

NUEJ

NARESUAN

UNIVERSITY ENGINEERING JOURNAL

July - December 2021 Vol.16, No.2
ISSN : 2651-1568



Editorial Team

Advisory

Prof. Dr. Somchai Wongwises	Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi
Assoc. Prof. Dr. Uraya Weesakul	Faculty of Engineering, Thammasat University
Assoc. Prof. Dr. Sarintip Tantanee	Faculty of Engineering, Naresuan University
Assoc. Prof. Dr. Suchart Yammen	Faculty of Engineering, Naresuan University

Editor

Asst. Prof. Sutanit Puttapanom	Faculty of Engineering, Naresuan University
Dr. Phisut Apichayakul	Faculty of Engineering, Naresuan University

Associate Editor

Assoc. Prof. Dr. Panus Nattharith	Faculty of Engineering, Naresuan University
-----------------------------------	---

Editorial Board

Prof. Dr. Kosin Chamnongthai	Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi
Prof. Dr Juntaraporn Palagongun	Faculty of Engineering, King Monkut's University of Technology North Bangkok
Prof. Dr. Pradit Terdtoon	Faculty of Engineering Chiang Mai Univerisity
Prof. Dr. Puangrat Kajitvichyanukul	Faculty of Engineering, Chiang Mai Univerisity
Prof. Dr. Wanida Jinsart	Faculty of Science, Chulalongkorn University
Prof. Dr. Virote Boonamnuayvitaya	Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi
Prof. Dr. Vatanavongs Ratanavaraha	Institute of Engineering, Suranaree University of Tecnology
Prof. Dr. Somchai Wongwises	Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi
Prof. Dr. Sampan Rittidej	Faculty of Engineering Mahasarakham University

Editorial Board

Prof. Dr. Sumrerng Jugjai	Faculty of Engineering King Mongkut's University of Technology Thonburi
Prof. Dr. Apinunt Thanachayanont	Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Prof. Dr. Issarachai Ngamroo	Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Prof. Christian Hicks	Newcastle University United Kingdom,
Prof. Dr. Paisarn Muneesawang	Faculty of Engineering, Naresuan University
Assoc. Prof. Dr. Kamchai Nuithitikul	Faculty of Engineering Walailak University
Assoc. Prof. Dr. Chalermraj Wantawin	Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi
Assoc. Prof. Dr. Songphol Kanjanachuchai	Faculty of Engineering, Chulalongkorn University
Assoc. Prof. Dr. Nipon Theeraumpon	Faculty of Engineering, Chiang Mai University
Assoc. Prof. Dr. Ninlawan Choomrit	Faculty of Engineering, Srinakharinwirot University
Assoc. Prof. Dr. Nivit Charoenchai	Faculty of Engineering, Chiang Mai University
Assoc. Prof. Dr. Yodchanan Wongsawat	Faculty of Engineering, Mahidol University
Assoc. Prof. Dr. Lunchakorn Wuttisittikulki	Faculty of Engineering, Chulalongkorn University
Assoc. Prof. Dr. Watcharin Pongaen	Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology North Bangkok
Assoc. Prof. Dr. Wassanai Wattanutchariya,	Faculty of Engineering Chiang Mai University
Assoc. Prof. Dr. Virasit Imtawil	Faculty of Engineering Khon Kaen University
Assoc. Prof. Sanguan Patamatamkul	Faculty of Engineering Khon Kaen University
Assoc. Prof. Dr. Sdhabhon Bhokha	Faculty of Engineering Ubon Ratchathani University
Assoc. Prof. Maetee Boonpichetvong	Faculty of Engineering, Khon Kaen University
Assoc. Prof. Dr. Tanyada Pannachet	Faculty of Engineering, Khon Kaen University
Assoc. Prof. Dr. Suwit Kiravittaya	Faculty of Engineering, Chulalongkorn University
Assoc. Prof. Dr. Athikom Roeksabutr	Faculty of Engineering, Mahanakorn University of Technology

Editorial Board

Assoc. Prof. Dr. Vo Ngoc Dieu	Ho Chi Minh City University of Technology Vietnam
Assoc. Prof. Dr. Koonlaya Kanokjaruvijit	Faculty of Engineering, Naresuan University
Assoc. Prof. Dr. Thawatchai Mayteevarunyoo	Faculty of Engineering, Naresuan University
Assoc. Prof. Dr. Suchart Yammen	Faculty of Engineering, Naresuan University
Assoc. Prof. Dr. Sombat Chuenchooklin	Faculty of Engineering, Naresuan University
Assoc. Prof. Dr. Samorn Hirunpraditkoon	Faculty of Engineering, Naresuan University
Assoc. Prof. Dr. Mathanee Sanguansermisri	Faculty of Engineering, Naresuan University
Assoc. Prof. Dr. Apichai Ritvirool	Faculty of Engineering, Naresuan University
Assoc. Prof. Dr. Pupong Pongcharoen	Faculty of Engineering, Naresuan University
Asst. Prof. Dr. Kaokanya Sudaprasert	Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi
Asst. Prof. Dr. Korakod Nusit	Faculty of Engineering, Naresuan University
Asst. Prof. Dr. Pajaree Thongsanit	Faculty of Engineering, Naresuan University
Asst. Prof. Dr. Supawan Ponpitakchai	Faculty of Engineering, Naresuan University
Asst. Prof. Dr. Somlak Wannarumon Kielarova	Faculty of Engineering, Naresuan University
Asst. Prof. Dr. Sasikorn Leungvichcharoen	Faculty of Engineering, Naresuan University
Asst. Prof. Dr. Ananchai U-kaew	Faculty of Engineering, Naresuan University
Dr. Ivan Lee	School of Information Technology and Mathematical Sciences University of South Australia
Dr. Sasidharan Sreedharan	University of Hawaii USA
Dr. Jirawadee Polprasert	Faculty of Engineering, Naresuan University
Dr. Tanikan Thongchai	Faculty of Engineering, Naresuan University
Dr. Narumon Seeponkai	Faculty of Engineering, Naresuan University
Dr. Salisa Veerapun	Faculty of Engineering, Naresuan University
Dr. Surapon Nathanael Charoensook	Faculty of Engineering, Naresuan University

Research Articles

The Application of Quality Function Deployment for Environment (QFDE) to Design Vertical Lifting Devices in the Healthcare Industry

Kittipong Sangbuddee, Kanitsorn Poonikom1

Offset Prediction of an Asymmetric Force Damper on Harmonic Base Excitation Isolation System

Sompon Wongtom, Nuttarut Panananda and Akerat Chanprasert.....11

Effects of Aeration and Quantity of Effective Microorganisms (EM) Balls for Water Quality Restoration

Yumatorn Mingmongkol, Khakhanang Ratananikom, Duangdao Channei, Auppatham Nakaruk, Wilawan Khanitchaidecha18

Demagnetization Fault Detection on BLDC by Adaptive Neuro Fuzzy Inference System

Kreangsuk Kraikitrat and Bunyarit Wangngon24

Applying Multidomain Matrix to Develop Communication Structure for Custom Home Design and Building Projects

Kusol Pimapunsri.....32

Development of Robotic Arm and Control System via Smartphone with Multi-Axis Linear Motion Control Techniques [in Thai]

Supap Mayang, Sumet Heamawatanachai.....42

Future Projections of Rainfall under Climate Change in the Eastern Economic Corridor [in Thai]

Polpech Samanmit, Jutitthep Vongphet, Ketvara Sittichok and Bancha Kwanyuen56

Factors and Performance of Material Carbonation Resistance to Concrete Case study : Nakhon Pathom Province [in Thai]

Banyut Warinlai and Pitisan Krammart68

The Application of Quality Function Deployment for Environment (QFDE) to Design Vertical Lifting Devices in the Healthcare Industry

Kittipong Sangbuddee* , Kanitsorn Poonikom

Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Ubon Ratchathani University, Thailand

* corresponding author e-mail: kittipong_sa1@hotmail.com

(Received: 22 February 2021, Revised: 29 June 2021, Accepted: 5 July 2021)

Abstract

This research aimed to design vertical lifting devices in the healthcare industry. The Quality Function Deployment for Environment (QFDE) was applied to design vertical lifting devices that can meet user needs. Regarding the methodology, the first step was to examine information about the users who are the staff at the blood component preparation department of the Blood Transfusion Centre in Srinagarind Hospital, Khon Kaen and to study the design of vertical lifting devices which have an appearance and a function that meet user needs in order to specify a sample group. Second, the researcher identified Voice of Customer (VOC) and drew up questionnaires to determine the importance ratings of user requirements. Moreover, the user needs and the importance ratings were analyzed by QFDE. This technique consisted of 2 matrixes: (1) Planning Matrix that translated user needs into technical specifications and (2) Part Deployment Matrix that translated technical specifications into technical goals which applied to design vertical lifting devices that fulfill user needs. The results of research indicated that the top five most important technical targets are qualified device controllers (18.54%), strong and non-slip wheels (18%), eco-friendly materials (16.05%), a flexible system (12.64%), and durability of parts (11.07%).

Keywords: Quality Function Deployment for Environment (QFDE), Vertical lifting devices, Voice of Customer (VOC)

1.Introduction

To perform roles in blood banks, it is essential for the staff to provide safe blood to patients. In addition, one of the factors affecting blood supplies is accurate and standard operating procedures since they improve the accuracy of the laboratory results and leads to compatible and safe blood for patients. Regarding the preparation of blood components, antigen – antibody reactions are essential to provide patients with safe blood because these interactions are a fundamental principle of red blood cell phenotyping. The blood component preparation consists of red blood cell phenotyping, compatibility testing, antibody screening, and antibody identification. Furthermore, transfusion medicine services relate to pediatric patients with Hemolytic Disease of the Newborn HDN, patients with transfusion reactions, and blood selection and preparation that are compatible and safe for patients. As a result, the staff should have practical training in performing tasks in blood banks together with understanding and interpreting laboratory results; these

skills are beneficial to undertake the blood component preparation and help patients losing blood due to injuries or surgical operations and suffering from diseases that make them need blood or blood component transfusions. As many scientists have not discovered a substitute for blood yet, peoples need to donate blood for one another. Therefore, the Blood Transfusion Centre of Srinagarind Hospital, Khon Kaen, has a main duty towards blood supply and donation in order to treat patients. Additionally, it also offers other medical services such as hematological analysis, treatment of bleeding, the clinical microscopy section, the immunology section, the microbiology section and the blood bank. Importantly, the services are based on an international and medical technology standard so as to provide test results accurately and quickly (Topanthanon, T., 2017).

The World Health Organization (WHO) offered guidance on blood supplies. That is, there should be enough safe blood and blood products for countries' requirements. In other words, each country should have

blood donation by around 2 - 4% of the population. In Thailand, a blood donation rate that meets Thai patients' needs is 3% of the population or about 1,950,000 units. Furthermore, blood donors should voluntarily donate their blood without expecting anything in return.

The Blood Transfusion Centre of Srinagarind Hospital, Khon Kaen, has set a clear objective of providing sufficient blood and blood components to patients in Northeastern Thailand according to the WHO standards in the adequate amount of blood for patients and the number of blood donation. Apart from the improvement in blood supply, technology should be enhanced to make the blood services in the countries safe and operate in the same standard. Similarly, the Blood Transfusion Centre standardized donor selection according to a national blood policy which begins by selecting blood donors from low-risk populations and screening blood donors. According to the WHO standard, all donated blood should be screened for syphilis, hepatitis B, hepatitis C, and HIV by using standard blood screening technology. From domestic and overseas research, it showed that the leading cause of work-related musculoskeletal injuries is manual lifting activities. Moreover, the report of the Health and Safety Executive (2008) pointed out that 104,301 employees had work-related musculoskeletal injuries. In this statistics, 2 in 5 employees, representing an injury rate of 301.7 cases per 100,000 employees, carried injuries resulting from lifting and took sick leave over 3 days. At the same time, the study of the Australian Bureau of Statistics indicated that lifting objects which accounted for 1 in 3 injured employees was the most common cause of workplace injuries. This result is in line with the report of the U.S. Bureau of Labor Statistics Speaking of Thailand, the annual report (Workmen's Compensation Fund) showed that the number of employees with heavy lifting injuries was 845 out of a total of 9,132,756 registered employees in the Workmen's Compensation Fund. In other words, there were 9.3 heavy lifting-related injuries per 100,000 employees. From the study of the National Institute for Occupational Safety and Health, Water et al. suggested that people should not lift an object heavier than 23 kilograms and should decrease the maximum weight to 4-5 kilograms if there are risk factors involved such as lifting height, distances between the front of a body and an object while lifting, body motions while lifting, frequency, duration, postures during the lift. However, the staff have to lift 12 blood bags weighing 12 kilograms into a centrifuge during the blood component preparation.

Additionally, the cumulative frequency of the lift is 300-500 times per day.

As a result, the researcher aims to examine the weight of a load that is suitable for the staff and make eco-friendly lifting devices. By doing so, the researcher designs vertical lifting devices used to lift blood bags vertically and assesses the maximum weight limit that doesn't damage the staff health while lifting. Moreover, this study suggests practical guidelines on manual lifting activities of employees in the healthcare industry.

2. Literature Review

Speaking of Quality Function Deployment for Environment QFDE, Arash A. (2009) state that it is a method of environmentally conscious design; this technique is adapted from Mohan, K. R., Lohit, H.S., Manas R. M., & Basheer, A.Md. (2012) shows that QFDE consists of four phases (See Figure 1). The principle of each phase can be summarized as follows:

phase I: customer requirements are collected and then translated into technical specifications. After that, the relative importance of the technical specifications is evaluated. For example, S. Sirisoonthorn (2010) deploy a rating score with a weighted score based on customer requirements. Second, the objective in the include;

Section A1 is on the left side of the quality house. It is the part that shows the needs of customers.

Section B1 or planning matrix is on the right side of the quality house. It gives visibility to the status of the product compared to competitors. or see the level of satisfaction that customers have with the product and service.

Phase II: is to determine the relative importance of part characteristics derived from the technical specifications in Phase I. In this stage, Shih, H.S. & Chen, S.H. (2013) use the rating scale to analyze the relative importance of each component of a product.

Phase III: focuses on developing approaches to design improvement.

Lastly, Phase IV is to select the practical Mohan, K. R., Lohit, H.S., Manas R. M., & Basheer, A.Md. (2012) approach by comparing environmental effects. applies an environmental effect analysis to study how each approach affects design improvement.

Hence, QFDE is a method of analyzing user requirements and applying them to design a device that can fulfill users' needs and function properly.

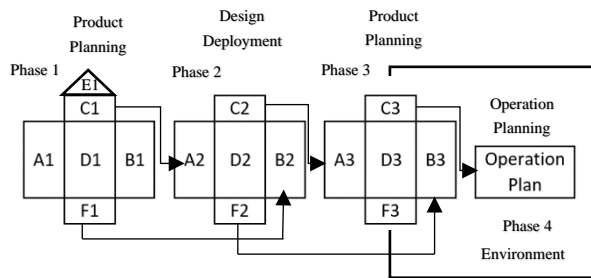


Figure 1 Correlation of the four phase QFD matrix

With the QFDE technique, the 2 matrixes were analyzed: the Planning Matrix and the Part Deployment Matrix. The relationship between these matrixes is demonstrated in Figure 2. (S. Sirisoonthorn, 2010)

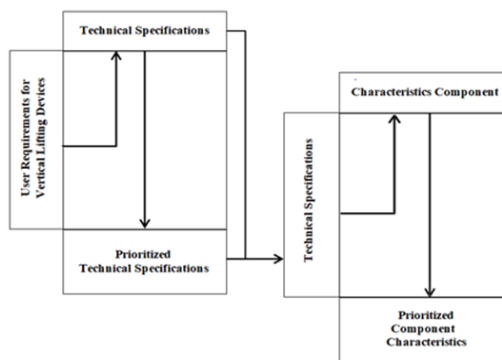


Figure 2. The Relationship between the Planning Matrix and the Part Deployment Matrix

Table 1 Roles of people involved in blood donation

Process	Doctor	Nurse	Blood Donor	Laboratory Staff
Blood Donation Centre (Internal/External)	Examining	Preparing equipment used in the blood collection process	Contacting staff	Preparing equipment used to store blood
Role	Coordinating with nurses/ staff	Drawing blood	Receiving service provided by nurses	Analyzing blood and Sending blood test results to doctors
History Taking	Determining whether donors can donate their blood	Receiving doctors' comments	Receiving doctors' comments	Doctors analyze blood test results.

3. Methodology

3.1 The Specifications for Designing Vertical Lifting Devices

Vertical lifting devices involve the path traveled that determines height and inclination measured from a horizontal line. The types of the path traveled are a horizontal path, a vertical path, an inclined path, a straight path, and a curved path. The QFDE technique were applied to design vertical lifting devices. Furthermore, the

external structure of the devices was made of ecofriendly materials and had the appearance which satisfied the needs of the users. In the centrifugation process, the devices met a technical standard of the Blood Component Preparation Section (Maguad A B., 2009).

The vertical lifting device users consisted of the staff at the Blood Component Preparation Section of the Blood Donation Room, the Blood Storage Laboratory, the Blood Screening Laboratory, the Tissue and Stem Cell Laboratory. This is because these staff directly contact blood. The roles of the staff involved in blood donation are shown in Table 1.

The dominant factor is that there are only 3 staff who have responsibility for the preparation of blood components. Moreover, they face with a problem about lifting a blood bag which weights at least 1 kilogram per bag. As one centrifuge can contain 12 blood bags, they have to lift around 12 kilograms per run. With an 8-hour workday, the average weight that the staff lift per day is 288 kilograms. Performing the manual lift increases risk of suffering from Musculoskeletal Disorders (MSDs) that cause injuries to hands, wrists, arms, shoulders, and especially low back which results from improper lifting techniques and repetitive lifting for a lengthy period.

The medical technologists together with the medical technician assistants analyzed the performance of the Blood Transfusion Centre of Srinagarind Hospital, Khon Kaen and found out that there was not enough staff to work against time and meet different requirements depending on patients' symptoms. In case of injuries, blood banks have to urgently send required blood to patients. On the other hand, if a required blood type is not available, blood banks have to ask for blood donation from general people or patients' family

members with the same blood type. Obviously, this is a crucial moment between life and death for patients. After collecting blood, the staff have to screen donated blood according to universal and medical technological standards so as to produce accurate blood test results. As a result, they are responsible for the preparation of blood components which can be divided into several steps as shown in Figure 3.

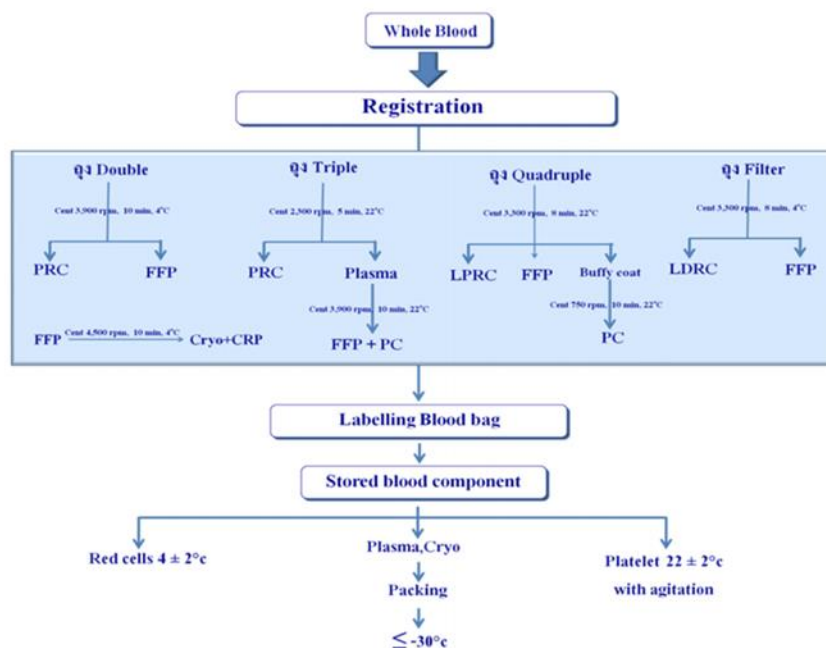


Figure 3 The Blood component preparation

Centrifuges are a device using a centrifugal motion of a sample substance or a motion in a centrifugal field to add a gravitational force to a suspension in a solution or to separate insoluble substances or sediment from a solution. Figure 4 indicates the staff using the centrifuge to separate blood components.

