม่นำอุปกรณ์ที่ตนเองใช้มาติดตั้งหรือแสดงทั้งหมด หลังจากที่พนักงานจัดเก็บค่าไฟฟ้าเรียบร้อยแล้วผู้จำหน่ายสินค้าจะนำอุปกรณ์ไฟฟ้ามาติดตั้งเพิ่มเติมเพื่อหลีกเลี่ยงการจัดเก็บค่าไฟฟ้า โดยพบว่าอุปกรณ์ที่ผู้จำหน่ายสินค้าไม่แสดงให้พนักงานจัดเก็บค่าบำรุงเป็นอุปกรณ์ที่มีการใช้กำลังงานไฟฟ้าสูงซึ่งจะมีอัตราการเก็บค่าไฟฟ้าสูง จากปัญหาดังกล่าวทำให้เทศบาลแม่จันผู้รับผิดชอบตลาดต้องแบกรับค่าใช้จ่ายในส่วนของค่าไฟฟ้าสูง ดังนั้นเพื่อเป็นการบริหารการจัดเก็บค่าไฟฟ้าเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ การนำเทคโนโลยีมาช่วยในการบริหารจัดเก็บค่าไฟฟ้าจากปริมาณการใช้ไฟฟ้าจริงของผู้จำหน่ายสินค้า

ปัจจุบันเทคโนโลยีสำหรับการวัดปริมาณการไฟฟ้าได้มีการพัฒนากันอย่างต่อเนื่องตามวัตถุประสงค์การใช้งานในด้านต่างๆ เช่น การพัฒนาระบบตรวจสอบปริมาณไฟฟ้าสำหรับอพาร์ท เมนท์ขนาดเล็กเพื่อช่วยให้สามารถคำนวณปริมาณไฟฟ้าได้อย่างถูกต้องและตรวจสอบความผิดปกติของการใช้ไฟฟ้าของห้องพักในแต่ละห้องรวมถึงความผิดปกติของระบบไฟฟ้าของแต่ละห้องผ่านเว็บแอพพลิเคชัน [1] การออกแบบและสร้างเครื่องตรวจสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าภายในบ้านแบบไร้สายเพื่อให้ผู้ใช้งานอุปกรณ์ไฟฟ้าได้ตรวจสอบและเฝ้าติดตามค่ากระแสไฟฟ้า ค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าของอุปกรณ์ไฟฟ้าภายในบ้านได้อย่างมีประสิทธิภาพ เครื่องต้นแบบสามารถเก็บรวบรวมและตรวจสอบข้อมูลย้อนหลังได้โดยนำเทคโนโลยีอินเตอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (Internet of Thing: IOT) ด้วยการเชื่อมต่อข้อมูลระบบ

เซนเซอร์ตรวจวัดกระแสไฟฟ้ากับโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น [2] การพัฒนาการตรวจวัดปริมาณการใช้ไฟฟ้าและเชื่อมต่อข้อมูลกับแพลตฟอร์ม IoT เพื่อเชื่อมโยงระบบฐานข้อมูลแล้วนำมาประมวลผลในรูปแบบต่างๆ ตามรูปแบบการใช้งาน การพัฒนาระบบตรวจวัดและการจัดการพลังงานภายในอาคารผสมผสานร่วมกับ IoT เป็นอีกนวัตกรรมที่ได้รับความสนใจพัฒนาเพื่อให้มีประสิทธิภาพเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง [3-6] นอกจากการตรวจวัดปริมาณการใช้ไฟฟ้าแล้วยังมีการออกแบบระบบการควบคุมปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าของอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ เพื่อนำมาช่วยในการกำหนดเป้าหมายของการประหยัดพลังงาน [7-8] การพัฒนามิเตอร์ไฟฟ้าอัจฉริยะภายใต้แนวคิด IoT ที่มีความสามารถในการจัดเก็บข้อมูลปริมาณการใช้ไฟฟ้าในรูปแบบอิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดนอกจากจะเป็นแหล่งข้อมูลให้กับผู้ให้บริการรวมไปถึงผู้ใช้บริการเพื่อบริหารจัดการการควบคุมและการบริหารจัดการพลังงานได้เป็นอย่างมีประสิทธิภาพ [9-10] ในการพัฒนาระบบดังที่ได้กล่าวมาข้างต้น โดยส่วนใหญ่จะถูกออกแบบบนพื้นฐานการนำเทคโนโลยี IoT เป็นกลไกหลักในการออกแบบ ที่ประกอบด้วยด้านเซนเซอร์ตรวจวัดหรือตรวจจับ ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้สำหรับการประมวลผลหรือรับส่งข้อมูลระหว่างเซนเซอร์กับฐานข้อมูล รวมถึงการออกแบบระบบฐานข้อมูลเพื่อเชื่อมต่อในส่วนการประมวลผลในรูปแบบของแพลตฟอร์มต่างๆ นั้นเอง จากงานวิจัยที่นำเสนอก่อนหน้านี้พบว่าได้มีการพัฒนาระบบตรวจวัดไฟฟ้าสำหรับอาคารและที่พักเป็นส่วนใหญ่ แต่ยังไม่มีการประยุกต์ใช้กับตลาดชุมชนหรือตลาดนัดที่มีการเปลี่ยนแปลงผู้ค้าและพื้นที่รวมถึงการใช้ไหลดอยู่บ่อยครั้ง โดยหากได้มีการพัฒนาระบบที่สามารถจัดเก็บข้อมูลแบบเรียลไทม์และสามารถเชื่อมโยงกับฐานข้อมูลของหน่วยงานที่กำกับดูและจะทำให้การบริหารจัดการเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ

งานวิจัยนี้คณะผู้วิจัยจึงได้นำเสนอการพัฒนาระบบคิดคำนวณค่าไฟฟ้าตามปริมาณการใช้งานจริงผู้จำหน่ายสินค้าตลาดถนนคนดอย อำเภอแม่จัน จังหวัดเชียงราย โดยการนำระบบ IoT มาเป็นส่วนสำคัญในการพัฒนาระบบวัดปริมาณการใช้ไฟฟ้าของผู้จำหน่ายสินค้าตามจริงเพื่อการบริหารจัดการสำหรับการเรียกเก็บค่าไฟฟ้าของผู้จำหน่ายสินค้าเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ

## 2. วัตถุประสงค์

เพื่อออกแบบระบบคิดคำนวณค่าไฟฟ้าตามปริมาณการใช้งานจริงผู้จำหน่ายสินค้าตลาดถนนคนดอย อำเภอแม่จัน จังหวัดเชียงราย

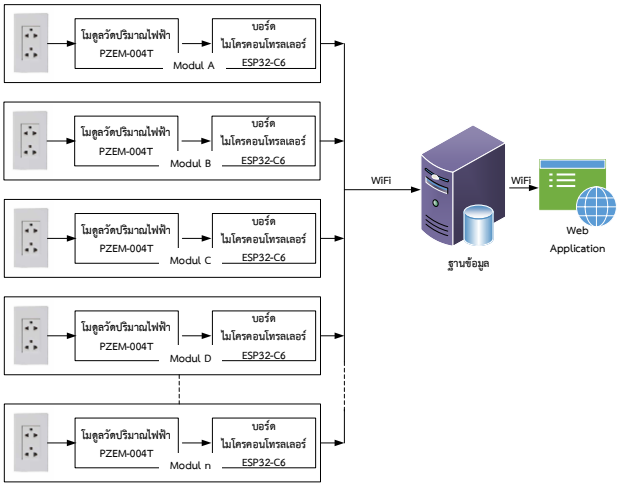
## 3. การออกแบบและพัฒนาระบบ

ในการออกแบบระบบคิดคำนวณค่าไฟฟ้าตามปริมาณการใช้งานจริงผู้จำหน่ายสินค้าตลาดถนนคนดอย อำเภอแม่จัน จังหวัดเชียงรายแบ่งการออกแบบออกเป็น 2 ส่วนหลัก ประกอบด้วยส่วนที่เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดปริมาณการใช้กระแสไฟฟ้าและหน้าเว็บแอพพลิเคชันแสดงปริมาณการใช้ไฟฟ้ารวมถึงการคำนวณค่าไฟฟ้าของผู้จำหน่ายสินค้า

### 3.1 การออกแบบอุปกรณ์ตรวจวัดปริมาณไฟฟ้า

จากรูปที่ 1 แสดงไดอะแกรมการออกแบบอุปกรณ์ตรวจวัดปริมาณไฟฟ้า จะประกอบด้วยโมดูลตรวจวัดการใช้ปริมาณไฟฟ้า PZEM-004T ที่สามารถวัดระดับแรงดันได้ตั้งแต่ 80 – 260 โวลต์ และกระแสได้สูงสุด 100 แอมแปร์ และบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32-C6 ในการตรวจวัดค่าปริมาณการใช้ไฟฟ้าของผู้จำหน่ายสินค้า โดยโมดูลจำนวน 1 ชุดจะใช้ตรวจวัดและคำนวนปริมาณการใช้ไฟฟ้าของผู้จำหน่ายสินค้าแต่ละเจ้า ในการออกแบบระบบสามารถเพิ่มจำนวนโมดูลในการตรวจวัดได้ตามจำนวนที่ต้องการ

ในการทำงานของโมดูลการวัดปริมาณการใช้ไฟฟ้า 1 โมดูล เมื่อมีการใช้ไฟฟ้าเกิดขึ้นชุดโมดูลตรวจวัดการใช้ปริมาณไฟฟ้าจะทำการตรวจจับและส่งข้อมูลปริมาณการใช้ไฟฟ้าไปยังบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32-C6 ซึ่งจะทำหน้าที่รับข้อมูลจากโมดูลตรวจวัดการใช้ปริมาณไฟฟ้าแล้วทำการส่งค่าไปยังฐานข้อมูลผ่านระบบ Wi-Fi ฐานข้อมูลจะทำการจัดเก็บข้อมูล และเชื่อมข้อมูลระหว่าง web Application สำหรับการแสดงผลค่าปริมาณไฟฟ้าและการคำนวณค่าไฟฟ้าที่จัดเก็บผ่านเครื่องคอมพิวเตอร์และบนมือถือ

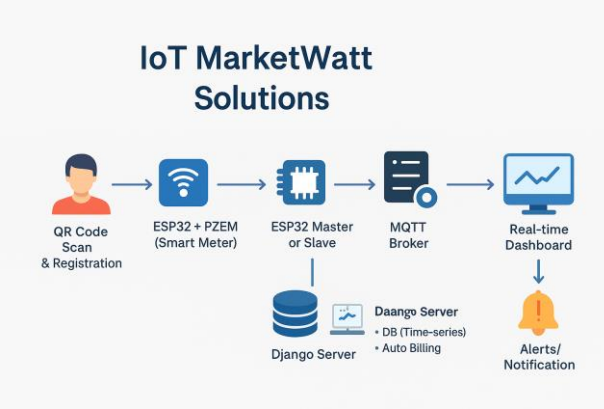



**รูปที่ 2** ไดอะแกรมระบบคิดคำนวณค่าไฟฟ้าตามปริมาณการใช้งานจริงผู้จำหน่ายสินค้าตลาดถนนคนดอย

ในการออกแบบการรับส่งข้อมูลระหว่างโมดูลตรวจวัดปริมาณไฟฟ้ากับระบบฐานข้อมูลผ่านโปรโตคอล MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) ซึ่ง MQTT เป็นโปรโตคอลที่ใช้สำหรับการสื่อสารระหว่างเครื่องต่อเครื่อง เซ็นเซอร์อัจฉริยะ อุปกรณ์สวมใส่ และอุปกรณ์ IoT เป็นต้น โดยมีจุดเด่นในการรับส่งข้อมูลผ่านเครือข่ายที่มีข้อจำกัดด้านทรัพยากรที่มีแบนด์วิดท์จำกัด MQTT จึงเป็นที่นิยมในงานพัฒนาระบบ IoT โดยนำ MQTT เป็นโปรโตคอลในการรับส่งข้อมูล เนื่องจากใช้งานง่ายและสามารถสื่อสารข้อมูล IoT ได้อย่างมีประสิทธิภาพ MQTT รองรับการส่งข้อความจากอุปกรณ์ไปยังคลาวด์และจากคลาวด์ไปยังอุปกรณ์ได้อีกด้วย [11]

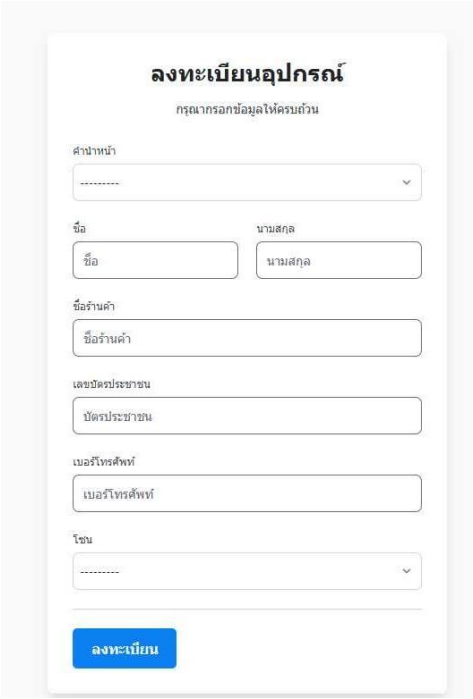
### 3.2 Web Application

หลังจากออกแบบในส่วนอุปกรณ์ตรวจวัดปริมาณไฟฟ้าเพื่อเชื่อมต่อข้อมูลเรียบร้อยแล้วได้ทำการออกแบบส่วนของ web application โดยในการออกแบบในส่วนของระบบการทำงานเพื่อแสดงผลผ่าน web application บนมือถือหรือเครื่องคอมพิวเตอร์ ดังแสดงไดอะแกรมการออกแบบในรูปที่ 3