3.2 The Voice of Customer Survey

The researcher carried out in-depth interviews to collect data on the Voice of Customer (VOC). Moreover, the descriptive approach was deployed so that the interviewees could freely express their requirements for vertical lifting devices. After that, the researcher took notes of user requirements. In addition, the notes were analyzed and edited for clarity by the university teachers, the experts in vertical medical lifting devices, and the senior staff of the Blood Test Room in the Blood Transfusion Centre who have professional experience of the blood component preparation. The data was used to create the questionnaires on determining an importance

rating of each VOC item. After that, the questionnaire results were applied to QFDE (Joompha, W., & Pianthong, N. 2018).

VOC items were organized by an affinity diagram so that they could be easily applied to the questionnaires concerning importance ratings and the QFDE technique. After that, the questionnaires were

circulated to the vertical lifting device users in order to survey the attitudes of the users towards each VOC item. Furthermore, the Index of Item-Objective Congruence (IOC) was used to evaluate validity of the questionnaires. At the same time, the Cronbach's alpha or coefficient alpha was used to measure reliability of the questionnaires. In addition, a sample size also plays a role in reliability since the smallest sample size can ensure the reliability of the study. The use of the small sample size results in more errors than that of the large sample size. As a result, the study applied Yamane's formula to calculate the minimum possible sample size in order to ensure the reliability of the returned questionnaire. The formula for a sample size calculator is shown in Formula 1 (Joompha, W., & Pianthong, N. 2018).

$$n = \frac{N}{1 + Ne^2} \quad \text{Formula 1}$$

Where: n is the minimum possible sample size.

N is the population size.

e is the allowable error.



Figure 4 The staff using the centrifuge to separate blood components

3.3 The Analysis of User Requirements

3.3.1 *The analysis of the reliability* of the returned questionnaire is to consider the questionnaires that the users returned in order to assess the reliability of the attitude scale questionnaires via the Cronbach's alpha as shown in Formula 2 (Joompha, W., & Pianthong, N. 2018).

$$r_{tt} = \frac{k}{k-1} \left[1 - \frac{\sum s_i^2}{s_t^2} \right] \quad \text{Formula 2}$$

Where: r_{tt} is coefficient alpha.

k is the total number of questionnaires.

s_i^2 is the variance of a score of each item.

s_t^2 is the variance of the total scores.

The value of the reliability indicates the trend in the importance ratings derived from questionnaire responses. If the reliability is high, the margin of error for the questionnaire scores will be low. On the other hand, if there is low reliability, the margin of error for the questionnaire scores will be high.

3.3.2 The Analysis of Importance Ratings of User Requirements

A geometric mean was used to calculate importance ratings. This is because it is useful to be a central tendency when a data set does not have a zero and a value that is much higher than the others. A mean is most likely to approximate a central tendency when a data has positive values. The calculation of the geometric mean is demonstrated in Formula 3 (Joompha, W., & Pianthong, N. 2018).

$$IMO = \sqrt[n]{a_1 a_2 \dots a_n} \quad \text{Formula 3}$$

Where: a_i is the i^{th} term in the sequence ($i = 1, 2, \dots, n$)

n is the number of sample data

The calculation of the importance ratings was applied to all of the returned questionnaire. In addition,

the VOC items and the importance ratings were the input data for the QFDE technique.

The requirements of the users with the importance ratings were shown on the left of the Planning Matrix. The user needs were translated into the technical specifications which written in technical terms to describe attributes of the devices. The technical specifications extensively cover all requirements of users. In addition, one technical specification could be correlated with many needs of users. After that, the results of the first matrix were input into the Part Deployment Matrix. In so doing, the technical specifications were translated into the part characteristics which would be deployed to design the devices (Patil, Sh.S., Gopinath C. & Suresha, S. 2016).

By analyzing each matrix. or the House of Quality (HOQ) shown in Figure 5, it can be seen that the left side of the house is the list of the user requirements and the top is the technical specifications. In the middle of the house, it indicates the assessment of the relationships between the user requirements and the technical specifications. The symbols used to weigh the relationships are as followed: 9 refers to a strong relationship, 3 refers to a medium relationship (Sinthavalai, R. & Ruengrong, S. 2018).

The results from the analysis of the matrixes were divided into the technical specifications to satisfy user needs and the importance weight of each technical specification in order to indicate the extent to which the requirements were fulfilled according to the importance weights.

3.3.3 The Design of the Device

In this process, the part characteristics derived from the QFDE technique were deployed for the device design. 3D drawing program AutoCAD 2011 was used to create a virtual version of the device. After that, a prototype was produced.

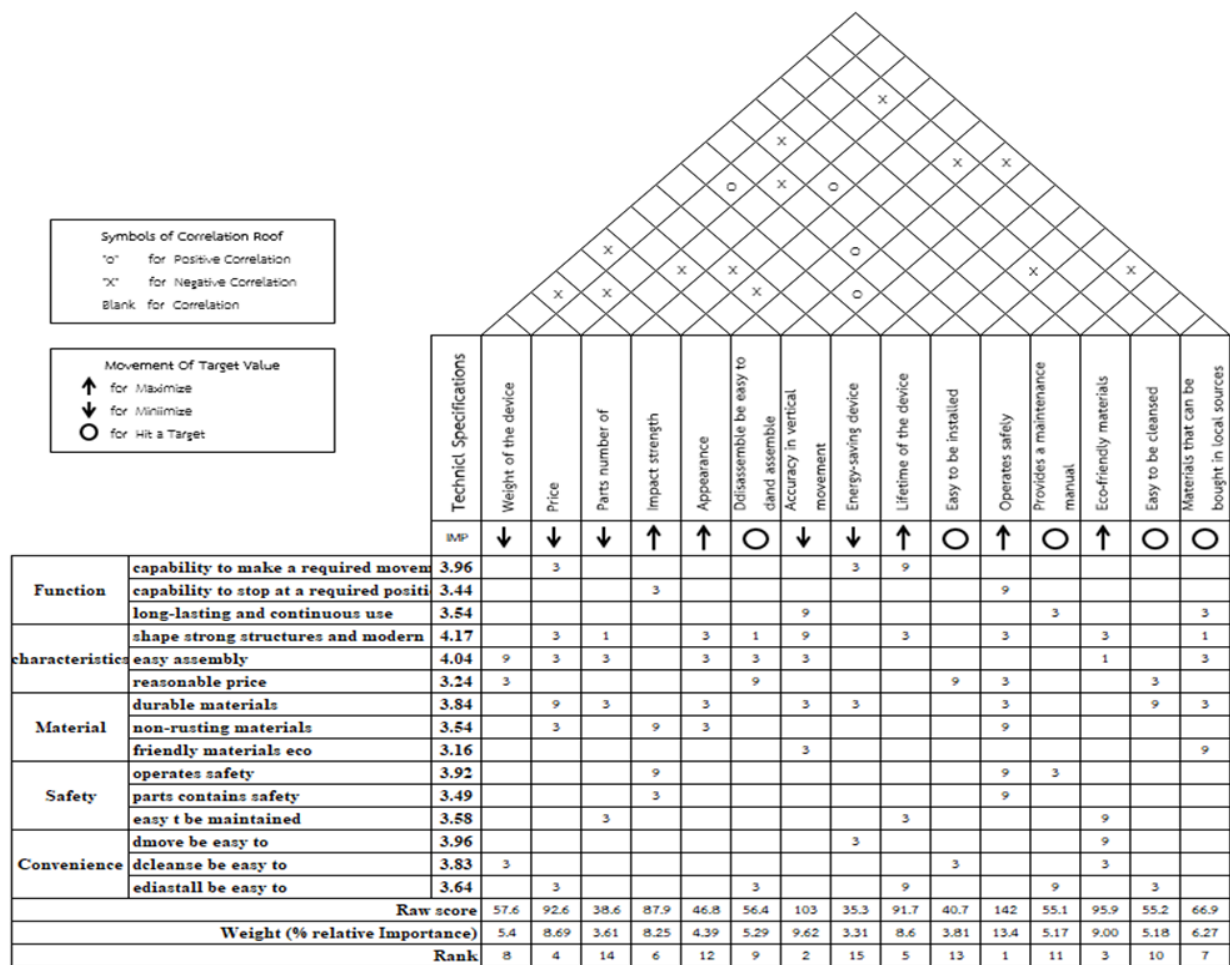


Figure 5 The Example of Matrixes Used for QFD

4. Results and Discussions

4.1 The Results of the Analysis of User Needs

The results from the analysis of user requirements seem to be the most crucial part of the study since it was used for the QFDE technique. The results are as follows:

4.1.1 The VOC from the device users

34 users working at 16 wards took part in the VOC survey. After that, the VOC items were interpreted and sorted to make a diagram representing the correlation of each item. The VOC items are shown in Figure 5.

After that, all of the user needs were used to create the questionnaires so as to find the importance ratings of each requirement. From the analysis of the questionnaires, it shows that the users can comprehend questions in the questionnaires. As a result, the researcher sent 337 questionnaires to the nurses, the nursing assistants, the staff, and the experts in medical equipment at the Blood Transfusion Centre.

After that, all of the user needs were used to create the questionnaires so as to find the importance ratings of each requirement. From the analysis of the questionnaires, it shows that the users can comprehend questions in the questionnaires. As a result, the researcher sent 337 questionnaires to the nurses, the nursing assistants, the staff, and the experts in medical equipment at the Blood Transfusion Centre.

From the result, it demonstrates that the number of the returned questionnaire has to be at least 183 in order to represent all samples at the Blood Transfusion Centre. In the study, 248 questionnaires were returned; this number is more than the minimum possible sample size.

According to the calculation of the sample size, it indicates that the minimum possible sample size is 183 from 337 device users. The margin of error amounts to 0.05. The calculation is shown in Formula 4 (Joompha, W., & Pianthong, N. 2018).

$$n = \frac{337}{1+337(0.05^2)} = 183 \quad \text{Formula 4}$$

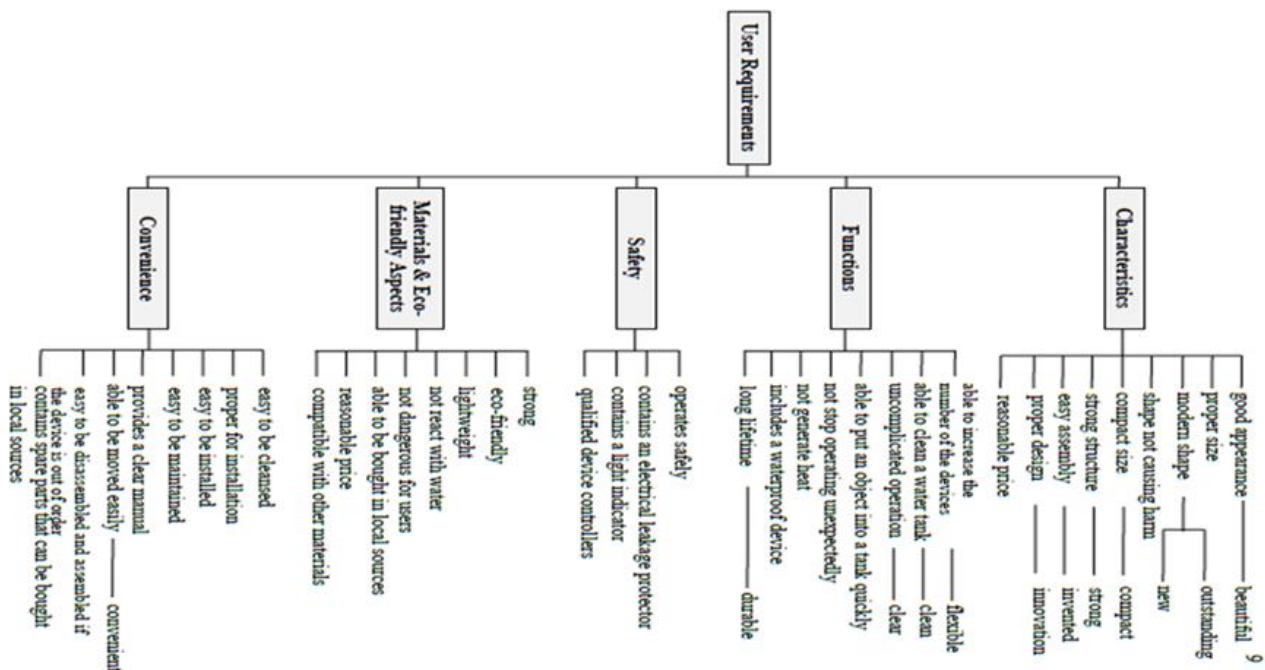


Figure 6 The Tree Diagram of the Device Specifications Based on User Needs

After that, the reliability of the returned questionnaire was calculated as shown in Formula 5 (Joompha, W., & Pianthong, N. 2018).

$$248 = \frac{337}{1+337(e)^2}; e = 183 \quad \text{Formula 5}$$

The result indicates that the reliability of the returned questionnaire is 0.968. Therefore, the data from these questionnaires can be used to measure the importance ratings. In addition, the margin of error is 0.032.

4.1.2 The Calculation Result of the Importance Ratings of User Needs

The data of the returned questionnaires was used to analyze the reliability via the Cronbach's alpha. From the calculation result, the reliability of the returned questionnaires is 0.957. This means that the margin of error is low. Therefore, this data was used to calculate the importance ratings based on the geometric mean. The result is shown in Figure 6. Furthermore, the user needs together with the importance ratings will be used to analyze the Planning Matrix of the QFDE technique.

4.2 The Results of the Application of QFDE

The result from the QFDE technique consists of 2 parts: The Planning Matrix and the Part Deployment Matrix.

4.2.1 The Analysis of the Planning Matrix

In this process, the researcher collaborated with the experts to identify the technical specifications that can meet user needs and to determine the direction of device design and ways to improve the device in the future. The result of the Planning Matrix is shown in Figure 7.

The weight of the technical specifications, called Raw Score, indicates how well the technical specifications fulfill user requirements. The researcher compared the weights of each technical specification to measure the importance weights. The calculation of the importance weights based on a comparison of "the length of the devices" is as follows (Ji, P., Jin, J., Wang, T. & Chen, Y. 2014).

The weights of the technical specifications (Raw Score) concerning "the length of the devices"

= Σ (a score of the relationship between the user needs and the technical specifications X the importance ratings)
The next step is to use the calculation results.

The relative importance weights of the technical specifications regarding “the length of the devices”

$$= (\text{Raw Score} / \text{Sum of the Raw Score}) \times 100\%$$

The calculation result shows that the technical specifications with the top 3 highest relative importance weights are a position of movement (18.54%), continuous operation (18%), and eco-friendly materials (16.05%), respectively. Furthermore, these relative importance weights will be applied to the Part Deployment Matrix. The analysis of the second matrix is carried out in the same way as that of the Planning Matrix.

Moreover, it indicates which part characteristics can fulfill the user needs the most or to what extent the part characteristics should be taken into account.

		<div><div>↑ ↕ ○</div><div>Movement Of Target Value for Maximize for Minimize for Hit a Target</div></div>												
		Part characteristics	Position itself precisely	Ddurability of parts	Able to operate for 8 hours	A size of a motor proper for movements	Non-rusting materials	A clear maintenance manual	Includes an on/off controller system	Includes the small number joints	A Qualified control system	Includes wheels for movements	Qualified circuit breakers	Includes an indicator light
		IMP	↑	↑	↑	↑	↑	○	↑	↓	↑	○	↑	○
Function	Cleanse a water tank thoroughly	17.86	9		3	1			1					
	Long lifetime	9.84		9			3				1			
characteristics	Price of the device	8.15	3		3		1						3	
	Strong	7.84		9			3							
	Cleanse a tank quickly	7.58	3		9	1			9					
Material	Resistant-corrosion	6.75		1			9							
	Friendly-eco	6.38					1	3						
	Provides a maintenance manual	6.27				1		3					3	
Safety	Target values	6.19			9				9					
	Qualified device controllers	5.02									9		1	
	Able to be moved easily	4.00										9		
Convenience	Electrical leakage protecor nincludes	3.90											3	
	Use durable materials	3.86		3			3				3			
	Ncludes an indicator light turning on white operating	3.73												9
	Not corrode easily	2.61		1			3							
Raw score		207.9	180.1	202	31.71	124.2	37.95	141.8	0	66.6	36	59.98	33.57	1121.76
Importance weight (% Relative)		18.54	16.05	18	2.83	11.07	3.38	12.64	0	5.94	3.21	5.35	2.99	100
Rank		1	3	2	11	5	8	4	12	6	9	7	10	
Target values		Qualified device controllers	Structures made from ecofriendly materials	Strong and non-slip wheels	A proper size of motor	Durability of parts	A clear maintenance manual	A flexible system	Uses the least number of knots and screws	A qualified control system	Includes a base to be moved easily	Includes a brake	Includes an indicayor light	

Figure 7 The Relationship Matrix of the Part Deployment Matrix

4.2.2 The Analysis of the Part Deployment Matrix

From the analysis of the Part Deployment Matrix in Figure 7 and the relative importance weights of part characteristics, it can be seen that the part characteristics with the top 3 highest relative importance weights are qualified device controllers (18.54), strong and non-slip wheels (18), and structures made from eco-friendly materials (16.05), respectively.

The analysis of the Part Deployment Matrix results in the part characteristics deployed for the design and the relative importance weights of the part characteristics.

4.3 The Design of the Device

The results of the device design are as follows

4.3.1 The Device Consists of 3 Main Components:

The device design is the implementation of the part specification obtained through QFDE analysis as a design data using a 3D design program in the virtual design of the device and defining materials for use in prototyping. Because this product is specialized, therefore, when designing materials that are environmentally friendly, it features light weight, rust resistance, strength and

requires minimal energy consumption. The researcher chose to use Aluminum as the main building which is a soft and light metal that does not have a lustrous appearance. Due to the thin layer of oxidation that occurs quickly when exposed to air, Aluminum metal is not toxic, not magnetic and not produce a spark. Pure aluminum has a tensile strength of approximately 49 million Pascals (MPa) and 400 MPa if it is alloyed. Aluminum has a density of 1/3 that of steel and soft copper is easily ductile.

It can be easily machined and molded. And has the ability to resist corrosion and durability to be a prototype device. in Figure 7.



Figure 9 The Operation Process Chart

Regarding the operation process in Figure 9, the Process Chart is used to describe the process since it is an essential tool for recording data thoroughly and concisely. Moreover, it consists of symbols, descriptions, and lines. Apart from expressing a production process in detail, this tool also helps an analyst fully comprehend every step in the production process and leads to the better work processes. In fact, the Process Chart can be divided into many charts; this research deployed the Flow Process Chart.



Figure 8 Parts of the Vertical Lifting Device

4.4 The Satisfactory Level of the Device

The questionnaires were sent to the users in order to survey their satisfaction with the prototype of the vertical lifting device. The result shows that the satisfactory level of 187 sample users is quite high as the satisfaction scores of all items reach over 6.5% such as good appearance (6.67%), comfortable (6.80%), not disturb users' work process (7.55%), safe (7.84%), able to be moved easily (7.51%), and structures made from ecofriendly materials (7.74%).

5. Conclusion

In the preparation of blood components which sometimes are specific to certain types of patients through a centrifuge, the staff have to lift blood bags manually. This task is a risk factor for Musculoskeletal Disorders (MSDs) that cause injuries to hands, wrists, arms, shoulders, and especially low back which results from improper lifting techniques and repetitive lifting for a long period. As a result, the researcher made the vertical lifting device that properly operates as a labor-saving device and fulfills user requirements. In the study, the data was gathered from the staff at the Blood Component Preparation Section, the scholars, and the experts before being analyzed to determine important factors in the device design. From the matrixes of QFDE, it indicates the top five most important technical targets, including qualified device controllers (18.54%), strong and non-slip wheels (18%), eco-friendly materials (16.05%), a flexible system (12.64%), and durability of parts (11.07%).

It is significant to design a device that is compatible with skill and experience of device users. In so doing, problems about using a device are reduced while user

satisfaction is increased. The application of QFDE to design the device used in the blood component preparation has an ultimate aim to fulfill user needs and perform the task correctly. Importantly, the user needs are the most crucial part and fundamental data of the study. The sample users are the staff at the Blood Component Preparation Section. Speaking of the VOC, it demonstrates that there are many kinds of user requirements. Therefore, all of the needs were sorted and then analyzed in collaboration with the experts in patient under investigation. After that, the researcher distributed the questionnaires so as to measure the importance ratings of each user requirement. Next, the user needs and the importance ratings were analyzed through the Planning Matrix and the Part Deployment Matrix, respectively. Moreover, the experts also took part in this analysis process. The results from QFDE indicate the aspects able to meet the user requirements. As a result, the part characteristics derived from QFDE were applied to determine the direction of the device design. In conclusion, the QFDE technique is beneficial to investigate user needs and identify design characteristics that comply with the requirements: both data can be used to develop the design in the future.

6. References

- Topanthanon, T., (2017). Department of Medical Service and THAILAND 4.0. M.D., Director-General of the Department of Medical Service.
- Arash A. (updated 2009 June 09). Quality Function Deployment: A Comprehensive Review.
<http://www.citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.95.9547&rep=rep1&type=pdf>
- Mohan, K. R., Lohit, H.S., Manas R. M., & Basheer, A.Md. (2012). Design of Multipurpose Wheel Chair for Physically Challenged and Elder People. *SASTech Journal*, 11(1), 107-117.
- Cohen, L. (1995), Quality Function Deployment How to Make QFD Work for You, Addison-Wesley Publishing Company., USA., pp.11-15,140-141
- S. Sirisoonthorn, "Manufacture and sale of industrial ceramics," *Ceramics Journal*, vol.35, no.14,pp.44-48, 2010, (in Thai).
- Shih, H.S. & Chen, S.H. (2013). A Conceptual Design of a Mobile Healthcare Device-An Application of Three-stage QFD with ANP and TRIZ. *International Journal of Operations Research*, 10(2), 80-91.
- Mohan, K. R., Lohit, H.S., Manas R. M., & Basheer, A.Md. (2012). Design of Multipurpose Wheel Chair for Physically Challenged and Elder People. *SASTech Journal*, 11(1), 107-117.
- Maguad A B. Using QFDE to integrate the voice of the customer into the academic planning process. *Proceedings of ASBBS*. 2009; 16(1).
- Cohen L. Quality Function Deployment How to Make QFDE Work for You Handbook. Canada: Engineering Process Improvement Series. 1995.
- Joompha, W., & Pianthong, N. (2018). Development of Durian Chips Product by Apply of Quality Function Deployment. *Journal of Science & Technology*, Ubon Ratchathani University, 20(3), 204-218.
- Sinthavalai, R. & Ruengrong, S. (2018). An Application of House of Quality (HOQ) for Designing Rice Product as a Souvenir. *Naresuan University Journal: Science and Technology*, 26(3), 36-51.
- Patil, Sh.S., Gopinath C. & Suresha, S. (2016). Design and Development of an Automated Pottery Wheel for MSME. *MSRUAS-SASTech Journal*, 15(1), 21-24.
- Ji, P., Jin, J., Wang, T. & Chen, Y. (2014). Quantification and Integration of Kano's Model Into QFD for Optimizing Product Design. *International Journal of Production Research*, 52(21), 6335-6348.
- Cohen, L., 1995, Quality Function Deployment: How to Make QFD Work for You, Addison-Wesley Publishing, Massachusetts, 368 p.

7. Biographies



MR.kittipong sangbuddee
Department of Industrial
Engineering, Faculty of
Engineering, Ubon
Ratchathani
University, Thailand



Assist.Professor Dr.
Kanisorn Phunikom
Department of Industrial
Engineering, Faculty of
Engineering, Ubon
Ratchathani
University, Thailand

Offset Prediction of an Asymmetric Force Damper on Harmonic Base Excitation Isolation System

Sompon Wongtom*, Nuttarut Panananda and Akerat Chanprasert

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering
Rajamangala University of Technology Lanna, Chiang-Mai, Thailand, 50300
* corresponding author e-mail: ww_sompon@hotmail.com

(Received: 5 October 2020, Revised: 21 May 2021, Accepted: 30 July 2021)

Abstract

An asymmetric force damper, commonly known as a dual-rate shock absorber, is basically designed to improve ride-comfort quality of the vehicles. The damping forces for extension and compression direction are not equal. In general, the damping force for compression is much less than that for extension. This is to absorb immediate shock caused by road input during the compression stroke and to prevent the car body or isolated mass from oscillating during the extension stroke. However, the asymmetric force damper can be found in the application of the harmonic base excitation isolation systems. This is because the damper can be easily found commercially. Such the applications, the isolated mass will be shifted and oscillating about a new equilibrium position. This occurrence may cause failure to other connected component due to misalignment. This study focuses on seeking simply analytical method in order to predict the level of offset resulting from the difference of damping forces. The analytically predicted offset is compared to the that obtained using numerical simulation. The results are all in good agreement. It found that the greater in the difference of damping force as well as the higher excitation frequency cause the greater level of offset. This information can be used prior the decision in using the automotive shock absorber in the harmonically base excited vibration isolation.

Keywords: Asymmetric force damper, Offset prediction, Base excitation isolation

1. INTRODUCTION

The passive hydraulic type automotive shock absorber can be found as a part of automotive vehicle suspension system. The shock absorber connects the sprung mass to the unsprung mass. The sprung mass includes masses above the suspension whereas the unsprung mass refers to masses below the suspension as shown in Fig. 1. The suspension system is expected to provide good ride-comfort performance. By means of comfort quality, the main function of the suspension system is to isolate the sprung mass from vibration or forces caused by the unsprung mass. Ideally, the shock absorber should transmit no force to the sprung mass during the compression stroke or no resistant force by the

shock absorber. This is to prevent the sprung mass from the exciting force. In contrast, for the ride quality, the shock absorber should against or slow down the motion of the sprung mass during the extension stroke. This is to prevent the sprung mass from oscillating.

These requirements result in the hydraulic type shock absorbers for the automotive vehicles working in two stages, compression and extension. These two stages provide different damping force which achieved by using different sizes of valve as the structure of shock absorber shown in Fig. 2 as described in Dixon (2007). These

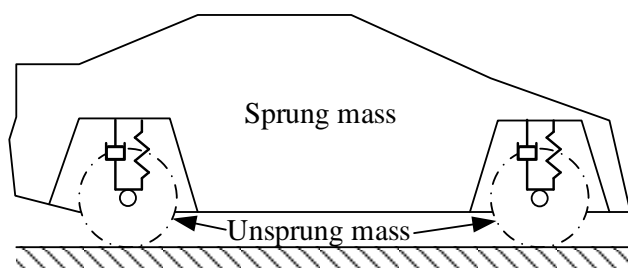


Fig. 1. Half car model with sprung mass and unsprung mass.

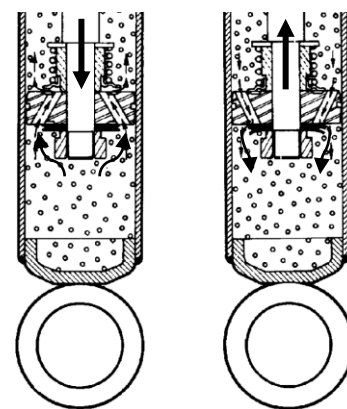


Fig. 2. Valves during compression (left) and extension (right).

valves are located in the piston. During the compression stroke, these valves should allow greater volume of fluid in the cylinder to flow than that during in the extension stroke. This characteristic is known as the asymmetric force damper.

There are numbers of publications presenting the test results of the asymmetric force damper. For example, Wallaschek (1990) employed a standard twin-tube shock absorber of Ford Sierra for the test. Single frequency between 1 – 10 Hz and range of velocities from 0 – 500 mm/s were applied. The force-velocity characteristic is as shown in Fig. 3 (a).

Surace et al. (1992) also tested shock absorbers of FIAT using single frequency harmonic excitation. The force-velocity of these shock absorber appeared similar to that published in Wallaschek (1990) as shown in Fig. 3 (b). The characteristic can be considered as bilinear damping with high damping for extension and low damping for compression.

Furthermore, in many publications such as the studies of Wallaschek (1990), Rajalingham and Rakheja (2003), Calvo et al. (2009), Mahumud (2003) and Wang et al. (2007),

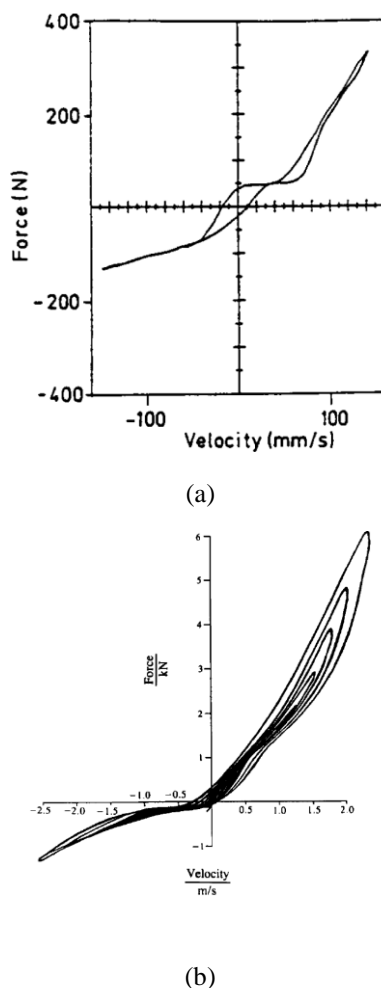


Fig. 3. Asymmetric damping force-velocity characteristic

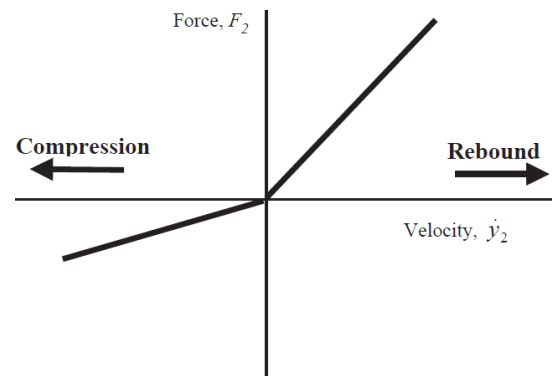


Fig. 4. Asymmetric damping force-velocity characteristic

the characteristic of automotive shock absorber has been simplified. One of considerations is simplify as an asymmetric linear piece-wise force-velocity characteristic as shown in Fig. 4. The graph shows that the damping force during the extension stroke is higher than that during the compression stroke. This characteristic of the automotive shock absorber is found to improve the ride comfort of the automotive vehicle.

In addition to the passive asymmetric characteristic of the automotive shock absorber, there are also publications which extend to the possibility to control the response of the damper to be asymmetric or the so-called in the paper as the dual-rate damping. For example, Verros et al. (2000), deliberately applied semiactive system to switch the damping coefficient between two values for a quarter car model under the harmonic motion. So that for the automotive shock absorber, the characteristic needs to be asymmetric.

As the automotive shock absorber can be easily found in the market. In some situations, the asymmetric force automotive shock absorber may be used in the suspension system to support the power plant engine. Such the system operates at the constant speed. As such, the force acting on the shock absorber is harmonic or periodic-like. Once the shock absorber generates the offset, it may cause damages due to occurrence of misalignment. Thus using the automotive shock absorber or the so called asymmetric force damper as the damping component for other isolating system is tricky. So that, the level of the offset should be pre-defined if it is acceptable for the system.

There are numbers of publications found that using the asymmetric force damper under the harmonic base excitation causes the isolated mass or the system mass to be shifted to the new position, for example in Rajalingham and Rakheja (2003). As the author concerns, determining the level of offset of the isolated mass for the isolation system that uses the automotive shock absorber is interesting. The report on the prediction in the offset level have not been found. Thus, in this paper, the method to predict the level of offset is proposed in the comparison to the results obtained from numerical simulation.

2. MATHEMATICAL MODELLING

2.1 Linear Damping System Configuration

In this paper, the asymmetric force damper is assumed to be applied in the base excited vibration isolation system other than the automotive vehicle suspension system. The model used in this paper is as shown in Fig. 5. The model consists of an isolated mass (m), a linear stiffness (k), an asymmetric force damper (c) and an excitation base (x_0).

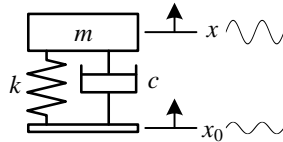


Fig. 5. Single Degree of Freedom base excited vibration isolator

Once harmonically base excitation, $x_0 = X_0 \sin(\omega t)$, is applied, motion of the isolated mass by means of displacement can be represent by $x = X \sin(\omega t + \phi)$.

The input displacement normalisation is applied for more convenient explanation. So the application yields $w = \frac{x}{x_0}$ and $w_0 = \frac{x_0}{x_0}$ with X_0 an amplitude of base excitation. The commonly known definitions of mass normalised parameters for vibration system are also applied, $\frac{c}{m} = 2\zeta\omega_n$ and $\frac{k}{m} = \omega_n^2$. The input displacement normalised equation of motion for the mass can be written as

$$w'' + 2\zeta\omega_n w' + \omega_n^2 w = 2\zeta\omega_n w_0' + \omega_n^2 w_0 \quad (1)$$

For harmonic excitation, the normalised motions are $w = W \sin(\omega t + \phi)$ and $w_0 = \sin(\omega t)$ with W a normalized amplitude of the mass. For some more convenience, the ratio between the excitation frequency and the natural frequency is defined, i.e. $\Omega = \omega/\omega_n$. The non-dimensional time is also defined as $\tau = \omega_n t$. Substitution of normalised motions, division of ω_n^2 , frequency ratio and the non-dimensional time leads Eq. (1) to become

$$(1 - \Omega^2)W \sin(\Omega\tau + \phi) + 2\zeta\Omega W \cos(\Omega\tau + \phi) = 2\zeta\Omega \cos(\Omega\tau) + \sin(\Omega\tau) \quad (2)$$

In addition, equation (1) can be considered by means of relative motion, which is the difference of amplitude of motion between the isolating mass and the base excitation, i.e., $u = w - w_0$. This leads Eq. (1) to become

$$u'' + 2\zeta\omega_n u' + \omega_n^2 u = -w_0'' \quad (3)$$

By considering the harmonic response, the relative motion can be expressed as $u = U \sin(\omega t + \phi_u)$.

The assumption of harmonic response yields the closed form solution for Eq. (3) as

$$U = \frac{\Omega^2}{\sqrt{(1-\Omega^2)^2 + (2\zeta\Omega)^2}} \quad (4)$$

For the linear system, the exact solution for Eq. (3) can be found in general. The closed form solution of Eq. (3) is shown in Eq. (4). For this occasion, the value of damping ratio is assumed to be underdamped, i.e., $0 < \zeta < 1$.

Eq. (4) can be used to predict the amplitude response of the linearly underdamped vibrating system for three regions of excitation frequency.

For the very low that the frequency ratio is very much less than unity, $\Omega \ll 1$, amplitude of the relative motion in Eq. (4) can be estimated as zero, $U \approx 0$. This means that the isolating mass is moving in unison with the base excitation.

When the excitation frequency is close to the natural frequency of the system, $\Omega \approx 1$, amplitude of the relative motion is about the inverse of two time the value of damping ratio, $U = \frac{1}{2\zeta}$.

Once the excitation frequency is much higher than the natural frequency, $1 \ll \Omega$, amplitude of the relative motion becomes frequency dependence. The greater the excitation frequency results in the greater amplitude of the relative motion. This refers to the isolation region. Vibrating amplitude of the isolating mass is much less than that of the base excitation.

However, Eq.(4) does not inform effect of damper with asymmetric force. So that, for the asymmetric force damper, the solution needs to be extract in two parts for compression and extension strokes of the damper.

2.2 Asymmetric force damper configuration

The value of damping ratio for the asymmetric force damper can be considered two different linear damping ratios, i.e., compression and extension. These two values are given by means of the ratio as

$$\zeta_c = n\zeta_e \quad (5)$$

where ζ_c and ζ_e are damping ratios for compression and extension, respectively. n is the different percentage of the damping ratios, $0 \leq n \leq 1$. The definition in Eq. (5) becomes zero when there is no damping force during compression stroke. For $n = 1$, the damper becomes classical linear damping case.

3. NUMERICAL SIMULATION

In order to see the effects of the asymmetric force damper for the harmonic excitation, numerical simulation was implemented using governing equation shown in Eq. (1). The Scilab/Xcos with RK45 solver was applied

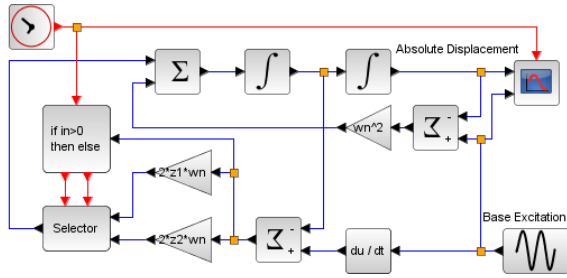


Fig. 6. Simulation model applied in Scilab/Xcos

to obtain the numerical solutions. The simulation model is as shown in Fig. 6.

The values of damping between the compression and extension strokes were chosen dependently upon the direction of relative velocity across the damper. The sign of relative velocity indicates the motion of the damper, i.e., positive sign refers to extension and negative sign refers to compression.

The value of damping ratio for the extension stroke was set as constant with the value of $\zeta_e = 0.1$. This is to see the effects of varying damping ratio for the compression stroke. The simulation results obtained from using $\zeta_e = 0.1$ with $n = 0$ and 0.5 are shown an example in Fig. 7.

It is seen from Fig. 7 that, the greater the difference in damping ratio results in the greater level of the offset. This implies that the isolated mass is oscillating in the lower level than its equilibrium position. Occurrence of offset can be detrimental to the connecting equipment, such as, bending to the connect shaft etc.

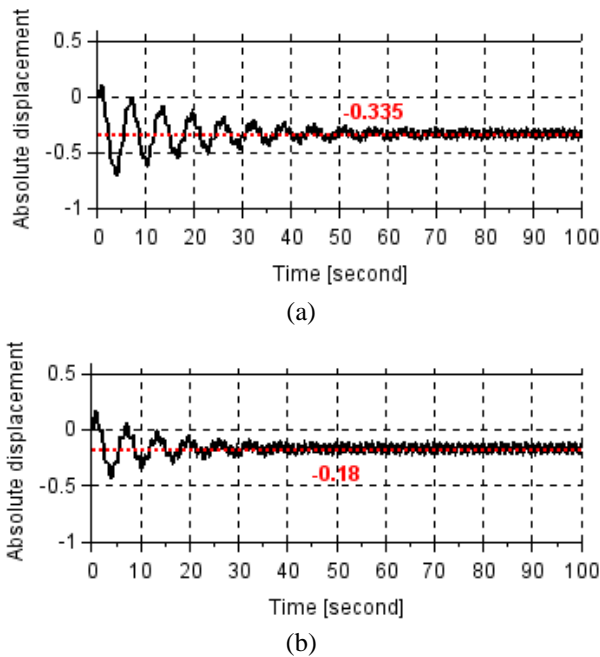


Fig. 7. Numerical responses for $\zeta_e = 0.1$ with $n = 0$ (a) and 0.5 (b)

4. PREDICTION OF THE OFFSET

The level of offset, caused by the different values of damping ratio during compression and extension strokes, can be predicted by considering the offset to be a new equilibrium position of the mass. Then assume that, at this position, the summation of forces acting on the isolated mass equals to zero, i.e.,

$$\Sigma F = F_s + F_d = 0 \quad (6)$$

where F_s is stiffness force and F_d is the difference of damping force. F_d is considered in two difference circumstances, i.e., damping forces during extension stroke, F_{de} , and compression stroke, F_{dc} . Thus, F_d can be defined as

$$F_d = F_{de} - F_{dc} \quad (7)$$

The levels of F_{de} and F_{dc} are respectively determined by

$$F_{de} = 2\zeta_e\Omega U_e \quad (8)$$

and

$$F_{dc} = 2\zeta_c\Omega U_c = 2n\zeta_e\Omega U_c \quad (9)$$

The definitions in Eqs. (8) and (9) lead Eq. (7) to become

$$F_d = 2\zeta_e\Omega(U_e - U_c) \quad (10)$$

where U_e and U_c are the normalized relative motion of the relative motion during extension and compression strokes, respectively.

By considering the force normalised term, stiffness force, F_s , Eq. (6) can be reduced to absolute displacement, W . Thus the resulting expression can be used to determine the absolute displacement of the isolated mass in conjunction with the application of Eq. (10), i.e.,

$$W = 2\zeta_e\Omega(nU_c - U_e) \quad (11)$$

However, this force is acting on the mass only a half of cycle. Then Eq. (11) is reformed to

$$W = \frac{2\zeta_e\Omega(nU_c - U_e)}{\pi} \quad (12)$$

Equation (12) can then be used to predict the level of offset by means of the normalised absolute position of the sprung mass.