**รูปที่ 3** ไดอะแกรม web application ระบบคิดคำนวณค่าไฟฟ้าตามปริมาณการใช้งานจริงสำหรับผู้จำหน่ายสินค้า

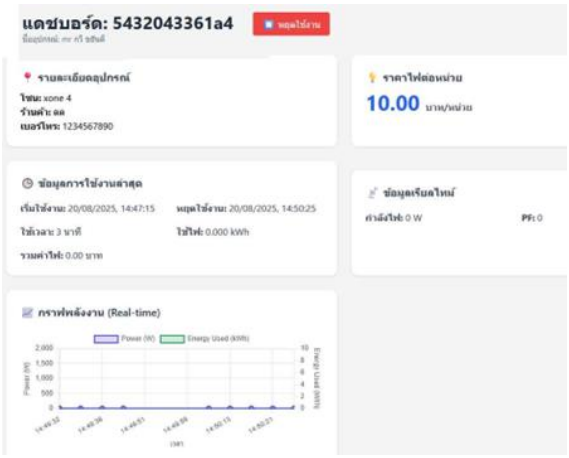
จากรูปที่ 3 แสดงไดอะแกรมการทำงานของระบบโดยเริ่มจากผู้ใช้งานลงทะเบียนและลงชื่อเข้าสู่ระบบเพื่อเชื่อมต่อกับโมดูลวัดปริมาณไฟฟ้า โมดูลจะทำการเชื่อมต่อกับฐานข้อมูลและ web application ผ่านโปรโตคอล MQTT ซึ่งส่วนประกอบของ web application จะประกอบไปด้วย ระบบลงทะเบียนเพื่อใช้งานระบบและเชื่อมต่อระบบเพื่อเข้าใช้งานไฟฟ้าผ่านระบบที่พัฒนาขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4 ประกอบไปด้วย ชื่อ - สกุล ชื่อร้านค้า เลขบัตรประจำตัวประชาชน เบอร์โทรศัพท์ และ โซนที่จำหน่ายสินค้า โดยการลงทะเบียนจะต้องได้รับอนุมัติจากผู้ดูแลระบบก่อน เนื่องด้วยระบบจะเชื่อมโยงกับระบบฐานข้อมูลของผู้จำหน่ายสินค้าของถนนคนเดินคนดอย ดังนั้นผู้จำหน่ายสินค้าภายในตลาดจะมีรายชื่อบนฐานข้อมูลหลักของเทศบาลตำบลแม่จันซึ่งเป็นผู้บริหารจัดการตลาด เมื่อข้อมูลการลงทะเบียนได้รับการตรวจสอบเรียบร้อยจากผู้ดูแลระบบจะได้รับการยืนยันการลงทะเบียน




**รูปที่ 4** ระบบลงทะเบียนเพื่อใช้งาน

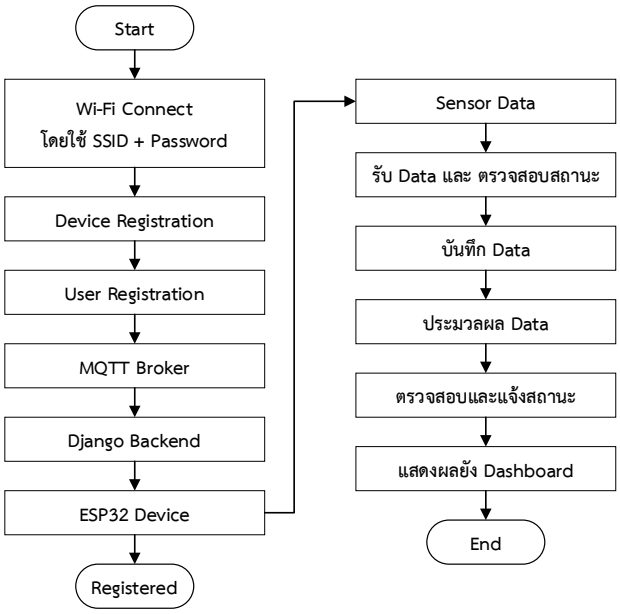
เมื่อดำเนินการได้รับอนุมัติการลงทะเบียนเรียบร้อยแล้วผู้จำหน่ายจะสามารถใช้งานระบบคิดคำนวณค่าไฟฟ้าตามปริมาณการใช้งานจริงผู้จำหน่ายสินค้าตลาดถนนคนดอยได้ ในการเริ่มต้นใช้งานระบบผู้จำหน่ายสินค้าทำการเข้าสู่ระบบ เมื่อเข้าสู่ระบบเรียบร้อยแล้วให้ทำการสแกน QR code ที่อยู่บนชุดโมดูลตรวจวัดปริมาณไฟฟ้าอัตโนมัติ ระบบจะทำการเชื่อมต่อข้อมูลกับชุดโมดูลตรวจวัดปริมาณไฟฟ้าอัตโนมัติ และจะทำการแสดงข้อมูลต่างๆ บนหน้า web application ดังแสดงในรูปที่ 5 โดยหน้าจอแสดงผลจะประกอบไปด้วย ข้อมูลผู้จำหน่ายสินค้าตามที่ได้ลงทะเบียนไว้ ข้อมูลปริมาณการใช้ไฟฟ้าแบบทันท่วงที (real time) โดยจะแสดงปริมาณการใช้ไฟฟ้าสะสมตั้งแต่เริ่มเชื่อมต่อกับระบบ เวลาที่ใช้ และค่าไฟฟ้าที่ใช้ในปัจจุบัน นอกจากนี้ยังมีส่วนการแสดงกราฟข้อมูลการใช้ไฟฟ้าย้อนหลัง และแสดงราคาค่าไฟฟ้าต่อหน่วยซึ่งในส่วนนี้ผู้บริหารจัดการตลาดสามารถเป็นผู้กำหนดราคาไฟฟ้าต่อหน่วยได้ เริ่มต้นใช้งานระบบผู้จำหน่ายสินค้าทำการเข้าสู่ระบบ เมื่อเข้าสู่ระบบเรียบร้อยแล้วให้ทำการสแกน QR code ที่อยู่บนชุดโมดูลตรวจวัดปริมาณไฟฟ้าอัตโนมัติ ระบบจะทำการเชื่อมต่อ

ข้อมูลกับชุดโมดูลตรวจวัดปริมาณไฟฟ้าอัตโนมัติ และจะทำการแสดงข้อมูลต่างๆ บนหน้า web application ดังแสดงในรูปที่ 5 โดยหน้าจอแสดงผลจะประกอบไปด้วย ข้อมูลผู้จำหน่ายสินค้าตามที่ได้ลงทะเบียนไว้ ข้อมูลปริมาณการใช้ไฟฟ้าแบบทันท่วงที (real time) โดยจะแสดงปริมาณการใช้ไฟฟ้าสะสมตั้งแต่เริ่มเชื่อมต่อกับระบบ เวลาที่ใช้ และค่าไฟฟ้าที่ใช้ในปัจจุบัน นอกจากนี้ยังมีส่วนการแสดงกราฟข้อมูลการใช้ไฟฟ้าย้อนหลัง และแสดงราคาค่าไฟฟ้าต่อหน่วยซึ่งในส่วนนี้ผู้บริหารจัดการตลาดสามารถเป็นผู้กำหนดราคาไฟฟ้าต่อหน่วยได้




**รูปที่ 5** หน้า web application แสดงข้อมูลการใช้งานระบบ

ระบบได้ออกแบบให้ผู้จำหน่ายสินค้าสามารถหยุดการใช้ไฟฟ้าโดยการกดเลือกหยุดใช้งานบนหน้า web application เพื่อให้ระบบหยุดทำงาน เมื่อระบบหยุดทำงานชุดตรวจวัดประมาณการใช้ไฟฟ้าจะสั่งหยุดจ่ายไฟฟ้าทันที หลังจากนั้นจะทำการสรุปยอดค่าไฟฟ้าให้ผู้จำหน่ายสินค้าได้ทราบ รวมถึงผู้ดูแลระบบได้ทราบยอดค่าไฟฟ้าเพื่อทำการออกใบเสร็จเพื่อจัดเก็บค่าไฟฟ้าต่อไป ในการหยุดการทำงานผู้วิจัยได้ทำการออกแบบให้ระบบหยุดทำงานอัตโนมัติเมื่อผู้ใช้งานไม่มีการใช้ไฟฟ้าภายใน 5 นาที ระบบจะทำการตัดกระแสไฟฟ้าแล้วทำการประมวลผลสรุปค่าไฟฟ้าที่ใช้ไปก่อนหน้าโดยอัตโนมัติ หากต้องการใช้งานต่อหลังจากระบบหยุดทำงาน ผู้ใช้งานจะต้องทำการเข้าสู่ระบบและสแกน QR code เพื่อเริ่มการใช้งานใหม่ หลังจากสิ้นสุดการใช้งานระบบก็จะประมวลผลสรุปผลค่าใช้ไฟฟ้าโดยรวมยอดจากยอดก่อนหน้า ผู้ใช้งานจะทราบค่าไฟฟ้ายอดรวมของวันนั้นๆ และทางผู้ดูและระบบก็จะดำเนินการออกใบเสร็จเพื่อเก็บเงินค่าไฟฟ้าให้กับผู้จำหน่ายไฟฟ้า ดังแสดง flowchart การพัฒนาระบบทั้งหมดในรูปที่ 6