5. COMPARISON AND DISCUSSIONS

5.1 Comparison

Two types of results are compared, i.e., numerical results obtained from numerical simulation (ODE) and analytical results obtained from calculation using Eq. (12). Two values of damping ratio for the extension

Table 1 Comparison of numerical simulation and prediction for $\zeta_e = 0.1$

Ω	$n = 0$		$n = 0.1$		$n = 0.25$		$n = 0.5$		$n = 0.75$	
	ODE	Predict	ODE	Predict	ODE	Predict	ODE	Predict	ODE	Predict
0.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.3	-0.0018	-0.0019	-0.0016	-0.0017	-0.0013	-0.0014	-0.001	-0.001	0	0
0.5	-0.011	-0.011	-0.01	-0.009	-0.008	-0.008	-0.005	-0.005	-0.003	-0.003
1.0	-0.631	∞	-0.516	0	-0.378	0	-0.211	0	-0.091	0
1.5	-0.169	-0.167	-0.153	-0.150	-0.127	-0.124	-0.084	-0.082	-0.042	-0.040
5.0	-0.335	-0.331	-0.296	-0.298	-0.246	-0.248	-0.180	-0.166	-0.083	-0.083
10	-0.642	-0.643	-0.577	-0.578	-0.452	-0.482	-0.319	-0.321	-0.160	-0.161

Table 2 Comparison of numerical simulation and prediction for $\zeta_e = 0.3$

Ω	$n = 0$		$n = 0.1$		$n = 0.25$		$n = 0.5$		$n = 0.75$	
	ODE	Predict	ODE	Predict	ODE	Predict	ODE	Predict	ODE	Predict
0.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.3	-0.0053	-0.0056	-0.0048	-0.0050	-0.0039	-0.0041	-0.0026	-0.0027	-0.0013	-0.0014
0.5	-0.033	-0.029	-0.029	-0.026	-0.024	-0.021	-0.016	-0.014	-0.008	-0.007
1.0	-0.637	∞	-0.522	0	-0.383	0	-0.214	0	-0.091	0
1.5	-0.478	-0.418	-0.425	-0.367	-0.349	-0.292	-0.226	-0.176	-0.109	-0.078
5.0	-0.969	-0.987	-0.874	-0.887	-0.727	-0.738	-0.481	-0.491	-0.244	-0.244
10	-1.926	-1.926	-1.732	-1.733	-1.442	-1.443	-0.959	-0.961	-0.481	-0.480

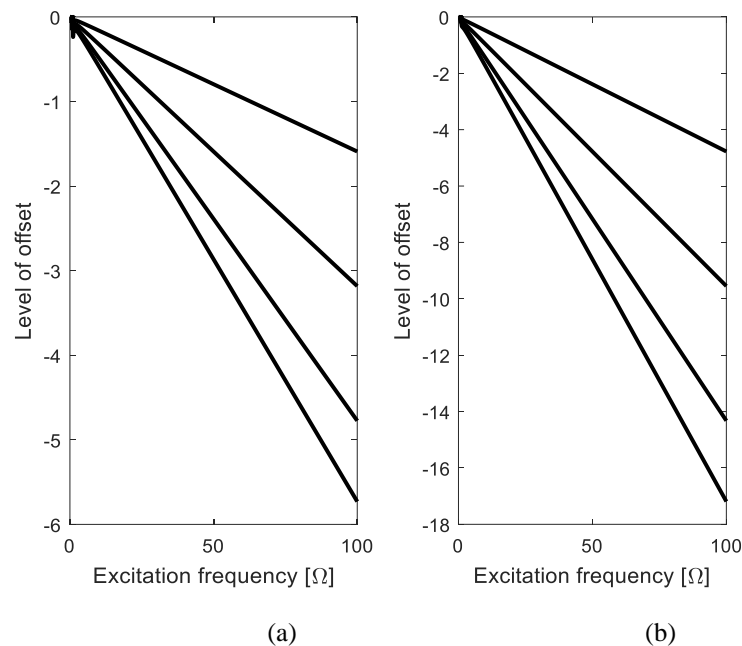


Fig. 9. Effects of excitation frequency to the offset
(a) $\zeta_e = 0.1$ and (b) $\zeta_e = 0.3$

stroke were applied, i.e., $\zeta_e = 0.1$ and 0.3 . The value of damping ratio for the compression stroke, ζ_c , is varied for $n = 0, 0.1, 0.25, 0.5$ and 0.75 .

The offset level for the numerical results are calculated from the mean value of the time response. That for the prediction are calculated using Eq. (12) by means of relative displacements, U_e and U_c , calculated from (4) for the value of damping aforementioned. The comparisons

for $\Omega = 0.1, 0.3, 0.5, 1.0, 1.5, 5.0$, and 10.0 are listed in Table 1 and Table 2 for $\zeta_e = 0.1$ and 0.3 , respectively.

The levels of offset calculated from numerical results and analytical prediction are similar with the difference of around 5% in total. However, the levels of offset for $\Omega = 0.1$ are seen to be zero. This occurrence can be described as it is very low excitation frequency, compared to the natural frequency, the response can be said as quasi

static. In other words, the isolated mass is moving in unison with the base excitation

For that at $\Omega = 1$, the prediction could not perform due to the resonance phenomenon. The relative displacement for both U_e and U_c are very similar. As a result, the level of offset could not be predicted. Thus, the data for $\Omega = 0.1$ and 1 will be omitted and will not be discussed in detail using analytical prediction.

5.2 Discussions

In this section, the reader may be reminded that this study focuses on proposing the possible approach in determining level of offset causing from the asymmetric characteristic of the automotive shock absorber. The analytical results are compared to the numerical results listed in Table 1 and Table 2.

The predicted data listed in Table 1 and Table 2 are reproduced to increase number of data and plotted in Fig. 8. It shows that the difference in the value of damping ratio affects the level of offset. By considering the excitation frequency $\Omega = 5$, for example, it is seen that greater the difference causes the greater level of offset. When the value of n is getting closer to that of ζ_e , the offset tends towards zero and becomes zero when $\zeta_c = \zeta_e$ regardless the excitation frequency.

This information also reveals the effect of excitation frequency when the asymmetric force damper is applied. The higher excitation frequency also results in the greater level of offset as also shown in Fig. 9. The level of offset appears to change linearly proportional to the excitation frequency. The maximum level of offset at $\Omega = 5$ for $\zeta_e = 0.3$, is seen to be about 3 times greater than that for $\zeta_e = 0.1$. Therefore, from the predicted data, the level of

offset caused from using the asymmetric force damper can be estimate.

6. CONCLUSIONS

The effects of asymmetric force damper, normally used in the automotive vehicle suspension, is examined when used in the base excited vibration isolation. The number of publications and numerical results reveal the level of offset occurred for the harmonic excitation. This causes the isolated mass to be oscillating around the new equilibrium position. The level of offset is found to change when the ratio of value of damping ratio for compression and extension stroke changes. The level of offset, however, can be predicted by equating the forces acting on the isolated mass. The method provides similar level of offset to that obtained from numerical simulation which reveals the effects of the asymmetric force damper. The level of offset is found to be affected by the difference of damping ratio during compression and extension as well as the excitation frequency. The obtained information can be very useful to understand and prevent the mechanical system connected to the base excited vibration isolation having the asymmetric force damper.

7. REFERENCES

- Calvo, J. A., López-Boada, B., Román, J. L. S., and Gauchía, A., (2009), Influence of a shock absorber model on vehicle dynamic simulation, *Part D: Journal of Automobile Engineering*, 223(2), 189-203. <https://doi.org/10.1243/09544070JAUTO990>
- Dixon, J. C., (2007), *The Shock Absorber Handbook* (2nd ed), John Wiley & Sons Ltd, England. <https://doi.org/10.1002/9780470516430>
- Mahumud Niroopam Joarder, (2003), *Influence of nonlinear asymmetric suspension properties on the ride characteristics of road vehicle*, Master Thesis, Department of Mechanical and Industrial Engineering, Concordia University, Montreal, Quebec, Canada. <https://spectrum.library.concordia.ca/1935/1/MQ77979.pdf>
- Rajalingham, C., and Rakheja, S., (2003), Influence of suspension damper asymmetry on vehicle vibration response to ground excitation, *Journal of Sound and Vibration*, 266(5), 1117-1129. [https://doi.org/10.1016/S0022-460X\(03\)00054-3](https://doi.org/10.1016/S0022-460X(03)00054-3)
- Surace, C., Worden, K., and Tomlinson, G. R., (1992), On the Non-Linear Characteristics of Automotive Shock Absorbers, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 206(1), 3-16. https://doi.org/10.1243/PIME_PROC_1992_206_156_02

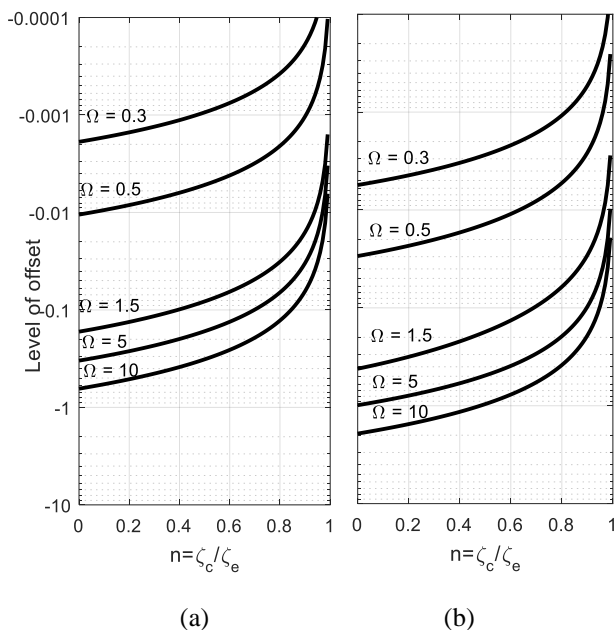


Fig. 8. Effects of difference between damping ratios to the offset (a) $\zeta_e = 0.1$ and (b) $\zeta_e = 0.3$

- Verros, G., Natsiavas, S. and Stepan, G., (2000), Control and dynamics of quarter-car models with dual-rate damping, *Journal of Vibration and Control*, 6(7), 1045-1063. <https://doi.org/10.1177/107754630000600706>
- Wallaschek, J., (1990), Dynamics of non-linear automobile shock-absorbers, *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 25(2), 299-308. [https://doi.org/10.1016/0020-7462\(90\)90059-I](https://doi.org/10.1016/0020-7462(90)90059-I)
- Wang, E., Wang, W., Wang, H., Rakheja, S., and Su, C. (2007). Characterization and modeling of symmetric and asymmetric damping properties of a magnetorheological damper, *Proceedings of the 7th International Conference on Simulation, Modelling and Optimization*, Beijing, China, 15 – 17 September 2007. <http://www.wseas.us/e-library/conferences/2007beijing/papers/554-178.pdf>

8. BIOGRAPHIES



Sompon Wongtom is a lecturer in Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna. He received B.Eng in Mechanical Engineering from Rajamangala Institute of Technology Thanyaburi. He currently hold a M.Eng in Energy form Chiang Mai University.



Asst. Prof. Nuttarut Panananda is a lecturer in Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna. He graduated M.Eng in Mechanical Engineering from King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok. He currently holds a Ph.D. in Sound and Vibration awarded by the Institute of Sound and Vibration Research (ISVR), University of Southampton, UK.



Akerat Chanprasert is a lecturer in Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna. He graduated both B.Eng and M.Eng in Mechanical Engineering from Rajamangala University of Technology Lanna.

Effects of Aeration and Quantity of Effective Microorganisms (EM) Balls for Water Quality Restoration

Yumatorn Mingmongkol^{1,2}, Khakhanang Ratananikom³, Duangdao Channei⁴,
Auppatham Nakaruk⁵, Wilawan Khanitchaidecha^{1,2,*}

¹Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Naresuan University,
Phitsanulok, Thailand

²Centre of Excellence for Innovation and Technology for Water Treatment,
Faculty of Engineering, Naresuan University, Phitsanulok, Thailand

³Department of Science and Mathematics, Faculty of Science and Health Technology,
Kalasin University, Kalasin, Thailand

⁴Department of Chemistry, Faculty of Science, Naresuan University, Phitsanulok, Thailand

⁵Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Naresuan University, Phitsanulok, Thailand

* Corresponding E-mail: wilawank1@gmail.com

(Received: 11 May 2021, Revised: 19 July 2021, Accepted: 7 September 2021)

Abstract

The simple and low cost water treatment of effective microorganisms (EM) technology was applied for water quality restoration; $\text{NH}_4\text{-N}$ and carbon content removal. The EM balls were prepared from EM stock, molasses and dried bran. The 30-L opened reactors were operated under different air supplies (namely no aeration and aeration reactors) and quantity of EM balls (namely 1EM, 2EM and 3EM reactors). The results revealed that the aeration benefited to rapid pollutants reduction due to the increasing microorganisms activity under sufficient dissolved oxygen concentration. The concentration of $\text{NH}_4\text{-N}$ and COD in the aeration reactor was notably lower than that in the no aeration reactor during the experimental period. The aeration reactor achieved 83% for total nitrogen removal and 80% for COD removal after 17 days. On the other hand, the lower total nitrogen and COD removals of 77% and 60% respectively was observed in the no aeration reactor. In the meanwhile, the quantity of EM balls had significant impacts on the pollutants removal, because the number of effective microorganisms were dependent on quantity of EM balls. The best performance was observed in 2EM reactor, and followed by 1EM reactor and 3EM reactor respectively. This was because the excessive EM balls led to very high $\text{NH}_4\text{-N}$ and COD releasing from substrates decomposition. According to this study, the DO should be maintained around 6 mg/L and the optimal quantity of EM balls was two for achieving the efficient $\text{NH}_4\text{-N}$ and COD removals with a high $\text{NH}_4\text{-N}$ removal rate.

Keywords: Effective microorganisms technology, EM balls, Water quality, $\text{NH}_4\text{-N}$ removal, Carbon content removal

1. INTRODUCTION

The effective microorganisms (EM) technology was developed during the 1970's by Professor Teruo Higa at the university of Ryukyus in Okinawa, Japan. The EM are multi-culture of aerobic and anaerobic beneficial microorganisms, which is capable to decompose organic matter by converting it to carbon dioxide (CO_2), methane (CH_4) or use it for growth and reproduction. The main species include lactic acid bacteria (i.e., *Lactobacillus casei*), photosynthetic bacteria (i.e., *Rhodospseudomonas palustris*), yeasts (i.e., *Saccharomyces cerevisiae*, *Candida utilis*), actinomycetes (i.e., *Streptomyces albus*) and fermenting fungi (i.e., *Aspergillus oryzae*, *Mucor hiemalis*) (Victoria & Mahaeswari, 2016). Recently, the EM technology has been widely used in developing countries for enhancing sewage and wastewater treatment (Boruszko, 2017; Lananan et al., 2014), increasing plants growth under salt stress (Abd El-Mageed et al., 2020), reducing residual sludge in septic tanks, livestock

development and household uses (Higa & Kanai, 1996). Significant advantages of using EM were ease of use and relatively inexpensive technology. In addition, it can be applied in various fields such as agriculture, environment, etc.

Aeration (or dissolved oxygen concentration; DO) and amount of EM were important factors for water quality improvement by EM technology. The ratio of activated EM culture and domestic wastewater was 100:2000 mL in a literature (Namsivayam et al., 2011). After 20 days, the COD was decreased from 164 mg/L to 109 mg/L and the DO was low as 1.7 mg/L due to no air supply. According to Thepnarong et al. (2015), the effluent from aquaculture was treated by EM balls; the aeration was controlled at 2.5 L/min and the quantity of EM balls was two. The organic content in term of BOD and $\text{NH}_4\text{-N}$ was decreased to < 20 mg/L (initial 25 mg/L) and < 0.5 mg/L (initial 1.5 mg/L) respectively, which were acceptable concentrations for effluent standard in Thailand (PCD,

2021). The DO of treated wastewater was in the range of 4-5 mg/L.

With current increasing population growth and socio-economic development, the quality and quantity of water resource are gaining the attention. The improper management of waste and wastewater causes negatively impacts on water resource and human health from pollutants exceeding the standards, unpleasant by-products and odor. The sustainable development incorporating both socio-economic and environmental perspectives is essential task in order to prevent the environmental deterioration. Various advanced technologies such as nanoparticle-activated carbon hybrid (Kamaraj et al., 2020) and innovative hybrid membrane-ultrasound (Naddeo et al., 2020) are in practice for improving water quality as well as pollutants removal, however most of them are costly and generate secondary waste. Therefore, the EM is one of promising ways for improving water quality, due to its ecofriendly nature, less cost and capital requirement. However, several aspects of its operating conditions are unclarified.

In the present study, the performance of EM technology was evaluated to remove ammonium-nitrogen ($\text{NH}_4\text{-N}$) and carbon content (as presented in chemical oxygen demand; COD) which are common pollutants in water resource and causing an unpleasant odor. The influence of aeration and amount of EM on both pollutants removal were clarified and discussed.

2. MATERIALS AND METHOD

2.1 Preparation of EM ball and synthetic water

The EM stock was collected from Land Development Office Section 8 (Phitsanulok, Thailand), and 12.5 g of EM stock was mixed with 25 mL of molasses and 1 L of deionized water. The EM solution was kept at room temperature ($\sim 25^\circ\text{C}$) for 2 days. Later, the EM solution was slowly mixed in 2 kg of dry bran, and the mixture was molded into spherical balls each of diameter 3 cm (namely EM balls). The EM balls were kept at room temperature ($\sim 25^\circ\text{C}$) for 7 days before using in the experiments.

2.2 Reactor setup and operation

The opened cylinder plastic reactors with 30-L working volume (28 \varnothing cm x 65 cm) were used in this study. The synthetic water was prepared by following chemicals (g/L): 1.13 of $\text{CH}_3\text{COONa}\cdot 3\text{H}_2\text{O}$, 0.11 g of NH_4Cl , 0.24 g of NaHCO_3 and 0.01 g of KH_2PO_4 . The synthetic water contained approximately 30 mg/L of $\text{NH}_4\text{-N}$ and 600 mg/L of COD. Various quantity of EM balls and air were supplied via aquatic aerators to the reactors, as summarized in Table 1. No fresh water was fed to the reactors during the experiments. The water was sampled, collected and analyzed every 1-2 days for water quality analysis.

Table 1. Operating conditions for the experiments.

Reactor	Amount of EM (balls)	Air supply (L/min)	Approximately DO concentration at the steady state (mg/L)
<i>Influence of aeration</i>			
1	2	0	0.7
2	2	2	6.0
<i>Influence of amount of EM</i>			
1	1	0	0.7
2	2	0	0.7
3	3	0	0.6

2.3 Analytical methods

Three forms of nitrogen including $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{NO}_2\text{-N}$ and $\text{NO}_3\text{-N}$ were determined by phenate, colorimetric and ultraviolet spectrophotometric screening methods, respectively in accordance with the standard methods for the examination of water and wastewater (APHA, 2017). The COD was determined by closed reflex method (APHA, 2017). The in-situ DO, pH and turbidity were measured every 1-2 days by DO meter (DKK-TOA DO-31P), pH meter (Proline B210) and turbidity meter (HACH 2100Q).

Equations used for calculations

At the end of experiment (day 17), the performance of EM on water quality improvement was indicated by total nitrogen removal and COD removal, as presented in Equations 1-2.

Total nitrogen removal (%)

$$= \left(1 - \frac{[\text{NH}_4 - \text{N}]_{\text{day17}} + [\text{NO}_2 - \text{N}]_{\text{day17}} + [\text{NO}_3 - \text{N}]_{\text{day17}}}{[\text{NH}_4 - \text{N}]_{\text{day0}}}\right) \times 100 \quad (1)$$

$$\text{COD removal (\%)} = \left(1 - \frac{[\text{COD}]_{\text{day17}}}{[\text{COD}]_{\text{day0}}}\right) \times 100 \quad (2)$$

3. RESULTS AND DISCUSSION

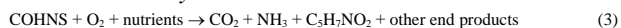
3.1 Influence of aeration and no aeration to water quality

Two fed-batch-mode reactors containing 2 EM balls were operated without air supply (namely no aeration reactor) and with air supply of 2 L/min (namely aeration reactor) to investigate the effect of aeration and DO concentration on the pollutants reduction. The no aeration reactor referred to the condition of natural water restoration which obtaining dissolved oxygen from the air diffusion, whereas the aeration reactor referred the condition of excessive dissolved oxygen from external

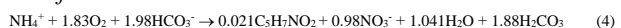
aerator. In the no aeration reactor, the $\text{NH}_4\text{-N}$ was continuously decreasing from initial concentration of 30 mg/L to 14 mg/L in day 5 (reduction rate of 2.8 mg/L-day), whereas the slight $\text{NO}_3\text{-N}$ concentration was observed. Later, the $\text{NH}_4\text{-N}$ was increasing to the maximal concentration of 26 mg/L and this concentration was again decreasing until the end of experiment (see in Figure 1). Similarly, three changing concentration profiles of COD were observed in the no aeration reactor; 1) the concentration was started to decrease, 2) it was raised in sequencing days, and 3) finally it was constantly decreased (Figure 2).

The biological mechanisms relating to the reduction of $\text{NH}_4\text{-N}$ and COD were suggested in Equations 3-5 (Alikhani et al., 2017; Tenore et al., 2020). The nitrogen and organic carbon was oxidized by microorganisms existing in EM balls to synthesize the new cells, as described in Equation 3. The initial DO concentration was around 5.8 mg/L, which was in the range of surface water quality from 4 to 6 mg/L (PCD, 2021), and it was sharply decreased to approximately 0.7 mg/L at the steady state. Since the dissolved oxygen was still remained in the no aeration reactor (DO of ~0.7 mg/L), the nitrification was occurred to transform $\text{NH}_4\text{-N}$ to $\text{NO}_3\text{-N}$, as described in Equation 4. The generated $\text{NO}_3\text{-N}$ was continuous transformed to gaseous N_2 by denitrification, as shown in Equation 5. Although the conventional denitrifying microorganisms were active in anaerobic condition, the literatures reported that the denitrifying microorganisms were also effective in a low DO condition (Song et al., 2020). The EM balls consisted of multi-culture microorganisms, therefore various microbial species including nitrifying, denitrifying, autotroph and heterotroph were co-existed and caused synergistic effects on pollutants removal. However, the other organic contents such as molasses and bran in EM balls were decomposed, causing the increasing $\text{NH}_4\text{-N}$ and COD concentrations during day 4-9. However, those active microorganisms can remove the decomposed matters via their microbial activity consequently. At the end of experiment, the no aeration reactor achieved 77% of total nitrogen removal and 60% of COD removal.

Oxidation and synthesis:



Nitrification:



Denitrification:

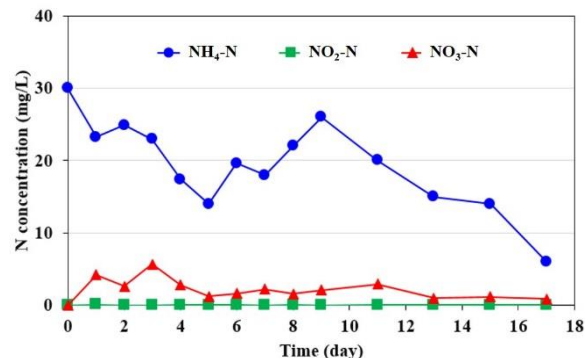


Figure 1 Change of nitrogen forms in the no aeration reactor

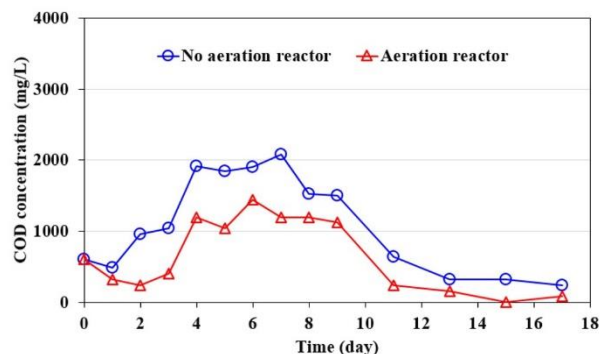


Figure 2 Comparison of COD trends in the no aeration reactor and aeration reactor

In the aeration reactor, the $\text{NH}_4\text{-N}$ was sharply decreased and reached the minimal concentration of 3 mg/L which was lower than the no aeration reactor (Figure 3). The results exhibited the enhancing nitrification activity under continuous air supply (DO of ~6.0 mg/L) with a high reduction rate of 8.8 mg/L-day. In the meanwhile, the increase in $\text{NH}_4\text{-N}$ from substrates decomposition of EM balls was also happened. The aeration can cause the improvement of microbial activity to utilize the organic carbon, as indicated by the lower COD trend in the aeration reactor rather than the no aeration reactor (Figure 2). Finally, the aeration reactor with EM balls reached the 83% of total nitrogen removal and 80% of COD removal, which was better performance than the no aeration reactor with EM balls.

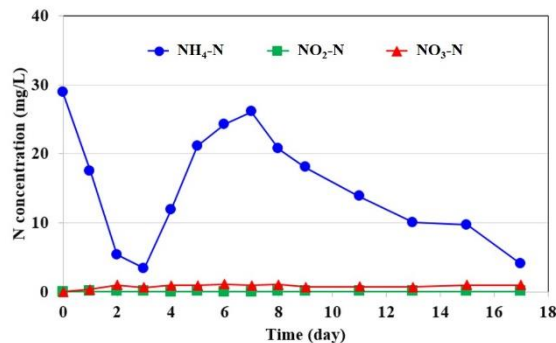


Figure 3 Change of nitrogen forms in the aeration reactor

Turbidity is one of important water quality factors for residential satisfaction. The impact of using EM balls on the water turbidity was examined. The EM balls were immediately separated after adding in the reactors (Figures 4a and 4b). This resulted the suddenly increasing turbidity value at day 1 (see in Figure 5). The continuous air supply had significant impact on the dispersion of microorganisms and microorganisms' growth, thus the high turbidity of 30 NTU was detected in the aeration reactor. The greater number of suspended microorganisms in the aeration reactor led to agglomerate and consequently the microorganisms were settled down at the reactors base (Figure 4c). This phenomenon led to the lower turbidity of aeration reactor (of 9 NTU) rather

than the no aeration reactor (of 15 NTU) at the end of experiment. The increase in total heterotrophic bacteria and yeast population in the EM system was reported in a previous study (Namsivayam et al., 2011). The change of EM balls in the reactors was illustrated in Figure 4. Furthermore, the settling microorganisms provided anaerobic condition for microbial reactions (i.e., denitrification). Therefore, either no aeration reactor or aeration reactor was facultative system for pollutants removal. Although the pollutants removal efficiency was improved via continuous air supply, the increase in operating cost and on-site condition should be concerned for EM balls implementation.

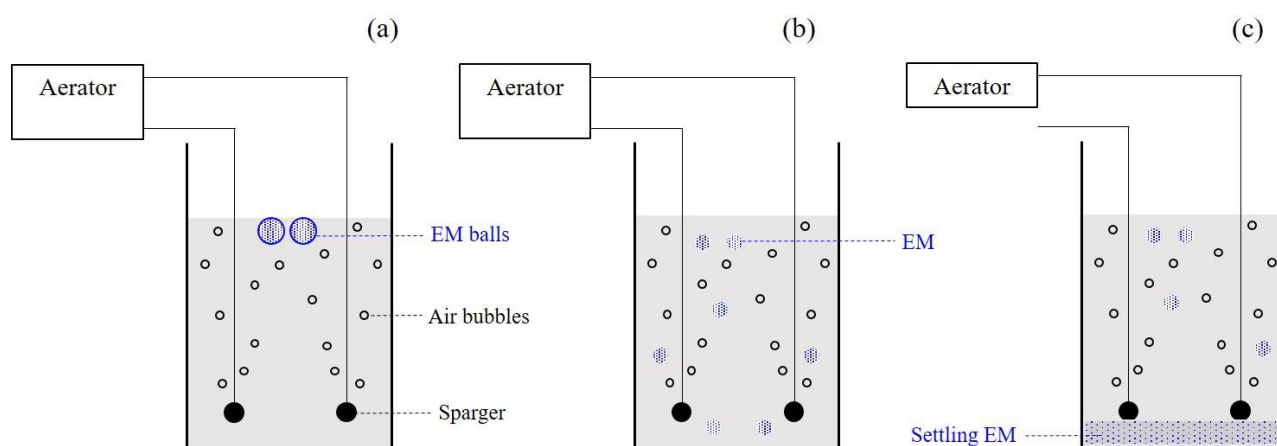


Figure 4 Change of EM balls in the reactors; (a) after EM balls addition, (b) EM balls was dispersed as effective microorganisms, and (c) effective microorganisms were settled down

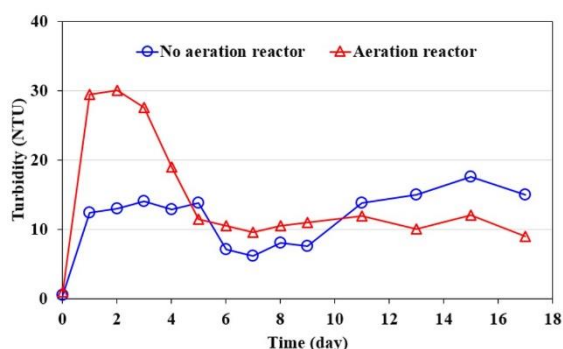


Figure 5 Comparison of turbidity trends in the no aeration reactor and aeration reactor

3.2 Influence of EM ball quantity to water quality

In this experiment, three no aeration reactors were operated under different number of EM balls to clarify the influence of EM balls on the pollutants removal; one EM balls (namely 1EM reactor), two EM balls (namely 2EM reactor) and three EM balls (namely 3EM reactor). From Figure 6, the $\text{NH}_4\text{-N}$ reduction and its change were similar in the three reactors. In day 1-5, the $\text{NH}_4\text{-N}$ reduction rate was ranged 2.8-3.0 mg/L-day in the 1EM and 2EM

reactors, and it increased to 4.0 mg/L-day in the 3EM reactor. Although the greatest number of EM balls obtained the highest $\text{NH}_4\text{-N}$ reduction rate in the beginning, the large amount of molasses and bran contents caused the excessive $\text{NH}_4\text{-N}$ releasing from EM balls decomposition in day 6-10. This significantly affected on the deficient total nitrogen removal of 27% at the end, whereas the total nitrogen removal reached 63% for 1EM reactor and 77% for 2EM reactor.

The decomposition of substrates contents in EM balls causing pollutants releasing was proved by the trends of COD concentrations in Figure 7. The increasing COD reached the maximal concentration of 3,600 mg/L in the 3EM reactor, followed by 2,080 mg/L in the 2EM reactor and 1,280 mg/L in the 1EM reactor. In comparison, the highest COD removal of 60% was observed in the 2EM reactor, whereas only 3% of COD was removed in the 1EM reactor. On the other hand, none of COD was removed in the 3EM reactor after the experiment, and the higher concentration of 900 mg/L than the initial of 600 mg/L was found. From the above results, the number of EM balls was important factor for improving the water quality. The increasing number of EM balls led to the

increasing number of active microorganisms for efficient pollutants removal, however the high decomposition of EM balls substrate can cause the poor quality of water resource. Due to the present study, the optimal number of EM balls was two.

The similar pH trends were presented in Figure 8. After adding the EM balls, pH of three reactors was immediately dropped, because the EM balls contained acidity property ($\text{pH} < 3.5$) with sweet-sour taste and smell (Victoria & Mahaeswari, 2016). Later, the pH was continuously increasing and stable in day 14; the pH value was around 7.8, 7.7 and 7.4 in the 1EM, 2EM and 3EM reactors respectively. The lowest pH in the 3EM reactor was possibly because the different dominant microorganisms due to the excessive organic substrates (i.e., molasses and bran), fermentation and acidogenesis process. However, the microbial mechanisms as well as the microbial community should be further clarified. Priya et al. (2015) suggested that the pH level of 7.4 was indication of healthy anaerobic environment and satisfactory methanogenic activity for EM technology. Due to previous studies, the continuously increasing pH was detected along with EM technology operation (Priya et al., 2015), and it was applicable to remove other pollutants such as phosphorus (> 90%) from improved fermentation in anaerobic zone (Rashed & Massoud, 2015).

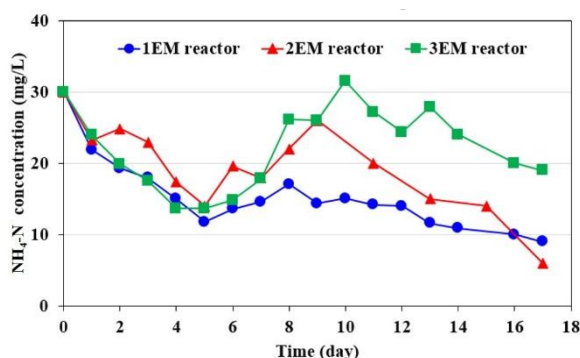


Figure 6 Comparison of $\text{NH}_4\text{-N}$ trends in the 1EM, 2EM and 3EM reactors

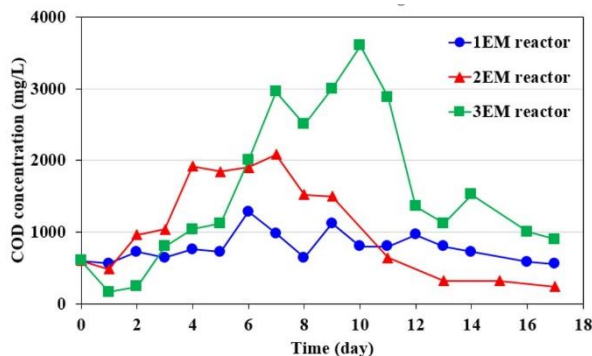


Figure 7 Comparison of COD trends in the 1EM, 2EM and 3EM reactors

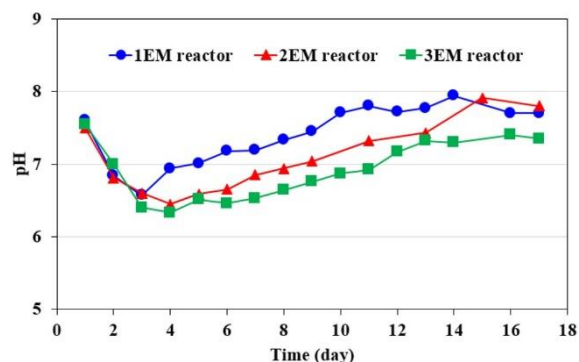


Figure 8 Comparison of pH trends in the 1EM, 2EM and 3EM reactors

4. CONCLUSION

The EM technology was able to remove $\text{NH}_4\text{-N}$ and carbon content from the water resource. The aeration enhanced the DO concentration, microorganisms activity and their growth, resulting in the increasing $\text{NH}_4\text{-N}$ reduction rate and pollutants removal (83% for total nitrogen and 80% for COD). In the meanwhile, the rapid growth and absolute dispersion of microorganisms in the aeration reactor caused high turbidity, however the microorganisms were agglomerated and settled at the end of experiment. The largest quantity of three EM balls also enhanced $\text{NH}_4\text{-N}$ reduction rate in the beginning, however the $\text{NH}_4\text{-N}$ and COD releasing from substrates decomposition caused that only 27% of $\text{NH}_4\text{-N}$ was removed and relatively high COD was remained. Due to the present study, two EM balls were optimum and the DO value should be maintained around 6 mg/L for satisfied pollutants removal efficiency (83% for total nitrogen and 80% for COD). However, the pollutants types, volume of contaminated water and affordable treatment cost from aeration should be concerned and optimized for suitable and low-cost technology for water quality restoration.

5. ACKNOWLEDGMENTS

The authors gratefully acknowledge the post-graduate scholarship provided by Faculty of Engineering, Naresuan University. The authors also wish to acknowledge Kairop and Milint Nakaruk for the donation of their living allowance.

6. REFERENCES

- Abd El-Mageed, T. A., Rady, M. M., Taha, R. S., Abd El Azeam, S., Simpson, C. R., & Semida, W. M. (2020). Effects of integrated use of residual sulfur-enhanced biochar with effective microorganisms on soil properties, plant growth and short-term productivity of *Capsicum annum* under salt stress. *Scientia Horticulturae*, 261, 108930
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.108930>

- Alikhani, J., Takács, I., Al-Omari, A., Murthy, S., & Massoudieh, A. (2017). Evaluation of the information content of long-term wastewater characteristics data in relation to activated sludge model parameters. *Water Science and Technology*, 75, 1370-1389
. <https://doi.org/10.2166/wst.2017.004>
- APHA. (2017). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 23rd Edn., American Public Health Association/American Water Works Association/Water Environment Federation, Washington DC, USA.
- Boruszko, D. (2017). Research on the influence of anaerobic stabilization of various dairy sewage sludge on biodegradation of polycyclic aromatic hydrocarbons PAHs with the use of effective microorganisms. *Environmental Research*, 155, 344-352.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envres.2017.02.019>
- Higa, T., & Kanai, A. (1996). *An Earth Saving Revolution: A Means to Resolve Our World's Problems Through Effective Microorganisms (EM)*. Sunmark Pub
<https://books.google.co.th/books?id=drOMQQAACAAJ>
- Kamaraj, M., Srinivasan, N. R., Assefa, G., Adugna, A. T., & Kebede, M. (2020). Facile development of sunlit ZnO nanoparticles-activated carbon hybrid from pernicious weed as an operative nano-adsorbent for removal of methylene blue and chromium from aqueous solution: Extended application in tannery industrial wastewater. *Environmental Technology & Innovation*, 17, 100540
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.eti.2019.100540>
- Lananan, F., Abdul Hamid, S. H., Din, W. N. S., Ali, N. a., Khatoon, H., Jusoh, A., & Endut, A. (2014). Symbiotic bioremediation of aquaculture wastewater in reducing ammonia and phosphorus utilizing Effective Microorganism (EM-1) and microalgae (*Chlorella* sp.). *International Biodeterioration & Biodegradation*, 95, 127-134
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2014.06.013>
- Naddeo, V., Secondes, M. F. N., Borea, L., Hasan, S. W., Ballesteros, F., & Belgiorno, V. (2020). Removal of contaminants of emerging concern from real wastewater by an innovative hybrid membrane process – UltraSound, Adsorption, and Membrane ultrafiltration (USAMe®). *Ultrasonics Sonochemistry*, 68, 105237.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105237>
- Namsivayam, S. K. R., Narendrakumar, G., & Kumar, J. (2011). Evaluation of Effective Microorganism (EM) for treatment of domestic sewage. *Journal of Experimental Sciences*, 2, 30-32.
- Pollution Control Department, Ministry of Natural Resources and Environment (2021).
<https://www.pcd.go.th/>.
- Priya, M., Meenambal, T., Balasubramanian, N., & Perumal, B. (2015). Comparative Study of Treatment of Sago Wastewater using HUASB Reactor in the Presence and Absence of Effective Microorganisms. *Procedia Earth and Planetary Science*, 11, 483-490.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.proeps.2015.06.048>
- Rashed, E. M., & Massoud, M. (2015). The effect of effective microorganisms (EM) on EBPR in modified contact stabilization system. *HBRC Journal*, 11(3), 384-392
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.hbrj.2014.06.011>
- Song, J., Zhang, W., Gao, J., Hu, X., Zhang, C., He, Q., Yang, F., Wang, H., Wang, X., & Zhan, X. (2020). A pilot-scale study on the treatment of landfill leachate by a composite biological system under low dissolved oxygen conditions: Performance and microbial community. *Bioresource Technology*, 296, 122344.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122344>
- Tenore, A., Vieira, J., Frunzo, L., Luongo, V., & Fabbicino, M. (2020). Calibration and validation of an activated sludge model for membrane bioreactor wastewater treatment plants. *Environmental Technology*, 41(15), 1923-1936.
<https://doi.org/10.1080/09593330.2018.1551940>
- Thepnarong K., Chiayvareesajja S., Kantachote D. (2015). Efficiency of fermented organic matter and effective microorganism (EM) ball for treating effluent from freshwater aquaculture. *Thaksin Journal*, 18(1), 15-22.
- Victoria, J., & Mahaeswari, U. N. (2016). Effective microorganisms – An incredible alternative for wastewater treatment. *International Journal of Development Research*, 6, 9399-9403.