**รูปที่ 6** โฟลว์ชาร์ตการพัฒนาระบบคิดคำนวณค่าไฟฟ้าตามปริมาณการใช้งานจริงผู้จำหน่ายสินค้าตลาดถนนคนดอย

จากโฟลว์ชาร์ตในการทำงานระบบมีส่วนประกอบการทำงาน 2 ส่วน ได้แก่ การลงทะเบียนอุปกรณ์ และ การรับ - ส่งข้อมูลการใช้พลังงาน ในส่วนที่แรกการลงทะเบียนและเริ่มต้นใช้งาน (Device Registration & Usage Start) ผู้ใช้ (User) จะเริ่มต้นโดยการสแกน QR Code ที่ตัวอุปกรณ์ จากนั้นกรอกข้อมูลส่วนตัวในฟอร์มลงทะเบียน เช่น ชื่อ-นามสกุล, ชื่อร้านค้า, หมายเลขบัตรประชาชน, เบอร์โทรศัพท์ และโซนที่ตั้งร้านอุปกรณ์ ESP32 เมื่อเปิดเครื่องและเชื่อมต่อ Wi-Fi สำเร็จ ระบบทำการประกาศตัวตน MQTT จะรับข้อมูลการเชื่อมต่อและส่งต่อไปยัง Django ทันทีแล้วทำการสร้างระเบียนอุปกรณ์ (Device record) ขึ้นในระบบ จากนั้น เมื่อผู้ใช้กรอกฟอร์มลงทะเบียนสำเร็จ ระบบจะทำการเชื่อมโยงข้อมูลผู้ใช้กับอุปกรณ์และสร้าง UsageSession สำหรับการใช้งานครั้งนี้ และส่งข้อความ confirm_registration กลับไปยัง MQTT และเมื่อ ESP32 รับข้อความยืนยันจาก MQTT Broker จากนั้นจึงเปลี่ยนสถานะเป็น "Registered" ซึ่งอาจแสดงผลผ่าน LED หรือ Buzzer และเริ่มกระบวนการรับ ข ส่งข้อมูลจากเซ็นเซอร์

ในส่วนที่สองการส่งและประมวลผลข้อมูลพลังงาน (Sensor Data Transmission & Processing) ESP32 จะอ่านค่าจากเซ็นเซอร์วัดพลังงานอย่างต่อเนื่อง และส่งข้อมูลในรูปแบบ Real-Time ไปยัง MQTT Broker เมื่อรับข้อมูลจากอุปกรณ์และจะส่งต่อไปยัง Django Backend ทันที Django Backendแล้วดำเนินการตรวจสอบว่าอุปกรณ์มีสถานะ is_registered และ is_active, บันทึกข้อมูลและอัปเดตข้อมูลใน UsageSession โดยคำนวณปริมาณพลังงาน

สะสมและค่าใช้จ่ายแบบเรียลไทม์และทำการประมวลผลแล้วผ่าน WebSocket ไปยัง Dashboard ของผู้ใช้และผู้ดูแลระบบเพื่อแสดงผล

**3.3 การออกการโปรแกรมในการคำนวนค่าไฟฟ้าตามจริง**

ในการคำนวณปริมาณกำลังไฟฟ้ารวมของอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ต่อใช้งาน คำนวณได้จากการนำค่ากำลังงานไฟฟ้าจากโหลดแต่ละตัวบวกมารวมกัน เช่น หลอดไฟฟ้าขนาด 20 วัตต์ต่อใช้งานจำนวน 3 หลอด ค่ากำลังงานไฟฟ้ารวมจะเท่ากับ 60 วัตต์ เมื่อต้องการคิดคำนวณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้งานจริงซึ่งมีหน่วยเป็น “ยูนิต หรือ กิโลวัตต์ - ชั่วโมง (kWh)” โดยคำนวณได้จากกำลังงานไฟฟ้ารวมคูณด้วยจำนวนชั่วโมงหารด้วย 1,000 จะได้พลังงานไฟฟ้าที่ใช้จริงนั้นเอง จากข้างต้นหลอดไฟฟ้าฟ้าจำนวน 3 หลอดขนาด 20 วัตต์หากใช้งานต่อเนื่อง 5 ชั่วโมง ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้จริงจะเท่ากับ 0.3 ยูนิต หรือ 0.3 หน่วย หากคำนวณค่าไฟฟ้าจริงหน่วยเป็นบาทต่อหน่วย ก็จะขึ้นอยู่กับการกำหนดราคาในการจัดเก็บค่าไฟฟ้าหากกำหนดราคา 20 ต่อหน่วย ค่าไฟฟ้าจะเท่ากับ 6 บาท ระบบคิดคำนวณค่าไฟฟ้าตามปริมาณการใช้งานจริงผู้จำหน่ายสินค้าตลาดถนนคนดอยได้ออกแบบเชื่อมต่อข้อมูลระหว่างไปยังฐานข้อมูลกลางของผู้บริหารจัดการตลาด ซึ่งตลาดถนนคนเดินคนดอยหน่วยงานที่รับผิดชอบคือเทศบาลตำบลแม่จัน ได้มีระบบฐานข้อมูลผู้จำหน่ายสินค้าอยู่แล้วระบบที่นำเสนอจะทำการส่งข้อมูลปริมาณการใช้ไฟฟ้าและค่าไฟฟ้าที่จัดเก็บได้ไปบันทึกลงบนฐานข้อมูลของทางเทศบาล เพื่อทำการสรุปยอดการจัดเก็บค่าไฟฟ้าในแต่ละวันและสรุปข้อมูลย้อนหลังได้ผ่านระบบฐานข้อมูลที่พัฒนาขึ้นมา

ในด้านการพัฒนาโปรแกรมเพื่อระบบการรับส่งข้อมูลจากโมดูลวัดกำลังงานฟ้า ESP32 จะทำการรับค่าพลังงานจากโมดูลทุก 5 นาที แล้วทำการส่งข้อมูลไปยัง Django ผ่าน MQTT โดยเมื่อ Django ได้รับข้อมูลล่าสุดจะทำการคำนวณปริมาณค่าไฟต่อช่วงเวลาปัจจุบัน โดยทำการคำนวณทุกครั้งได้รับค่าจากโมดูลทุก 5 วินาที Django ที่ได้ออกแบบการคำนวณตามสูตรคำนวณค่าไฟฟ้าตามปริมาณใช้จริงที่ได้กล่าวไว้ก่อนหน้า และเมื่อหยุดใช้งานระบบจะทำการประมวลผลค่าปริมาณการใช้ไฟฟ้าตั้งแต่เริ่มต้นการทำงานจนสิ้นสุดการทำงานออกมาผ่านหน้า dashboard บน web application ในการพัฒนาโปรแกรมได้กำหนดเงื่อนไขในการหยุดการทำงาน 2 แบบ คือผู้ใช้หยุดการทำงานเองบน web application ระบบจะสั่งให้โมดูลหยุดการทำงานแบบอัตโนมัติและทำการประมวลผลค่าใช้ไฟฟ้าจริง และในกรณีที่สองเมื่อผู้ค้าทำการหยุดใช้ไฟฟ้าเป็นระยะเวลา 5 นาที ระบบจะทำการตัดการทำงานแบบอัตโนมัติและทำการประมวลผลสรุป โดยในกรณีที่สองนี้ผู้ดูและสามารถกำหนดการตัดทำงานแบบอัตโนมัติเมื่อมีการใช้ไฟฟ้ากี่นาทีได้ตามผู้บริหารจัดการระบบต้องการ นอกจากนี้ระบบได้ออกแบบให้เมื่อผู้ใช้งานหยุดใช้งานแล้วต้องการใช้งานต่ออีกครั้งเมื่อทำการล็อกอินเข้าระบบผ่าน web application โดยใช้ user และ password ของตนเองระบบจะทำการประมวลผลปริมาณการใช้ไฟฟ้าต่อจากเดิมอัตโนมัติ ดังแสดงตัวอย่างโปรแกรมที่คณะผู้วิจัยได้พัฒนาในรูปที่ 7

powerapp > mqtt_client.py > ...

```python
import threading
import paho.mqtt.client as mqtt
from django.utils.timezone import now
from .models import Device, UsageSession, EnergyLog
import json
from channels.layers import get_channel_layer
from asgiref.sync import async_to_sync

# ---------------- CONFIG ----------------
MQTT_BROKER = "broker.emqx.io"
MQTT_PORT = 1883
MQTT_TOPIC_PREFIX = "marketwatt/register/"
MQTT_TOPIC_DATA_PREFIX = "marketwatt/data/"
RATE_PER_KWH = 4.50  # บาท/หน่วย
# ----------------------------------------

mqtt_client = mqtt.Client()
device_sessions = {}  # เก็บ session ของแต่ละ device ในหน่วยความจำ


def calculate_tou_cost(energy_used):
    """คำนวณค่าไฟแบบง่าย (TODO: ปรับเป็น TOU ถ้าต้องการ)"""
    return energy_used * RATE_PER_KWH


def on_connect(client, userdata, flags, rc):
    print(f"[MQTT] Connected with result code {rc}")
    client.subscribe(MQTT_TOPIC_PREFIX + "#")
    client.subscribe(MQTT_TOPIC_DATA_PREFIX + "#")


def on_message(client, userdata, msg):
    topic = msg.topic
    payload = msg.payload.decode()

    if topic.startswith(MQTT_TOPIC_PREFIX):
        handle_register_message(topic, payload)
```

powerapp > models.py > EnergyLog

```python
from django.db import models
from django.utils.timezone import now
from datetime import timedelta

class Device(models.Model):
    device_id = models.CharField(max_length=32, unique=True)
    registered_at = models.DateTimeField(auto_now_add=True)
    is_registered = models.BooleanField(default=False)  # ✅ เพิ่ม field นี้
    is_active = models.BooleanField(default=False)      # กำลังใช่งานหรือไม่
    active_since = models.DateTimeField(null=True, blank=True)  # เวลาเริ่มใช่งานจริง
    is_online = models.BooleanField(default=False)
    last_seen = models.DateTimeField(null=True, blank=True)
    first_name = models.CharField(max_length=100)
    last_name = models.CharField(max_length=100)
    shop_name = models.CharField(max_length=100, blank=True)
    citizen_id = models.CharField(max_length=13, blank=True)
    phone_number = models.CharField(max_length=20, blank=True)


    zone = models.ForeignKey('Zone', on_delete=models.SET_NULL, null=True, blank=True)

    PREFIX_CHOICES = [
        ('mr', 'นาย'),
        ('mrs', 'นาง'),
        ('ms', 'นางสาว'),
        # เพิ่มเติมได้ตามต้องการ
    ]

    num = models.CharField(max_length=5, choices=PREFIX_CHOICES, blank=True, null=True)

    def __str__(self):
        return self.device_id

class EnergyLog(models.Model):
    device = models.ForeignKey(Device, on_delete=models.CASCADE, related_name='energy_logs')
    timestamp = models.DateTimeField(auto_now_add=True)
    power = models.FloatField()
    energy = models.FloatField() # พลังงานสะสม
    unit_rate = models.FloatField(default=4.72)  # บาทต่อหน่วยไฟฟ้า
    ft_rate = models.FloatField(default=0.93)    # ค่า Ft ต่อหน่วย
    vat_rate = models.FloatField(default=0.07)   # VAT 7%

    def calculate_cost(self):
        settings = SettingsModel.load()
        unit_rate = float(settings.price_per_kwh)
```

**รูปที่ 7** ตัวอย่างการเขียนโปรแกรมของระบบ

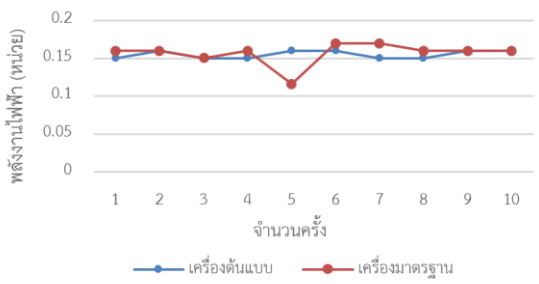
## 4. ผลการทดสอบ

### 4.1 การทดสอบการทำงานชุดโมดูลตรวจวัดการใช้ปริมาณไฟฟ้าจำนวน 1 ชุด

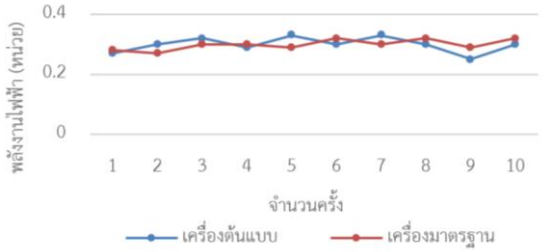
ในการทดสอบการทำงานชุดโมดูลตรวจวัดการใช้ปริมาณไฟฟ้าคณะผู้วิจัยได้ทำการติดตั้งชุดโมดูลสำหรับตรวจวัดการใช้ปริมาณไฟฟ้าในห้องปฏิบัติการ ค่าแรงดันไฟบ้าน *220VAC±10V* โดยทำการติดตั้งมิเตอร์ไฟฟ้าแบบดิจิทัลมาตรฐานเพื่อทดสอบประสิทธิภาพของการตรวจวัดประสิทธิภาพการทำงานของระบบที่ได้พัฒนาขึ้น โดยแสดงผลการทดสอบเปรียบประสิทธิภาพ โดยทำการติดตั้งระบบแล้วทำการเชื่อมต่ออุปกรณ์ไฟฟ้า โดยทำการต่อโหลดไฟฟ้าเป็นหลอดไฟฟ้าขนาด 18 วัตต์ จำนวน 3 หลอด โดยคิดค่ากำลังไฟฟ้ารวมเท่ากับ 54 วัตต์ โดยมีค่ากำลังงานในการใช้ไฟฟ้าจริงต่อชั่วโมงเท่ากับ 0.054 หน่วย ในการทดสอบทำการทดสอบแบ่งออกเป็น 4 ช่วงระยะเวลา โดยทำการทดลองซ้ำ จำนวน 10 ครั้ง โดยกำหนดเวลาทดสอบออกเป็น 3 ชั่วโมง 5 ชั่วโมง 7 ชั่วโมง และ 10 ชั่วโมง เมื่อคำนวณปริมาณการใช้กำลังงานไฟฟ้าจริงที่ 3 ชั่วโมง มีปริมาณการใช้ไฟฟ้าจริงเท่ากับ 0.162 หน่วย ที่ 5 ชั่วโมง มีปริมาณการใช้ไฟฟ้าจริงเท่ากับ 0.27 หน่วย ที่ 7 ชั่วโมงมีปริมาณการใช้ไฟฟ้าจริงเท่ากับ 0.378 หน่วย และที่ 10 ชั่วโมง มีปริมาณการใช้ไฟฟ้าจริงเท่ากับ 0.54 หน่วย โดยทำการทดสอบระหว่างเครื่องต้นแบบที่นำเสนอผ่านหน้า web application กับมิเตอร์ไฟฟ้าแบบดิจิทัลมาตรฐาน ดังแสดงในรูปที่ 8 และผลการทดสอบเปรียบเทียบระหว่างเครื่องต้นแบบและค่าที่คำนวณได้ ในการคำนวณค่าประสิทธิภาพหาได้จากสมการที่ 1