Demagnetization Fault Detection on BLDC by Adaptive Neuro Fuzzy Inference System

Kreangsuk Kraikitrat¹ and Bunyarit Wangngon^{2*}

¹ Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, University of Phayao, Phayao, Thailand

² Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Lanna Phitsanulok, Thailand

* Corresponding author e-mail: maxaee_@hotmail.com

(Received: 30 September 2021, Revised: 20 October 2021, Accepted: 2 November 2021)

Abstract

This research presents a method for detecting permanent magnet damage anomalies in a brushless direct current motor (BLDC Motor) by applying the adaptive neuro-fuzzy interface system (ANFIS). The input data for ANFIS has 4 lead inputs. Derived from the magnitude and position of the third order harmonics of the stator current and back electromotive force (Back-EMF) from the BLDC Motor. Consists of frequency of 3rd Order in the Back-EMF, magnitude of 3rd Order in the Back-EMF, frequency of 3rd Order in the Motor Current and Magnitude of 3rd Order in the Motor Current. The ANFIS construction is ideal for detecting any malfunctions. It is the combined structure of the fuzzy logic system (FLS) and artificial neural networks (ANN) methods. In the FLS part, the membership function is used as the triangular and choose the principle of function approximation as sugeno fuzzy model and in ANN choose feed-forward network, there is transfer function at hidden layer and output layer is tan-sigmoid transfer function (tansig) and linear transfer function (purelin) respectively and have a learning style back-propagation learning from the test, it was found that the learning error of ANFIS was 3.62E-03 and the accuracy in the detection of anomalies was 98.81%.

Keywords: Brushless Direct Current Motor, Demagnetization, Back Electromotive Force, Stator Current, Adaptive Neuro-Fuzzy Interface System.

1. INTRODUCTION

Nowadays, Brushless Direct Current Motor (BLDC Motor) is widely used in various industrial sectors, especially in the electric vehicle and electric bicycle industry. Due to its good power transmission properties carbon brushes are not required to transmit power like a brushed direct current motor (DC Motor). BLDC Motor is a type of machine that has malfunctions. The cause may be caused by the motor manufacturing process or caused by abnormal operating conditions. Faults that occur can occur in many parts such as bearing faults, stator faults and demagnetization faults etc. Faults in a BLDC Motor are divided into 2 The main categories include electrical faults and mechanical faults. Research (Albrecht et al., 1986) has shown that the percentage of motor faults occurring is found to be the majority of bearing damage. used followed by faults occurring at the stator and rotor in order.

There are two methods of checking motor faults at present, checking by stopping the motor. For example, checking the fracture of the permanent magnet, the deterioration of the bearing, which this method has a disadvantage is that it has to stop the work process. Due to such disadvantages, there is another way to check without stopping the motor is an analysis of abnormalities caused by electrical signals such as voltage, current, etc., which helps to identify impending motor faults before they can cause serious damage. In research (Kang et al.,

2015; Kang et al., 2015; Yang et al., 2021; Usman & Rajpurohit, 2020; Usman et al., 2020; Usman et al., 2019; Kim & Hur, 2016; Kim et al., 2020; Kim et al., 2010; Usman & Rajpurohit, 2020; Madhav & Sadakale, 2020; Kim et al., 2020) The study and analysis of back electromotive force (Back-EMF). From the damage condition incurred to the permanent magnet in the BLDC Motor by analyzing the electrical signal. Voltage and other parameters.

In the study (Mati & Kuli, 2010; Drira & Derbel, 2011; Kolla & Altman, 2007) applied artificial neural networks (ANN) to detect and classify abnormalities in rotor and stator of the motor by taking electrical signal data. The resulting vibration and heat are inputs for ANN to be used in the learning process and analyze the network output for discriminative analysis of motor faults.

In the study (Dias & Chabu, 2008; Zouzou et al., 2009; Laala et al., 2011) applied fuzzy logic system (FLS) to detect and classify abnormalities in rotor and stator of the motor by taking the information of the electric signal, vibration and heat generated. Define and create. Membership function in the FLS method for discriminating motor faults.

Different mathematical methods have their advantages and disadvantages, and no one is better than the other in every way. An ANN, for example, has the advantage of being able to learn and recognize patterns. But there is a disadvantage that it cannot explain the reason for the

decision while FLS. It is characterized by its logical reasoning like human thought. Decisions can be explained by FLS rules and can be applied to obscure information. But the disadvantage of FLS lies in the inability to learn and customize the rules by yourself. Must rely on experts or knowledgeable people to define the structure and rules. Therefore, researchers are interested in combining different methods into a hybrid system in order to combine the advantages of each method and eliminate the limitations of each method. One such hybrid system is the ANN blending with FLS to form the Adaptive Neuro-Fuzzy Interface System (ANFIS) proposed by J.S.r. Jang (Kolla & Altman, 2007)

In the study (Souad et al., 2017; Moghadasian et al., 2017; Ballal et al., 2007) the application of ANFIS to the analysis of motor abnormalities was presented. which is a system created by the combined application of FLS or fuzzy logic with ANN In order to distinguish between motor faults.

This research applied ANFIS to detect abnormality caused by permanent magnet damage in BLDC Motor rotor. The input data for ANFIS has 4 inputs taken from Third order harmonics (3rd order):

1. Frequency of 3rd Order in the Back-EMF
2. Magnitude of 3rd Order in the Back-EMF
3. Frequency of 3rd Order in the Motor Current
4. Magnitude of 3rd Order in the Motor Current

The working process of rotor permanent magnet detection and classification system by applying ANFIS started simulating the state of permanent magnet fracture in BLDC motor into 3 case studies as follows: 1. Normal permanent magnet (0BB) 2. Permanent magnet damaged 1 bar conductor (1 BB) and 3. Two permanent magnets damaged (2BB). Stator current and back-EMF signals with the motor operating under various simulation conditions are analyzed and converted from time domain to frequency domain signal (Fast Fourier Transform (FFT)) to continue as input in ANFIS.

2. BRUSHLESS DIRECT CURRENT MOTOR

2.1 Fundamental of BLDC motor (Kim et al., 2020)

A BLDC motor is usually supplied with a 120-degree commutation inverter and the schematic of a BLDC motor drive circuit is shown in Fig. 1.

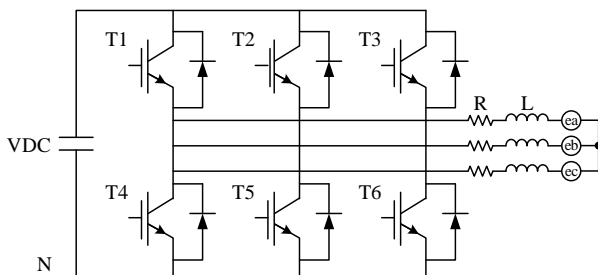


Figure 1 Schematic of a BLDC motor drive circuit.

In this paper, an upper PWM method for a speed controller is used. An illustration of the ideal back-EMF, current waveform and the switching states in a BLDC motor is shown in Fig. 2.

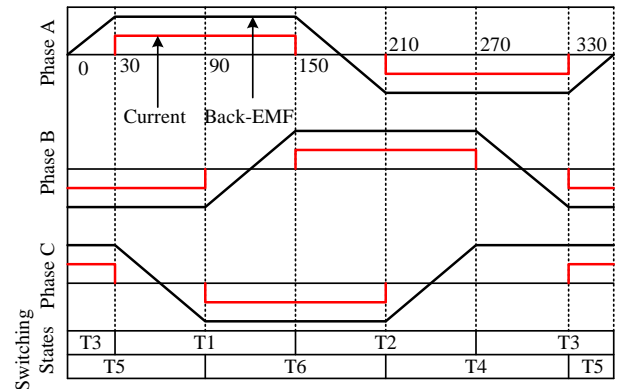


Figure 2 The ideal waveforms of back-EMF, current and switching states.

2.2 Demagnetization faults in BLDC motor (Usman & Rajpurohit, 2020)

Additional investigations are made on the harmonic analysis of demagnetization faults in the BLDC motor drive. The harmonics are excited at multiples of mechanical frequency in the stator back-EMF and current spectrum as given in (1).

$$f_{demag} = f_s \left(\frac{k}{p/2} \right) = kf_m \quad k = 1, 2, 3... \quad (1)$$

where f_{demag} is the frequency of k^{th} component in the spectrum, f_s is electrical frequency, f_m is the rotational frequency and p is the number of poles. The proposed investigations are done on the BLDC motor under study with $p = 12$.

2.3 BLDC motor Operation (Faiz & Mazaheri, 2017)

In this section, the effect of the demagnetization fault on Back-EMF waveforms of a BLDC motor is studied; harmonics of Back-EMF, caused by the demagnetization fault, are the main reason for injecting harmonics to the phase current. Six-step operation of the BLDC leads to the specific extrema in the phase currents at each switching instance. These patterns are treated analytically.

Back-EMF is an important signal in the diagnosis of the demagnetization fault, because flux disturbance caused by this fault influences Back-EMF waveforms. It is possible to separate the effect of each individual PM on each coil by knowing individual coils offset angles (Hanselman, 2003; Goktas et al., 2016). Suppose the following Fourier series:

$$e_{ac} = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \left(\sum_{k=1}^p (-1)^{k-1} d_k e^{jn(k-1)\frac{360}{p}} \right) e^{jn\theta_{cac}} E_n e^{jn\theta_m} \quad (2)$$

$$\theta_{cac} = (c-1) \frac{360}{p} \quad (3)$$

describes the induced voltage in c^{th} coil of phase a with separated effects of each individual magnet in a p-pole PM motor where d_k is between 0 and 1 introducing demagnetization fault severity of each magnet, E_n is the amplitude of n^{th} Fourier series coefficients, θ_m is the mechanical position of the rotor, and θ_{cac} is the coil angle of c^{th} coil which can be calculated by (3). Taking coil angles for all N_c coils into account, the induced voltage in phase a is as follows:

$$e_a = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \left(\sum_{c=1}^{N_c} (-1)^{c-1} e^{jn\theta_{cac}} \right) \times \left(\sum_{k=1}^p (-1)^{k-1} d_k e^{jn(k-1)\frac{360}{p}} \right) E_n e^{jn\theta_m} \quad (4)$$

The first part in (4) corresponds to the distribution of the coils in stator slots for a particular winding layout:

$$S_{wan} = \sum_{c=1}^{N_c} (-1)^{c-1} e^{jn\theta_{cac}} \quad (5)$$

The second part in (4) is related to the number of rotor magnets and fault severity of the magnets:

$$S_{pmn} = \sum_{k=1}^p (-1)^{k-1} d_k e^{jn(k-1)\frac{360}{p}} \quad (6)$$

And the last part forms the shape of the Back-EMF waveform for each individual coil. For a balanced winding, induced voltages in other phases can be calculated by shifting the coil angle θ_{cac} in S_{wan} part by 120°:

$$e_a = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \left(S_{wbn} S_{pmn} E_n e^{jn\theta_m} \right) \quad (7)$$

$$e_c = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \left(S_{wcn} S_{pmn} E_n e^{jn\theta_m} \right) \quad (8)$$

Similarly, line-to-line Back-EMF are expressed by subtracting two corresponding phase Back-EMF for the line Back-EMF of phase a and phase b:

$$e_{ab} = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} S_{wbn} \left[1 - e^{jn120} \right] S_{pmn} E_n e^{jn\theta_m} \quad (9)$$

Although the fault frequency components in (1) are observed in the phase Back-EMF, Eqn. (9) indicates that some components can be disappeared in the line-to-line Back-EMF due to the lack of phase difference which depends on the winding configuration and number of poles and slots.

Suppose the induced voltages of the coils are perfect trapezoidal waveforms with a flat-top of 120 electrical

degrees; as an ideal case for a BLDC motor. Therefore, the following fourier series coefficients:

$$E_n = -\frac{j}{2} \left(\frac{12}{\pi^2} \right) \left(\frac{\sin \frac{n\pi}{6} + \sin \frac{5\pi}{6}}{n^2} \right) \quad (10)$$

Can be directly calculated by its function or by subtraction of two triangular waveforms.

2.4 Experimental Setup

The proposed algorithm is verified by simulation of experiments. Simulations are performed at healthy condition and fault conditions. The parameters of the BLDC are summarized in Table I.

BLDC upper PWM-based inverter drive in speed control mode is used to operate the motor for experimental verification. The switching frequency of the inverter is 625 kHz and it has speed and position feedback system using hall sensors. The overall experimental setup is illustrated in Fig. 3.

Table 1 The parameters of BLDC motor.

Parameters	Value	
Rated Power	800	W
Rated Voltage	48	V
Rated Current	11	A
Rated Speed	3,000	rpm
Phase	3	-
Slots of Stator	18	-
Poles	16	-

The important equipment for testing Demagnetization Fault in BLDC motor is Power Supply, Current Probe, BLDC motor, DC motor and Computer as shown in Fig. 3.



Figure 3 Overall experimental setup

To detect the motor's stator current and Back-EMF signals, the electrical signal flowing through the motor is measured.

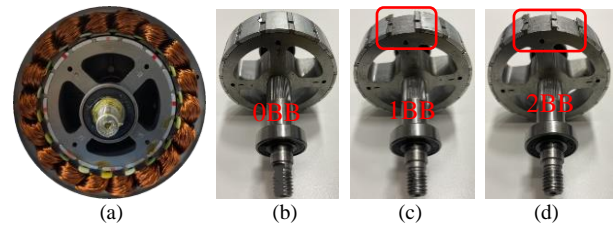


Figure 4 Photograph of Demagnetization Faults
(a) Stator (b) 0BB (c) 1BB (d) 2BB

The current data is recorded using an oscilloscope with a sampling of 2 kHz and a total of 10,000 data records, so the frequency resolution is 0.2 Hz. The simulation of fracture condition of the permanent magnet in BLDC Motor is divided into 3 cases: 1. Normal permanent magnet (0BB), 2. Damaged permanent magnet 1 rod (1BB) and 3. Damaged permanent magnet 2 rod (2BB) as follows: Fig. 4. and an example of the motor current and voltage signal is shown in Fig. 5.

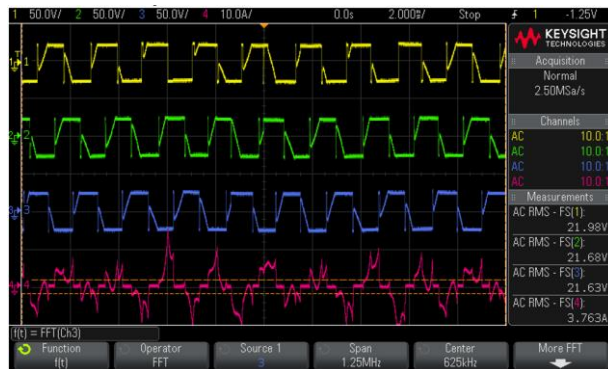


Figure 5 Signal of current and Back-EMF

2.5 Experimental Results

The harmonics effect on the permanent magnet damage is applied as the default value for the input as shown in Figures 6, 7 and table 2. 1. Frequency of third order harmonics in the Back-EMF 2. Magnitude of third order harmonics in the Back-EMF 3. frequency of third order harmonics in the motor current 4. Magnitude of third order harmonics in the motor current.

Table 2 Data of Harmonic Components.

Condition	Input				Target
	X1	X2	X3	X4	Y1
0BB	2.58	1245.63	0.71	2910.00	1
0BB	3.08	1246.88	0.76	2920.00	1
0BB	2.96	1247.50	0.69	2920.00	1
0BB	2.96	1248.13	0.74	2920.00	1
1BB	2.77	1326.88	0.95	1760.63	2
1BB	2.99	1327.50	1.28	1763.13	2
1BB	3.25	1328.75	0.83	1763.75	2
1BB	2.96	1329.38	1.09	1766.25	2
2BB	2.17	1410.00	0.74	1523.75	3
2BB	2.56	1410.00	0.86	1524.38	3
2BB	2.50	1410.00	0.88	1525.63	3
2BB	2.66	1410.00	0.92	1525.63	3

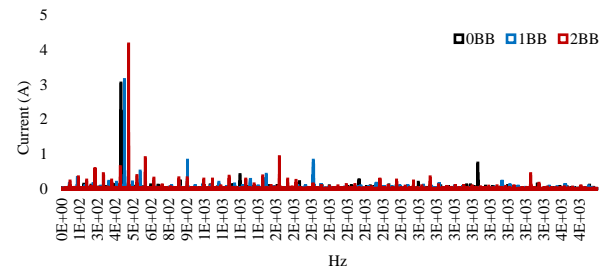


Figure 6 3rd Order of Harmonic Components of Motor Current

The harmonic analysis of stator phase currents under fault conditions has been already illustrated in Fig. 6. The harmonic analysis of rotor Back-EMF under fault conditions has been already illustrated in Fig. 7.

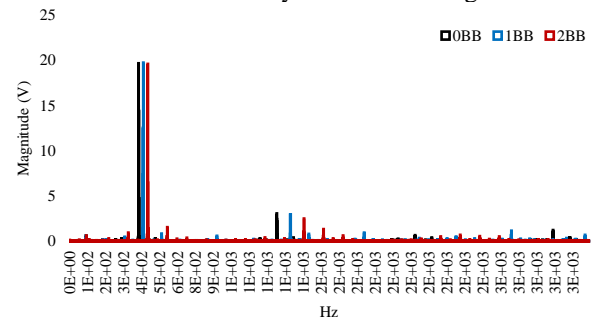


Figure 7 3rd Order of Harmonic Components of Back-EMF

3. ADAPTIVE NEURO-FUZZY INFERENCE SYSTEM

(YILMAZ & AYAZ, 2009)

ANFIS is an implementation of a fuzzy logic inference system with the architecture of a five-layer feed-forward network. With this way ANFIS uses the advantages of learning capability of neural networks and inference mechanism similar to human brain provided by fuzzy logic. The architecture of ANFIS with two inputs, one output and two rules are given in Fig. 8. Here x , y are inputs, f is output, the circles represent fixed node functions and squares represent adaptive node functions. This is a Sugeno type

Fuzzy system, where the fuzzy *IF-THEN* rules have the following form:

Rule₁:

IF x is A_1 and y is B_1 THEN $f_1 = p_1x + p_1x + q_1y + r_1$

Rule₂:

IF x is A_2 and y is B_2 THEN $f_2 = p_2x + p_2x + q_2y + r_2$

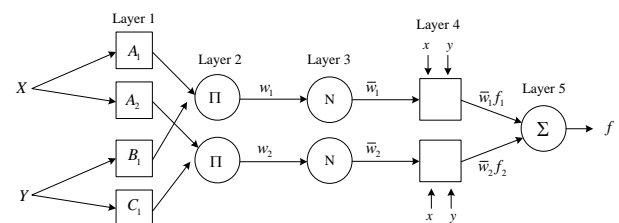


Figure 8 ANFIS architecture.

The operation of each layer is as follows: Here the output node i in layer l is denoted as O_i^l .

Layer 1 is fuzzification layer. Every node i in this layer is an adaptive node with node function

$$O_i^1 = \mu_{A_i}(x), \quad O_{i+2}^1 = \mu_{B_i}(x), \quad i = 1, 2 \quad (11)$$

Where x is the input to i^{th} node, O_i^1 is the membership grade of x in the fuzzy set A_i . Generalized bell membership function is popular method for specifying fuzzy sets because of their smoothness and concise notation, and defined as

$$\mu_{A_i}(x) = \frac{1}{1 + \left[\left(\frac{x - c_i}{a_i} \right)^2 \right]^{b_i}} \quad (12)$$

Here $\{a_i, b_i, c_i\}$ is the parameter set of the membership function. The center and width of the membership function is varied by adjusting c_i and a_i . The parameter b_i is used to control the slopes at the crossover points. Fig. 9 shows the physical meaning of each parameter in a generalized bell function. The parameters in this layer are called premise parameters. This layer forms the antecedents of the fuzzy rules (*IF* part).

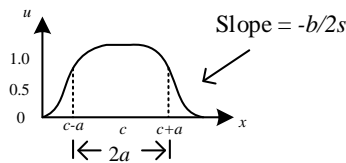


Figure 9 Generalized bell function.

Layer 2 is rules layer. Every node in this layer is a fixed node and contains one fuzzy rule. The output is the product of all incoming signals and represents the firing strength of each rule.

$$O_i^2 = w_i = \mu_{A_i}(x) \mu_{B_i}(y) \quad (13)$$

Layer 3 is normalization layer. Every node in this layer is a fixed node and i^{th} node calculates the ratio of i^{th} rule's firing strength to the sum of all rules' firing strengths. Outputs of this layer are called normalized firing strengths computed as

$$O_i^3 = \bar{w}_i = \frac{w_i}{w_1 + w_2}, \quad i = 1, 2 \quad (14)$$

Layer 4 is consequent layer. Every node in this layer is an adaptive node and computes the values of rule consequent (*THEN* part) as

$$O_i^4 = \bar{w}_i f_i = \bar{w}_i (p_i x + q_i y + r_i) \quad (15)$$

Here $i w$ is the output of Layer 3 and the parameters $\{p_i, q_i, r_i\}$ are called as consequent parameters.

Layer 5 is summation layer and consists of single fixed node which calculates the overall output as the summation of all incoming signals as

$$O_i^5 = \sum_i \bar{w}_i f_i = \frac{\sum_i w_i f_i}{\sum_i w_i} \quad (16)$$

Learning of ANFIS is done using hybrid learning procedure which combines back-propagation gradient descent and least squares method for identification of premise and consequent parameters.

An ANFIS model-based fault detector for a BLDC motor has been designed and tested using simulations. The results indicated that, regardless of the loading condition, the proposed scheme is capable of detecting Demagnetization. The next step is to test whether the proposed fault detection methodology is able to detect the existence of Demagnetization in a practical BLDC motor.

Table 3 Parameter for training in ANFIS.

Parameter		
Input	Frequency of Third order harmonics in the Back-EMF	X1
	Magnitude of Third order harmonics in the Back-EMF	X2
	Frequency of Third order harmonics in the Motor Current	X3
	Magnitude of Third order harmonics in the Motor Current	X4
Output	Demagnetization (Healthy (0BB), Unhealthy (1BB, 2BB))	Y1

An ANFIS method detects permanent magnet damage in this study. Use the analysis of ANFIS that has a mixed structure of the fuzzy logic system and artificial neural networks methods. In the FLS part, choose membership function as triangular and choose the principle of function. Approximation is surgeon fuzzy model and in ANN part choose feed-forward network, there is transfer function at hidden layer and output layer is tan-sigmoid transfer function (tensing) and linear transfer function (purlin) respectively and have a learning style back-propagation learning. The structure of ANFIS is shown in Fig.10., which consists of 4 input layers (X1, X2, X3, X4) and 1 output layer Y1 (0BB, 1BB, 2BB) as in Table 3.

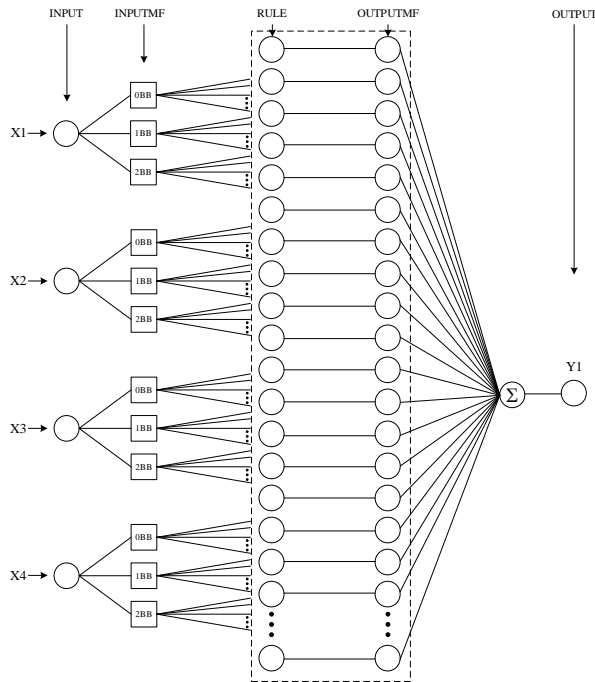


Figure 10 The structure of ANFIS

The structure of ANFIS in this research. The learning results of the program can be displayed with a surface chart between the input and output relationships as shown in Fig. 11.

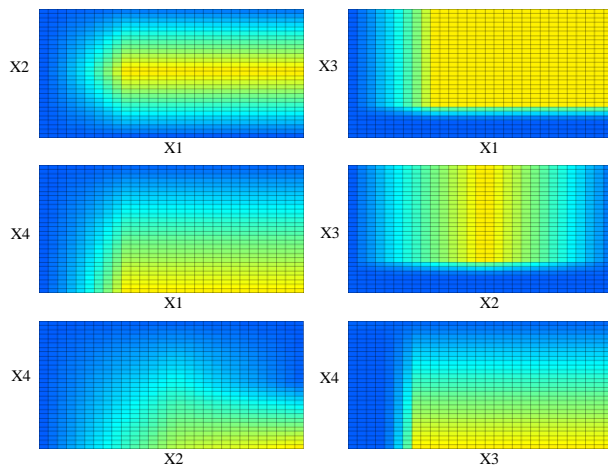


Figure 11 Surface

The results of the permanent magnet abnormality test with ANFIS can be shown and compared with the results of the detection of abnormalities occurring in the BLDC motor as shown in Fig. 12. From the figure, it shows that the detected result with the value. Targets are of the same value. It has an ANFIS learning error of 3.62E-03 and an accuracy in detecting an anomaly of 98.81%.

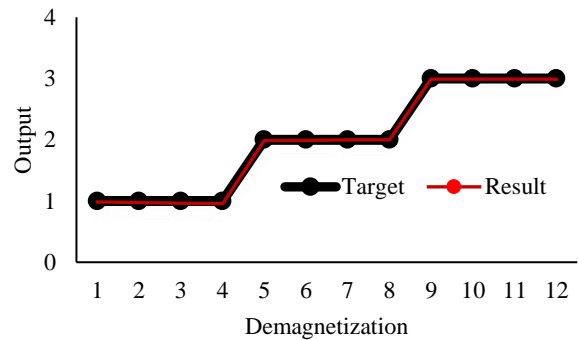


Figure 12 Result of ANFIS

4. CONCLUSION

In this paper, the demagnetization fault detection of brushless DC electric motor using adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS). The ANFIS method has been utilized to obtain data collection of the harmonic components of Back-EMF and harmonic components of current. Comparison in terms of accuracy and MSE for ANFIS is demonstrated. The results obtained show that the best MLP training algorithm has the best accuracy (98.81%) and MSE (3.62E-03) compared with others training algorithms. The test results are reliable and can be applied for the future.

5. ACKNOWLEDGMENT

The authors would like to thanks University of Phayao particular that such as Faculty of Engineering for supporting the finance for research, material and equipment, advising staffs in this project.

6. REFERENCES

- Albrecht, P. F., Appiarius, J. C., McCoy, R. M., Owen, E. L., & Sharma, D. K. (1986). Assessment of the reliability of motors in utility applications-Updated. *IEEE Transactions on Energy conversion*, (1), 39-46.
- Kim, H. K., Kang, D. H., & Hur, J. (2015). Fault detection of irreversible demagnetization based on space harmonics according to equivalent magnetizing distribution. *IEEE Transactions on Magnetics*, 51(11), 1-4.
- Kang, D. H., Kim, H. K., & Hur, J. (2015, September). Irreversible demagnetization diagnosis of IPM-type BLDC motor using BEMF harmonic characteristics based on space harmonics. In *2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)* (pp. 6956-6961). IEEE.
- Li, Z. X., Yang, G. L., Fan, Y. M., & Li, J. H. (2021). Irreversible demagnetization mechanism of permanent magnets during electromagnetic buffering. *Defence Technology*, 17(3), 763-774.

- Usman, A., & Rajpurohit, B. S. (2020). Modeling and Classification of Stator Inter-Turn Fault and Demagnetization Effects in BLDC Motor Using Rotor Back-EMF and Radial Magnetic Flux Analysis. IEEE Access, 8, 118030-118049.
- Usman, A., Sharma, V. K., & Rajpurohit, B. S. Harmonic Analysis of a BLDC Motor Under Demagnetization Fault Conditions. In 2020 IEEE 9th Power India International Conference (PIICON) (pp. 1-5). IEEE.
- Usman, A., Joshi, B. M., & Rajpurohit, B. S. (2019, October). Modeling and analysis of demagnetization faults in BLDC motor using hybrid analytical-numerical approach. In IECON 2019-45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (Vol. 1, pp. 1198-1203). IEEE.
- Kim, H. K., & Hur, J. (2016). Dynamic characteristic analysis of irreversible demagnetization in SPM-and IPM-type BLDC motors. IEEE Transactions on Industry Applications, 53(2), 982-990.
- Kim, B. C., Lee, J. H., & Kang, D. W. (2020). A study on the effect of eddy current loss and demagnetization characteristics of magnet division. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 30(4), 1-5.
- Kim, H. K., Hur, J., Kim, B. W., & Kang, G. H. (2010, September). Characteristic analysis of IPM type BLDC motor considering the demagnetization of PM by stator turn fault. In 2010 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (pp. 3063-3070). IEEE.
- Usman, A., & Rajpurohit, B. S. (2020, January). Numerical Analysis of Stator Inter-turn Fault and Demagnetization effect on a BLDC Motor using Electromagnetic Signatures. In 2020 IEEE International Conference on Power Electronics, Smart Grid and Renewable Energy (PESGRE2020) (pp. 1-6). IEEE.
- Madhav, N., & Sadakale, R. (2020, July). Analysis of demagnetized BLDC Motor using MATLAB Simulink model and AWT analysis. In 2020 11th International Conference on Computing, Communication and Networking Technologies (ICCCNT) (pp. 1-5). IEEE.
- Kim, D. H., Im, J. H., Zia, U., & Hur, J. (2020, October). Online Detection of Irreversible Demagnetization Fault with Non-excited Phase Voltage in Brushless DC Motor Drive System. In 2020 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE) (pp. 748-753). IEEE.
- Mati, D., & Kuli, F. (2010, September). Artificial neural networks broken rotor bars induction motor fault detection. IEEE. In Symposium on Neural Network Applications in Electrical Engineering (pp. 23-25).
- Drira, A., & Derbel, N. (2011, March). Classification of rotor fault in induction machine using Artificial Neural Networks. In Eighth International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (pp. 1-6). IEEE.
- Kolla, S. R., & Altman, S. D. (2007). Artificial neural network based fault identification scheme implementation for a three-phase induction motor. ISA transactions, 46(2), 261-266.
- Dias, C. G., & Chabu, L. E. (2008, June). A fuzzy logic approach for the detection of broken rotor bars in squirrel cage induction motors. In 2008 IEEE International Conference on Fuzzy Systems (IEEE World Congress on Computational Intelligence) (pp. 1987-1991). IEEE.
- Zouzou, S. E., Laala, W., Guedidi, S., & Sahraoui, M. (2009, December). A fuzzy logic approach for the diagnosis of rotor faults in squirrel cage induction motors. In 2009 Second International Conference on Computer and Electrical Engineering (Vol. 2, pp. 173-177). IEEE.
- Laala, W., Guedini, S., & Zouzou, S. (2011, September). Novel approach for diagnosis and detection of broken bar in induction motor at low slip using fuzzy logic. In 8th IEEE Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics & Drives (pp. 511-516). IEEE.
- Souad, L., Youcef, M., & Samir, M. (2017, October). Use of Neuro-fuzzy technique in diagnosis of rotor faults of cage induction motor. In 2017 5th International Conference on Electrical Engineering-Boumerdes (ICEE-B) (pp. 1-4). IEEE.
- Moghadasian, M., Shakouhi, S. M., & Moosavi, S. S. (2017, September). Induction motor fault diagnosis using ANFIS based on vibration signal spectrum analysis. In 2017 3rd International Conference on Frontiers of Signal Processing (ICFSP) (pp. 105-108). IEEE.
- Ballal, M. S., Khan, Z. J., Suryawanshi, H. M., & Sonollikar, R. L. (2007). Adaptive neural fuzzy inference system for the detection of inter-turn insulation and bearing wear faults in induction motor. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 54(1), 250-258.
- Faiz, J., & Mazaheri-Tehrani, E. (2017). A novel demagnetization fault detection of brushless DC motors based on current time-series features. In 2017 IEEE 11th International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED) (pp. 160-166). IEEE.
- Yilmaz, M. S., & Ayaz, E. (2009, May). Adaptive neuro-fuzzy inference system for bearing fault detection in induction motors using temperature, current, vibration data. In IEEE EUROCON 2009 (pp. 1140-1145). IEEE.
- Hanselman, D. C. (2003). Brushless permanent magnet motor design. The Writers' Collective.
- Goktas, T., Zafarani, M., & Akin, B. (2016). Discernment of broken magnet and static eccentricity faults in permanent magnet synchronous motors. IEEE Transactions on Energy Conversion, 31(2), 578-587.

7. BIOGRAPHIES (OPTIONAL)



Kreangsuk Kraikitrat
Graduation B.Eng. (Electrical Engineering), and M.Eng. (Electrical Engineering), and Ph.D. (Electrical Engineering) respectively at Naresuan University. Currently working as a professor at the Department of Electrical Engineering Faculty of Engineering, University of Phayao. Bunyarit Wangngon



Graduation B.Eng. (Electrical Engineering), and M.Eng. (Electrical Engineering), and Ph.D. (Electrical Engineering) respectively at Naresuan University. Currently working as a professor at the Department of Electrical Engineering Faculty of Technology Lanna Phitsanulok.

Applying Multidomain Matrix to Develop Communication Structure for Custom Home Design and Building Projects

Kusol Pimapunsri

Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Bangkok, Thailand

corresponding author e-mail: kusol.p@eng.kmutnb.ac.th

(Received: 24 June 2021, Revised: 24 August 2021, Accepted: 10 November 2021)

Abstract

The custom home is one of the most complex projects. It involves several disciplines and teams, including internal and external organizations, during the project life cycle. There is information exchange continuously across the teams and often necessary to iterate back and forth between phases. Communication is thus the key to effective project management. This paper deals with the complex structure of the project communication of custom home projects. The objective of this paper is to develop the communication structure for the custom home design and building industry. MDM (Multidomain Matrix) was chosen to address the issue of complex communication processes among teams involved in the project. The four domains; phase, team, activity, and document; were taken into account for forming the MDM. The developed MDM represents team coordination, workflow (activities), and data flow in each phase. It helps support the development of the prototype web-based application for defining data flow, access authorization, and the project communication structure. The results of the testing of the prototype web-based application with the pilot project show that it reduced the lead time of getting information from 3-5 days to 1 day and the number of missing requests is reduced to zero.

Keywords: MDM, DSM, Project communication, Custom home, Construction project.

1. INTRODUCTION

A project is considered complex in nature. There are various disciplines and organizations (teams, groups, and individuals) that get involved during the project life cycle. Every team has its view, limits, and constraints regarding its framework. This different perspective leads to diverse priorities and sequences for executing their tasks. Yet, they might work from different locations and working times. This challenges the project manager to coordinate and integrate them working together and be on the same page at any time of the project.

Construction is often described as a complex process. Many researchers have explored the design phase of a construction project (Maheswari and Varghese, 2005; Maheswari et al., 2006; Senthikumar et al., 2010; Dehghan and Ruwanpura, 2011; Krinner et al., 2011; Mujumdar et al., 2014; Dehghan et al., 2015; Mujumdar and Maheswari, 2018). The design phase is the focal point of the project life cycle that every team should pay attention to before the construction phase. But in reality, many projects started construction before the design was completed. Custom home design and building project is one of those. The construction phase typically begins just after the building permit has been approved and is performed parallelly in the detailed design phase. One major characteristic of a custom home project is that it is not a linear pattern. It is a custom-made project designed to meet the needs of the client (the project owner) and often necessary to iterate back and forth between phases.

It allows the client to get involved at any time during the project life cycle to get and satisfy their requirements as much as possible. On one hand, this distinctive character is a strength of the custom home design and building industry. On the other hand, it often leads to increase change requests (scope changes, improvement changes) from the client. It would generate additional burdens and confusions for whom it concerns. For instance, if the client requests to add a bathtub in a bathroom, it regularly affects the design team, procurement team, cost estimator, planner, and building (installation) team. Moreover, there might be some unforeseen events during the construction such as technical problems, limits, and constraints that might enforce to change the original design, the drawing for construction, and the project baseline. In this circumstance, if these information exchanges are not identified and distributed to the related teams, it can lead to unexpected mistakes and reworks. If we draw a communication network of a custom home project to depict communications among people (nodes), it can be illustrated in Figure 1. Furthermore, this abundant information exchange does not exist only in the design and the construction phases but occur continuously since the first step of the contracting process through the project closing. In this study, Multidomain Matrix (MDM) was chosen to address the issue of complex information exchange across organizations.

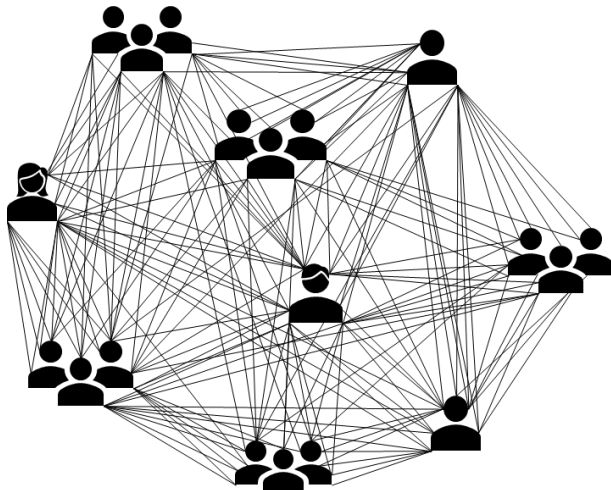


Figure 1 A communication network represented by a node-link diagram.

Design Structure Matrix (DSM) is a square matrix that is used to represent relationships between elements in a system, project, or process. It was first introduced by Steward (1981) in the 1960s then further developed by Browning (2001), Browning (2016), Yassine (2004), and many researchers. It has been widely used for managing complex systems, product development, project management, organization design, etc.

MDM is an extension of DSM. It combines and represents simultaneously two or more DSM models in different domains. Each DSM is on the diagonal of MDM and the off the diagonal blocks are Domain Mapping Matrix (DMM). DSM represents the interactions among the elements of the domain. DMM is a matrix mapping the domain of one DSM to the domain of another DSM (Eppinger and Browning, 2012). DMM has been widely applied to map across domains e.g., Quality Function Deployment (QFD) originated by Yoji Akao uses as the relationship matrix in the four-phase model (Hauser and Clausing, 1988). Axiomatic Design (AD) (Suh, 2001) uses for mapping between the customer, functional, physical, and process domains in the design of mechanical systems. Responsibility Matrix (RM) in project management (Larson and Gray, 2021).

The objective of this paper is to develop the communication structure for the custom home design and building industry. To reduce the issues of missing information and communication lead time during the project management. It applied MDM to develop the project communication structure that concerns various disciplines and organization units, processes, activities, documents, and information. It is organized into four sections. Following this introduction, the second section explains the proposed structured approach for forming an MDM for a project communication structure. The third section presents the MDM development of a project communication structure and the prototype web-based application for a case study custom home company. The

fourth section discusses the conclusion and the scope for future work.

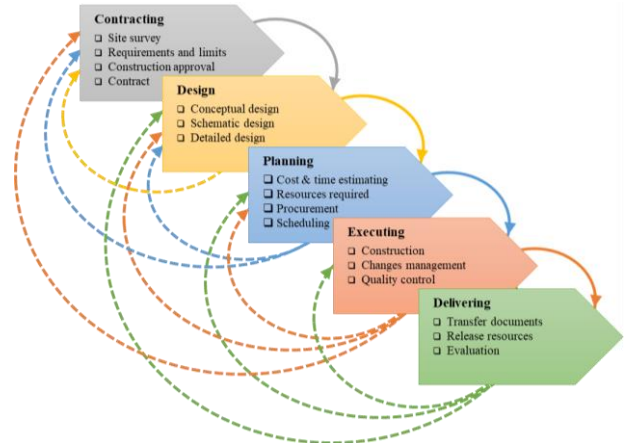


Figure 2 Life cycle of a custom home project.

2. METHODOLOGY

In general, the life cycle of a custom home design and building project can be divided into five phases as illustrated in Figure 2. It is common to go through phases and back and forth again to account for changes or new information gained. This abundant information is exchanged among and across the organization, internal and external, through the project communication channels. The project communication plan is thus critical to the project's success. The project communication plan commonly defines the frequency and manner of communication with project stakeholders and those who are affected by the project. It is expected to ensure that all stakeholders keep informed necessary information and help them work together cohesively through the project. In practice, however, with thousands of information exchange back and forth across several organizations, it is hard to identify and clarify to all related individuals. Accordingly, MDM was chosen to develop the project communication structure for a custom home project. The procedures of building the MDM for the project communication structure are briefly portrayed as shown in Figure 3. The section elaborates on the methodology for building the MDM.