ประสิทธิภาพ = (ค่าวัดได้ / ค่าที่คำนวณ) x 100%  (1)

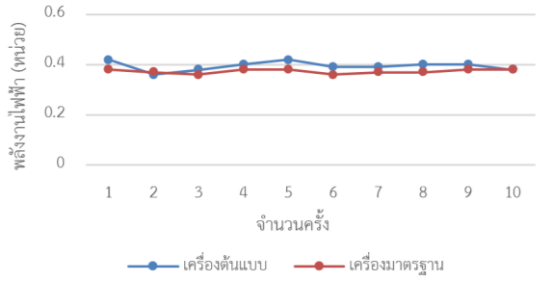
โดยค่าประสิทธิภาพของระบบโดยสรุปดังแสดงใน ดังตารางที่ 1



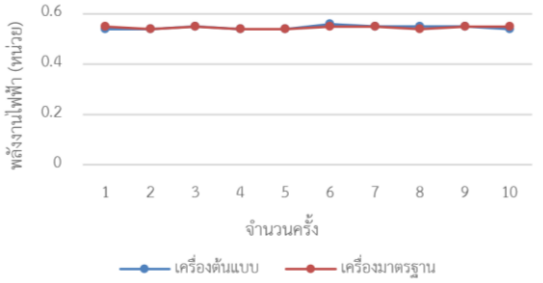

ก. 3 ชั่วโมง




ข. 5 ชั่วโมง




ค. 7 ชั่วโมง




ง. 10 ชั่วโมง

**รูปที่ 8** กราฟเปรียบเทียบผลการทดสอบการทำงานเครื่องต้นแบบกับเครื่องมาตรฐาน

**ตารางที่ 1** ผลการทดสอบการชุดโมดูลตรวจวัดการใช้ปริมาณไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นกับมิเตอร์ไฟฟ้าแบบดิจิทัล

| รอบการทดสอบ (ชั่วโมง) | จำนวนครั้ง | ประสิทธิภาพ (%) |
|---|---|---|
| 3 | 10 | 98.43 |
| 5 | 10 | 98.67 |
| 7 | 10 | 97.51 |
| 10 | 10 | 95.22 |
| | **เฉลี่ย** | **97.45** |

จากผลการทดสอบการทำงานของระบบเมื่อทำการทดลองการใช้ระบบคิดคำนวณค่าไฟฟ้าตามปริมาณการใช้งานจริงผู้จำหน่ายสินค้าตลาดถนนคนดอยในส่วนประสิทธิการทำงานของชุดตรวจวัดปริมาณไฟฟ้าที่แสดงผลบนหน้า web application เปรียบเทียบกับการวัดด้วยมิเตอร์ไฟฟ้าที่ใช้จริงตามมาตรฐานการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค โดยแบ่งการทดสอบออกเป็นรอบในการทดสอบจำนวน 4 รูปแบบ โดยทำการต่อโหลดอุปกรณ์ไฟฟ้าเพื่อทดสอบเป็นหลอดไฟฟ้า

ขนาด 10 วัตต์จำนวน 3 หลอด เพื่อทดสอบประสิทธิภาพในการตรวจวัด พบว่าในการทดสอบการทำงานของระบบเป็นเวลา 3 ชั่วโมง ประสิทธิภาพและความถูกต้องคิดเป็นร้อยละ 98.43 ที่เวลา 5 ชั่วโมง ประสิทธิภาพและความถูกต้องคิดเป็นร้อยละ 98.67 ที่เวลา 7 ชั่วโมง ประสิทธิภาพและความถูกต้องคิดเป็นร้อยละ 97.51 และที่เวลา 10 ชั่วโมง ประสิทธิภาพและความถูกต้องคิดเป็นร้อยละ 95.22 โดยมีประสิทธิภาพและความถูกต้องเฉลี่ยคิดเป็นร้อยละ 97.45

**4.2 การทดสอบการทำงานชุดโมดูลตรวจวัดการใช้ปริมาณไฟฟ้าจำนวน 5 ชุด**

ในการทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของชุดโมดูลตรวจวัดการใช้ปริมาณไฟฟ้าจำนวน 5 ชุด พร้อมกัน โดยทำการทดลองด้วยการทำงานของโมดูลตรวจวัดและคำนวณปริมาณการใช้ไฟฟ้าเพื่อทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของระบบ ซึ่งกำหนดจำนวนการทำงานของระบบเป็นเวลา 3 ชั่วโมง และ 5 ชั่วโมง โดยทำการต่อโหลดอุปกรณ์ไฟฟ้าเพื่อทดสอบเป็นหลอดไฟฟ้าขนาด 18 วัตต์จำนวน 3 หลอด ต่อเข้ากับชุดโมดูลตรวจวัดปริมาณไฟฟ้าจำนวน 5 ชุด หลังจากนั้นทำการทดลองจำนวน 10 ครั้ง โดยทำการทดสอบเช่นเดียวกันกันการทดลองในหัวข้อที่ผ่านมา จากการคำนวนค่าปริมาณไฟฟ้าจริงจากการคำนวณเท่ากับ 0.162 หน่วย และ 0.27 หน่วยตามลำดับ จากการทดสอบพบว่าการทำงานของระบบทำงานได้อย่างต่อเนื่อง และพบว่าการแสดงค่าปริมาณไฟฟ้าทั้ง 5 ชุด ที่ได้ทำการทดสอบแสดงค่าปริมาณการใช้ไฟฟ้าบนหน้า web application ที่มีค่าใกล้เคียงกัน จากการทดสอบพบว่าระบบมีประสิทธิภาพและความถูกต้องคิดเป็นร้อยละ 98.75 หลังจากนั้นได้ทำการกำหนดจำนวนชั่วโมงในการทดสอบเป็น 5 ชั่วโมง โดยทำการทดลองจำนวน 10 ครั้ง พบว่าประสิทธิภาพและความถูกต้องคิดเป็นร้อยละ 98.60 โดยมีค่าเฉลี่ยคิดเป็นร้อยละ 98.67 ดังแสดงในตารางที่ 2

**ตารางที่ 2** ผลการทดสอบการทำงานชุดโมดูลตรวจวัดการใช้ปริมาณไฟฟ้าจำนวน 5 ชุด พร้อมกัน

| รอบการทดสอบ (ชั่วโมง) | จำนวนครั้ง | ประสิทธิภาพ (%) |
|---|---|---|
| 3 | 10 | 98.75 |
| 5 | 10 | 98.60 |
| | เฉลี่ย | 98.67 |

**4.3 การทดสอบการทำงานชุดโมดูลตรวจวัดการใช้ปริมาณไฟฟ้าจำนวน 10 ชุด**

ในการทดสอบการทำงานของชุดโมดูลตรวจวัดการใช้ปริมาณไฟฟ้าจำนวน 10 ชุด พร้อมกัน โดยทำการทดลองด้วยการทำงานของโมดูลตรวจวัดและคำนวณปริมาณการใช้ไฟฟ้าเพื่อทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของระบบ ซึ่งกำหนดจำนวนการทำงานของระบบเป็นเวลา 3 ชั่วโมง โดยทำการต่อโหลดอุปกรณ์ไฟฟ้าเพื่อทดสอบเป็นหลอดไฟฟ้าขนาด 18 วัตต์ จำนวน 3 หลอด กับชุดโมดูลตรวจวัดปริมาณไฟฟ้าทั้ง 10 ชุด เหมือนกัน จากนั้นทำการทดลองจำนวน 10 ครั้ง พบว่าการทำงานของระบบทำงานได้อย่างต่อเนื่อง และพบว่าการแสดงค่าปริมาณไฟฟ้าทั้ง 10 ชุด แสดงค่าปริมาณการใช้ไฟฟ้าบนหน้า web application ที่ใกล้เคียงกัน จากการทดสอบพบว่าระบบมีประสิทธิภาพและความถูกต้องคิดเป็นร้อยละ 98.89 และ 98.64 ตามลำดับ โดยมีค่าเฉลี่ยคิดเป็นร้อยละ 98.76 ดังแสดงในตารางที่ 3

**ตารางที่ 3** ผลการทดสอบการทำงานชุดโมดูลตรวจวัดการใช้ปริมาณไฟฟ้าจำนวน 10 ชุด พร้อมกัน

| รอบการทดสอบ (ชั่วโมง) | จำนวนครั้ง | ประสิทธิภาพ (%) |
|---|---|---|
| 3 | 10 | 98.89 |
| 5 | 10 | 98.64 |
| | เฉลี่ย | 98.76 |

**4.3 การประเมินความพึงพอใจต่อระบบ**

การประเมินความพึงพอใจการพัฒนาต้นแบบระบบคำนวณค่าไฟฟ้าตามปริมาณการใช้จริงผู้จำหน่ายสินค้าตลาดถนนคนดอย หลังจากทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของอุปกรณ์ทางด้าน hard ware เรียบร้อยแล้ว โดยมีค่าความเที่ยงตรงเชิงเนื้อหา (IOC) จากผู้เชี่ยวชาญจำนวน 5 ท่าน โดยให้ผู้เชี่ยวชาญทดลองใช้และประเมินระบบโดยใช้แบบประเมินประสิทธิภาพที่ผู้วิจัยสร้างขึ้นซึ่งผ่านการตรวจสอบคุณภาพ มีค่าค่าเฉลี่ยรวม IOC เท่ากับ 0.97 คณะผู้วิจัยได้นำระบบที่เสร็จสมบูรณ์ไปให้กลุ่มตัวอย่างในการประเมินความพึงพอใจในด้านต่างๆ โดยเป็นกลุ่มตัวอย่างชนิดเจาะจง จำนวน 30 ตัวอย่าง ประกอบไปด้วยผู้เชี่ยวชาญด้านการพัฒนานวัตกรรมด้านเทคโนโลยีดิจิทัล จำนวน 2 คน คณาจารย์สาขาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ จำนวน 3 ท่าน บุคลากรเทศบาลตำบลแม่จันผู้รับผิดชอบและปฏิบัติงานในการบริหารจัดการตลาดจำนวน 5 ท่าน และผู้จำหน่ายสินค้าในตลาดจำนวน 20 ท่าน โดยแบ่งผลการประเมินความพึงพอใจออกเป็น 5 ด้าน คือ ด้านประสิทธิภาพการทำงานของระบบด้านอุปกรณ์ hard ware ด้านรูปแบบและความสมบูรณ์ web applicationด้านความสมบูรณ์ของระบบในภาพรวม และด้านประโยชน์การใช้งานที่ได้รับ ซึ่งในการวิเคราะห์ข้อมูลจากแบบประเมินความพึง

พอใจมาทำการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ย ( $\bar{x}$ ) และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) โดยใช้เกณฑ์การวิเคราะห์ช่วงค่าเฉลี่ยเลขคณิตของแบบสอบถามแบบลิเคิร์ทสเกล แบ่งระดับความพึงพอใจออกเป็น 5 ระดับ เป็นดังนี้ [12]

4.51 – 5.00 หมายถึง มีความพึงพอใจมากที่สุด

3.51 – 4.50 หมายถึง มีความพึงพอใจมาก

2.51 – 3.50 หมายถึง มีความพึงพอใจปานกลาง

1.51 – 2.50 หมายถึง มีความพึงพอใจน้อย

1.00 – 1.50 หมายถึง มีความพึงพอใจน้อยที่สุด

**ตารางที่ 4** ความพึงพอใจต่อระบบคำนวณค่าไฟฟ้าตามปริมาณการใช้จริงผู้จำหน่ายสินค้าตลาดถนนคนดอย อำเภอแม่จัน จังหวัดเชียงราย

| ด้าน | ค่าเฉลี่ย | S.D. |
|---|---|---|
| 1. ด้านประสิทธิภาพการทำงานของระบบด้านอุปกรณ์ hard ware | 4.49 | 0.48 |
| 2. ด้านรูปแบบและความสมบูรณ์ web application | 4.38 | 0.40 |
| 3. ด้านความสมบูรณ์ของระบบในภาพรวม | 4.31 | 0.42 |
| 4. ด้านประโยชน์การใช้งานที่ได้รับ | 4.76 | 0.41 |
| เฉลี่ย | 4.48 | 0.47 |

จากตารางที่ 4 พบว่าจากผลการประเมินความพึงพอใจต่อต่อระบบคำนวณค่าไฟฟ้าตามปริมาณการใช้จริงผู้จำหน่ายสินค้าตลาดถนนคนดอย อำเภอแม่จัน จังหวัดเชียงราย จากกลุ่มตัวอย่าง 30 คน พบว่าความพึงพอใจในระดับมากที่สุดอยู่ 1 ด้าน คือด้านประโยชน์การใช้งานที่ได้รับ มีค่าเฉลี่ยความพึงพอใจเท่ากับ 4.76 และความพึงพอใจในระดับมาก จำนวน 3 ด้าน ด้านประสิทธิภาพการทำงานของระบบด้านอุปกรณ์ hard ware ด้านรูปแบบและความสมบูรณ์ web application และด้านความสมบูรณ์ของระบบในภาพรวม มีค่าเฉลี่ยความพึงพอใจเท่ากับ 4.49 4.38 และ 4.31 ตามลำดับ มีค่าความพึงเฉลี่ยค่าเฉลี่ยโดยรวมในทุกด้านคิดเป็นร้อยละความพึงพอใจเท่ากับ 4.48 มีความพึงพอใจในระดับมาก

## 5. สรุป

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการพัฒนาต้นแบบระบบคำนวณค่าไฟฟ้าตามปริมาณการใช้จริงผู้จำหน่ายสินค้าตลาดถนนคนดอย อำเภอแม่จัน จังหวัดเชียงราย เพื่ออำนวยความสะดวกในการจัดเก็บค่าไฟฟ้าจากผู้จำหน่ายสินค้าภายในตลาดอย่างถูกต้องโดยการนำเทคโนโลยี IoT มาเป็นส่วนหลักสำหรับการออกแบบระบบในด้าน hard ware โดยใช้โปโตคอล MQTT ในการรับส่งข้อมูลระหว่างอุปกรณ์กับฐานข้อมูลและ web application เมื่อทำการพัฒนาต้นแบบระบบคำนวณค่าไฟฟ้าตามปริมาณการใช้จริงผู้จำหน่ายสินค้าตลาดถนนคนดอย อำเภอแม่จัน จังหวัดเชียงรายเรียบร้อยได้ทำการทดสอบการทำงานของระบบในแต่ละส่วนเพื่อทดสอบประสิทธิภาพการทำงาน โดยการทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของระบบ ได้แบ่งการทดสอบออกเป็น 3 รูปแบบ ดังนี้

ในการทดสอบรูปแบบแรกดำเนินการทดสอบระบบคำนวณค่าไฟฟ้าตามปริมาณการใช้จริงจำนวน 1 ชุด กำหนดช่วงเวลาในการทดสอบออกเป็น 5 ช่วงเวลา คือ 3, 5, 7 และ 10 ชั่วโมง โดยทำการทดลองซ้ำจำนวน 10 รอบ พบว่าระบบที่นำเสนอมีประสิทธิภาพการทำงานเฉลี่ยร้อยละ 97.45 รูปแบบที่ทำการทดสอบการต่อโหลดในการทดสอบเช่นเดียวกันกับแบบแรกแต่ทำการต่อโหลดสำหรับการทดสอบชุดตรวจวัดและแสดงผลพร้อมกันจำนวน 5 ชุด พบว่าระบบที่นำเสนอมีประสิทธิภาพการทำงานเฉลี่ยร้อยละ 98.67 และในการทดสอบรูปแบบสุดท้าย คณะผู้วิจัยได้ทำการต่อทดสอบชุดตรวจวัดและแสดงผลจำนวน 10 ชุดพร้อมกัน พบว่าระบบที่นำเสนอมีประสิทธิภาพการทำงานเฉลี่ยร้อยละ 98.76

เมื่อทำการทดสอบประสิทธิภาพของระบบเรียบร้อยแล้วหลังจากนั้นคณะผู้วิจัยได้นำต้นแบบระบบคำนวณค่าไฟฟ้าตามปริมาณการใช้จริงผู้จำหน่ายสินค้าตลาดถนนคนดอย อำเภอแม่จัน จังหวัดเชียงราย ให้กลุ่มตัวอย่างเพื่อประเมินความพึงพอใจของระบบต้นแบบในแต่ละด้านจำนวน 30 คน พบว่าค่าเฉลี่ยโดยรวมในทุกด้านคิดเป็นร้อยละความพึงพอใจเท่ากับ 4.48 มีความพึงพอใจในระดับมาก

## 6. ข้อเสนอแนะในการพัฒนาต่อไป

งานวิจัยนี้เป็นการทดสอบระบบในห้องปฏิบัติการในการพัฒนาครั้งต่อไปควรมีการนำไปทดสอบระบบจริงในพื้นที่และควรพัฒนาระบบการออกใบเสร็จในการจัดเก็บค่าไฟฟ้าจากผู้ค้า โดยมีการเชื่อมโยงกับระบบฐานข้อมูลผ่าน web application

## 7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณเทศบาลตำบลแม่จัน อำเภอแม่จัน จังหวัดเชียงรายที่ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูล สถานที่ในการทดสอบ รวมถึงการสนับสนุนในด้านต่างๆ สำหรับการดำเนินงานวิจัยนี้จนบรรลุตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้

## 8. เอกสารอ้างอิง


[1] Y. Klubcharoen, “The implementation of Electrical Measurement system for small apartment,” M.S. thesis, Department of Information Technology and Management, School of Information Technology and Innovation, Bangkok University, Bangkok, 2018 (in Thai).

[2] S. Inkamchur, “Design and development of electrical current measurement system by wireless sensor networks,” M.S. thesis, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Thammasat University, Bangkok, 2017(in Thai).

[3] K. Choochart, “Development of the Internet of Things Platform system for Electricity Usage Monitoring Case study: Srivitsawavitthaya Buildings, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Srivijaya,” M.S. thesis, Department of Industrial Management, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Songkla, 2022 (in Thai).

[4] K. Narat, T.Klampong and G. Khongklin “A Current usage monitoring and storage apparatus,” M.S. thesis, Department of Electrical and Computer Engineering, Faculty of Engineering, Naresuan University, Phitsanulok, 2015 (in Thai).

[5] T. Siramongkolkan, “Displaying of Electrical Energy Consumption Through Application on Smartphone Controlled by Microcontroller,” in Proceeding of The11th National and the 9th International Conference on Research and Innovation: The Development of Community Economy with BCG Model, *Khon Kaen, Thailand*, May. 26, 2024, pp. 309-321 (in Thai).

[6] N. Apiruchpinyo and S. Chaochaikong, “Electrical Power Management System in Buildings Via the internet of Things: A Case Study of Srikodtraboon Building of Nakhon Phanom University,” *Udon Tani Rajabhat University Journal of Science and Technology*, vol. 10, no.3, pp. 43-62, Sep-Dec. 2022.

[7] C. Kosoom, P. Kosoom, K. Yookaew and P. Tammanitassana, “Vertical Beam Adjustable Antenna for Internet of Things Applications,” *Journal of Science and Technology Thonburi University*, vol. 6, no.1, pp. 13-27, Jan -Jun. 2022.

[8] K. Nontasud and P. Tunjaya, “The Automatic Control of Electrical Power Consumption in Office by Using Internet of Things Technology: Case Study of Eastern Asia University,” *EAU Heritage Journal of Science and Technology*, vol. 13, no. 1, pp. 159-171, Jan-Apr.2019.

[9] J. Junkunchon, K. Kunyamee and J.Youtsuwan, “Development of smart electricity meters under the concept of the Internet of Things,” *Academic Journal of Science and Applied Science*, vol. 10, no. 2, pp. 37-46, Jul-Dec.2021.

[10] P.Maneechot, W. Wongpanyo and B. Vichanpol, “Development of Smart Meter for Electricity Consumption Management in Energy Park, Kamphaengphet Rajabhat University,” *Academic Journal Uttaradit Rajabhat University*, vol. 15, no. 1, pp. 51-65, Jan-Jun. 2020.

[11] Steve. Beginners Guide ToThe MQTT Protocol. [Online]. (2016). [Cited June 19, 2025]. Available: http://www.steves-internet-guide.com/mqtt/

[12] G. Norman, *Likert scales, Levels of measurement and the “Laws” of statistics*. Advances in Health Sciences Education, 2010, pp. 625-632.

คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี
The Journal of Industrial Technology Thepsatri Rajabhat University
โทรศัพท์ 036-422125 เว็บไซต์ https://itech.tru.ac.th/tci