2.1 Identify the domains in MDM

This process is a top-down approach that explores the domains forming the MDM. This first step identifies the domains concerning the project. In this paper, the author took into account four domains as follows: phase, team, activity, and document. These four domains were used to establish the communication structure of the custom home and design company.

The phase domain addresses the five phases of the project life cycle as shown in Figure 2. One phase can be divided into several sub-phases if required. The team domain illustrates the Organization Breakdown Structure (OBS) of the project. It identifies the organization units (departments, teams, individuals) who get involved in

each phase. Furthermore, it can define even individuals (the lowest level units) if necessary. The activity domain

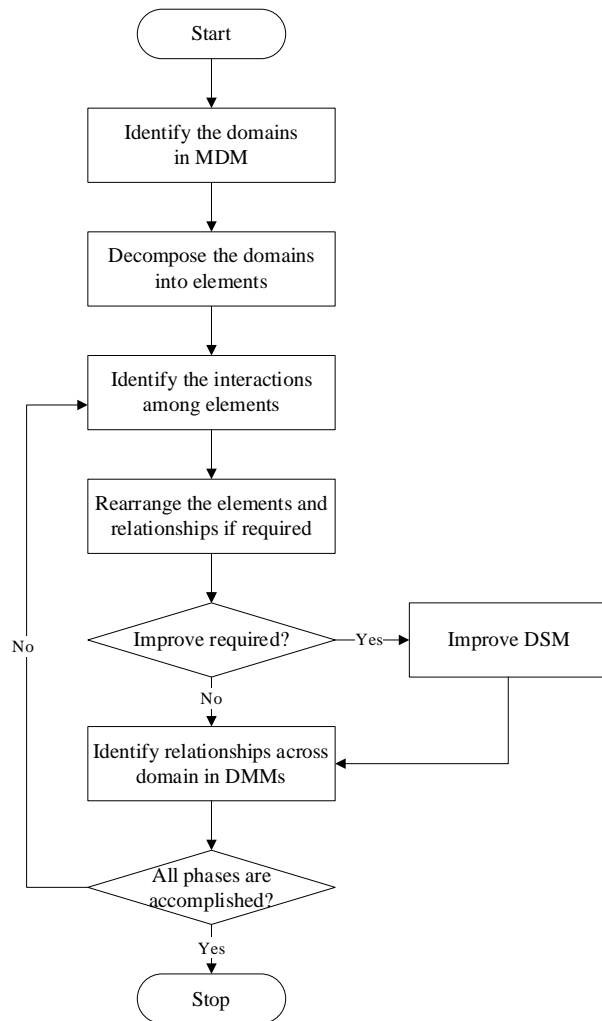


Figure 3 The approach of the proposed MDM methodology.

addresses work packages, tasks, and events occurring in each phase. Work Breakdown Structure (WBS) was used in this domain to assure that all activities of each phase are identified. The document domain is separated from the activity domain to addresses the controlled documents (associated with the activities) regarding the quality standards in construction.

2.2 Decompose the domains

This step decomposes the domains into their constituent elements. The top-down approach was used to break down the domains into units, activities, or entities perhaps through several hierarchical levels.

With the numerous elements of the project, this study considered one phase at a time to avoid confusion of abundant information. Select a phase (or a sub-phase) and draw a square matrix (1x1) labeling the row and the column with the selected phase. Then decompose the successor domain (team domain) its constituent

organization units involved in the phase. Draw a square matrix with empty cells labeling the rows and the columns with its elements (organization units). Repeat this step for the activity and document domains. Then combine the square matrices of the four domains into a larger model by placing them on the diagonal to form an MDM, as illustrated by example in Figure 4. This hypothetical example MDM consists of one phase (P1); two teams (T1 and T2), three activities (A1, A2, and A3), and four documents (D1, D2, D3, and D4).

2.3 Identify the interactions

The bottom-up approach was used from this step forward. It begins with the document domain (lowest domain). This step establishes relationships among the elements of each domain for forming a DSM. The relationships are represented by the 'X' mark in the cells. This step requires brainstorming of experts and/or the persons who are working on that domain to obtain reliable information and minimal inputs.

2.4 Rearrange the elements and relationships

If there are any feedback marks ('X') in the upper triangular matrix, they should be rearranged to the lower triangular matrix to avoid any feedback loops or coupled blocks. Otherwise, skip this step.

2.5 Improve DSM (if required)

In case that there are feedback loops or coupled blocks in any DSM after rearrangement. That DSM might need to be improved. However, this step regularly requires the experts to check for the appropriateness of 'X' marks. Some methods are widely used at present, depending on the architecture DSM, e.g., clustering, partitioning, aggregation, tearing, etc. These methods are described elaborately in Eppinger and Browning (2012). Otherwise, go to the next step.

2.6 Identify relationships across domain

As mentioned earlier that DMM is a matrix mapping between two domains. It allows establishing the relationships of the elements of one domain to the elements of another domain. This paper proposed the project communication structure for the custom home project as illustrated in Table 1.

This step began from the Document DSM, the relationships in the Document-Activity DMM define which documents (information) are required for which activities in the Activity domain. While the relationships in the Activity-Document DMM define which documents are produced by which activities. Once these two DMMs have been accomplished, repeat steps 2.3-2.6 for the preceding domains (activity, team, and phase) to complete the entire MDM model.

The essence of mapping across the domains (DMMs) is to ensure that the people in the project know 'what' they get involved in, in which way, and with whom. Therefore, a RACI (Responsible, Accountable, Consult

and Inform) chart was applied to define the interactions for the DMMs which are concerned with people (the team domain). The RACI chart is a useful tool to ensure clear

assignment of roles and responsibilities when the project consists of various disciplines and teams (PMI, 2017).

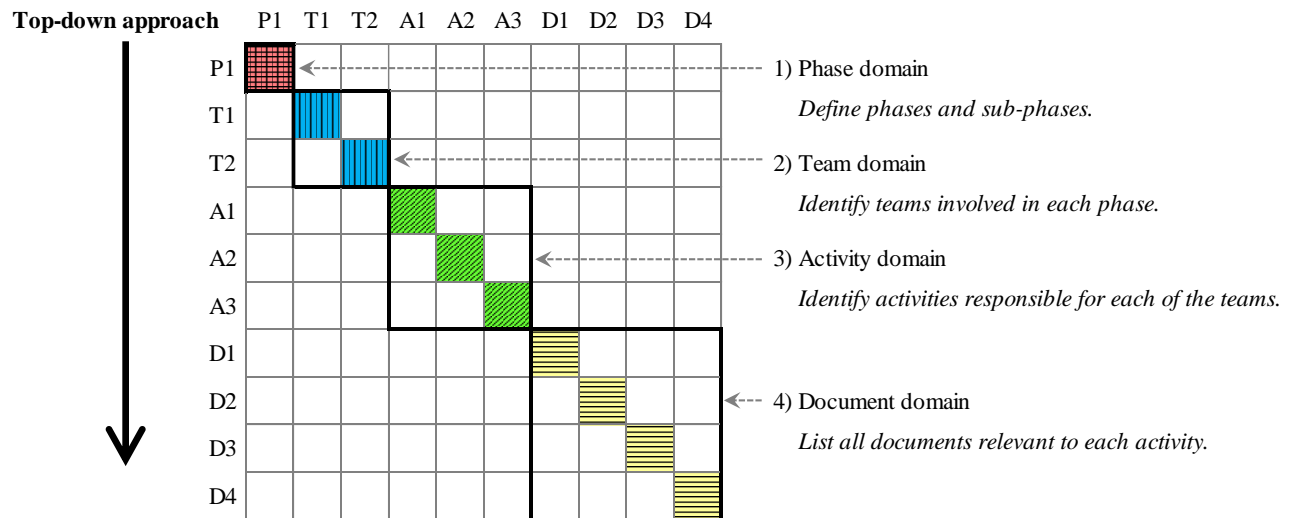


Figure 4 Decompose the four domains for forming the MDM.

Table 1 Structure of DSMs and DMMs for forming MDM.

Phase DSM <ul style="list-style-type: none"> Identify the interactions among phases of the project. 	Team-Phase DMM <ul style="list-style-type: none"> Identify the roles (I) of the teams required in each phase. 		
Phase-Team DMM <ul style="list-style-type: none"> Identify the roles (R, A, C) of the teams required in each phase. 	Team DSM <ul style="list-style-type: none"> Identify the interactions among organization units (departments, teams, and individuals). 	Activity-Team DMM <ul style="list-style-type: none"> Identify the activities (output) required for the teams. 	Team-Document DMM <ul style="list-style-type: none"> Identify documents (information) associated with the activities required for teams.
	Team-Activity DMM <ul style="list-style-type: none"> Identify the activities produced by the teams. 	Activity DSM <ul style="list-style-type: none"> Identify the interactions among activities. 	Document-Activity DMM <ul style="list-style-type: none"> Identify documents (information) required for activities.
	Team-Document DMM <ul style="list-style-type: none"> Identify the documents associated with the activities produced by the teams. 	Activity-Document DMM <ul style="list-style-type: none"> Identify the documents produced by the activities. 	Document DSM <ul style="list-style-type: none"> Identify the interactions among documents.

The relationships in those DMMs are labeled with 'R', 'A', 'C', or 'I' depending on the role of the teams. For the other DMMs that do not concern people, the relationships are labeled with 'X'. Figure 5 shows the procedures for forming the hypothetical example MDM of a single phase.

3. MDM DEVELOPMENT AND CASE STUDY

The proposed methodology was tested with a case study custom home design and building company. This section brought a part of the developed MDM to demonstrate the early phases of the project

communication structure of the company. Figure 6 illustrates the project communication structure in the early phases of the company. As mentioned earlier that the custom home project is often necessary to iterate back and forth. This MDM highlights the two feedback loops in the Activity DSM. The first loop is the cycle of conceptual design analysis. This design iteration attempts to extract the true needs of the client and constraints as much as possible. The other design iteration loop attempts to validate the conceptual design before going to the detail design stage. Though the client is the owner, they must be engaged and takes part in the project. The Team

DSM portrays obviously that all teams have to work together to accomplish the tasks. It is noticed that the Document DSM was rearranged due to the feedback

marks in the upper triangular matrix. As a result, there are no more feedback loops in the document domain.

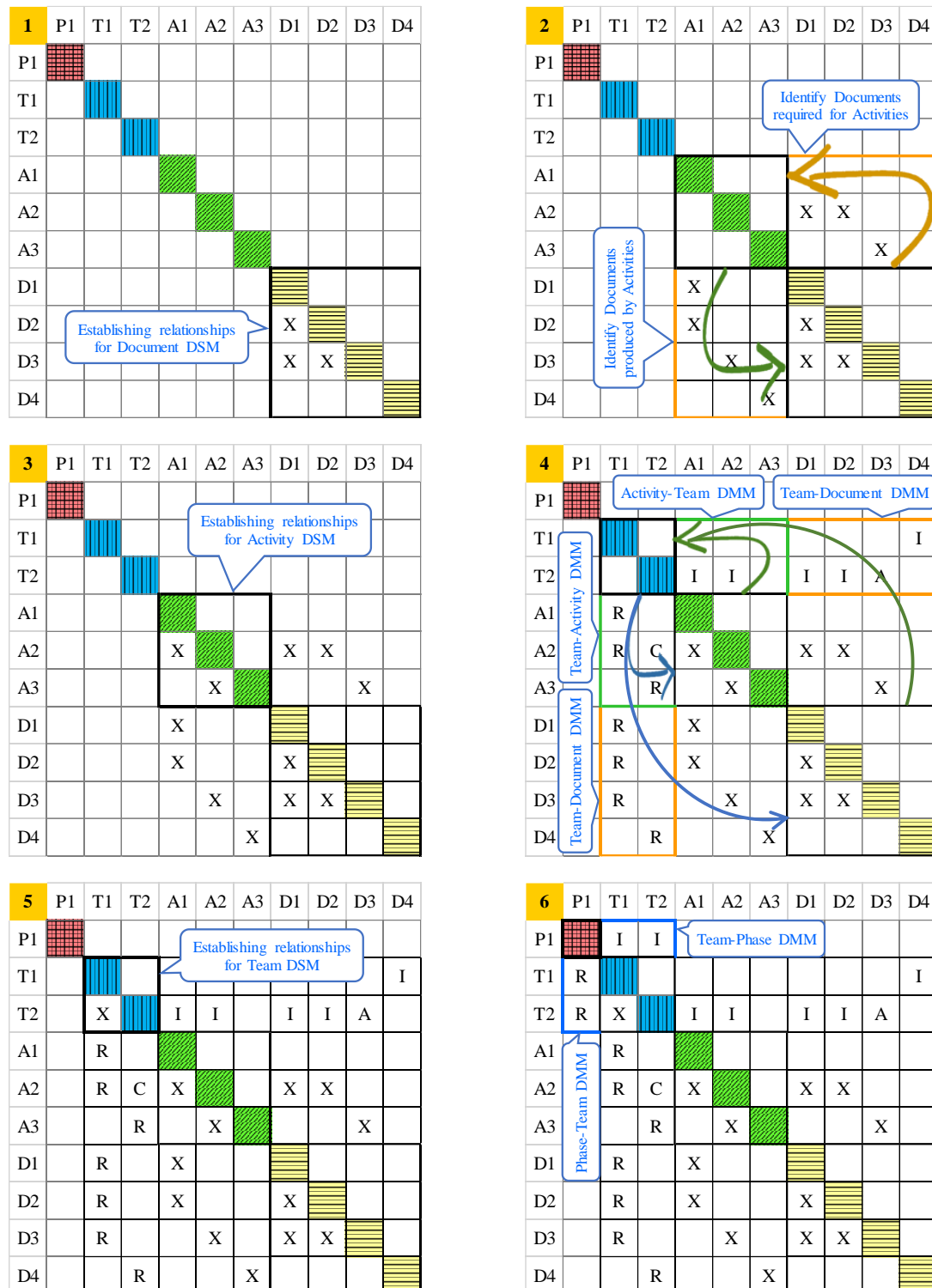


Figure 5 MDM Methodology for the project communication structure.

	P1	P2	T1	T2	T3	T4	A1	A2	A3	A4	A5	A6	D1	D3	D2	D4	D6	D8	D5	D7	D9	D11	D13	D10	D12				
P1	<div></div>	<div></div>	<div></div>	<div></div>	<div></div>	<div></div>	<div>Design iteration: conceptual design analysis</div>																			P1	Contracting phase		
P2	<div></div>	<div></div>	<div></div>	<div></div>	<div></div>																						P2	Design phase	
T1	<div></div>	<div></div>	<div></div>	<div></div>	<div></div>	<div></div>												<div></div>				<div></div>	<div></div>	<div></div>	<div></div>	<div></div>	<div></div>	T1	Client (project owner)
T2	<div></div>	<div></div>	<div></div>	<div></div>	<div></div>	<div></div>				<div></div>	<div></div>				<div></div>	<div></div>		<div></div>	<div></div>	<div></div>					<div></div>			T2	Sales team
T3	<div></div>	<div></div>	<div></div>	<div></div>	<div></div>	<div></div>							<div></div>	<div></div>	<div></div>													T3	Architect team
T4	<div></div>	<div></div>	<div></div>	<div></div>	<div></div>	<div></div>						<div></div>	<div></div>				<div></div>	<div></div>									T4	Project manager team	
A1				<div></div>	<div></div>	<div></div>	<div></div>	<div></div>	<div></div>				<div></div>	<div></div>													A1	Site survey	
A2			<div></div>	<div></div>	<div></div>	<div></div>	<div></div>	<div></div>	<div></div>						<div></div>												A2	Requirements & necessary info' (client meetings)	
A3			<div></div>		<div></div>	<div></div>	<div></div>	<div></div>	<div></div>	<div></div>	<div></div>	<div></div>		<div></div>	<div></div>												A3	Conceptual design & draft detail design	
A4					<div></div>	<div></div>		<div></div>	<div></div>	<div></div>	<div></div>	<div></div>					<div></div>	<div></div>									A4	Cost estimating	
A5			<div></div>	<div></div>				<div></div>	<div></div>	<div></div>	<div></div>	<div></div>							<div></div>								A5	Price quoting	
A6			<div></div>	<div></div>				<div></div>	<div></div>	<div></div>	<div></div>	<div></div>		<div></div>		<div></div>	<div></div>	<div></div>			<div></div>	<div></div>	<div></div>	<div></div>	<div></div>	<div></div>		A6	Contract signing
D1			<div></div>				<div></div>						<div></div>														D1	General requirements form	
D3			<div></div>										<div></div>	<div></div>	<div></div>												D3	Copy of land title deed	
D2						<div></div>	<div></div>						<div></div>	<div></div>	<div></div>	<div></div>											D2	Site survey form	
D4				<div></div>	<div></div>	<div></div>		<div></div>									<div></div>	<div></div>									D4	Client meeting notes	
D6			<div></div>		<div></div>	<div></div>		<div></div>	<div></div>				<div></div>	<div></div>	<div></div>	<div></div>	<div></div>	<div></div>									D6	Conceptual design (for sales)	
D8			<div></div>		<div></div>		<div></div>	<div></div>									<div></div>	<div></div>								D8	List of general equipment and materials		
D5					<div></div>	<div></div>			<div></div>								<div></div>	<div></div>	<div></div>								D5	Estimated project cost	
D7			<div></div>	<div></div>			<div></div>						<div></div>							<div></div>							D7	Building agreement	
D9			<div></div>	<div></div>						<div></div>									<div></div>		<div></div>	<div></div>	<div></div>	<div></div>	<div></div>	<div></div>		D9	Quotation
D11			<div></div>	<div></div>						<div></div>										<div></div>		<div></div>	<div></div>	<div></div>	<div></div>	<div></div>		D11	Invoice
D13			<div></div>			<div></div>					<div></div>						<div></div>						<div></div>	<div></div>	<div></div>	<div></div>		D13	Delivery plan
D10			<div></div>	<div></div>							<div></div>		<div></div>	<div></div>		<div></div>	<div></div>	<div></div>					<div></div>	<div></div>	<div></div>	<div></div>		D10	Contract documents
D12				<div></div>							<div></div>											<div></div>		<div></div>	<div></div>	<div></div>		D12	Receipt

Figure 6 MDM of the case study custom home design and building company.

The developed MDM represents team coordination, workflow (activities), and data flow in each phase. At this stage, data flow diagrams (DFD) were written to portray the direction and the flow of data/information that occurred during the project. Figure 7 presents the level 1 DFD that draws the main processes of a project. Figure 8 shows by example a level 2 DFD of the contracting process. This level 2 DFD draws the activities and documents (data store, D) of each process of the project.

The contributions of the MDM and DFD are dedicated to the project communication structure in two aspects. 1) it helps develop a comprehensive responsibility assignment matrix (RAM) for the project. Regarding the DMMs relating to the Team DSM, it helps the teams in the project know what to do, what they get involved in, in which way, and with whom. 2) it helps define different levels of authorization to the teams to access documents and information, excluding the client and people who are outside of the company.

This study applied the taxonomy of the knowledge model proposed by Tichkiewitch and Gaucheron (2000), the entities (documents and information) in the document domain can be classified into three types as follow:

1) Vernacular entity: the documents which are produced and owned by one team. Other teams cannot access such documents.

2) Vehicular entity: the documents which are produced by one team and significantly required for another team(s).

3) Universal entity: the documents which are produced by one team and are accessible for every team in the project.

This paper developed a prototype of a web-based application to demonstrate the proposed project communication structure with the case study company. The access authorization of the documents is classified as follows: create (C), delete (D), edit (E), and view (V). Regarding the MDM and DFD, an example of the defined authorization levels is shown in Figure 9. The prototype allows defining the authorization level of operations on the controlled documents for each team as shown in Figure 10. Yet, the notification system was added to the web-based application to ensure that the teams be on the same page of the project. The developed MDM helps to design the communication structure among the teams for setting the notification. Figure 11 shows an example (document) of the client meeting note using to record any changes and/or update information then distribute to whom it concerns (RACI: responsible, accountable, consult, inform). Regarding the communication structure, the system notifies instantly the teams know what to do, what they get involved in which subject and with whom.

The case study company uses the paper-and-pencil approach to record information as a method for formal communication and uses social applications for informal communication. This approach takes a long lead time for getting documents. The teams often get confused or missing some information during the communication.

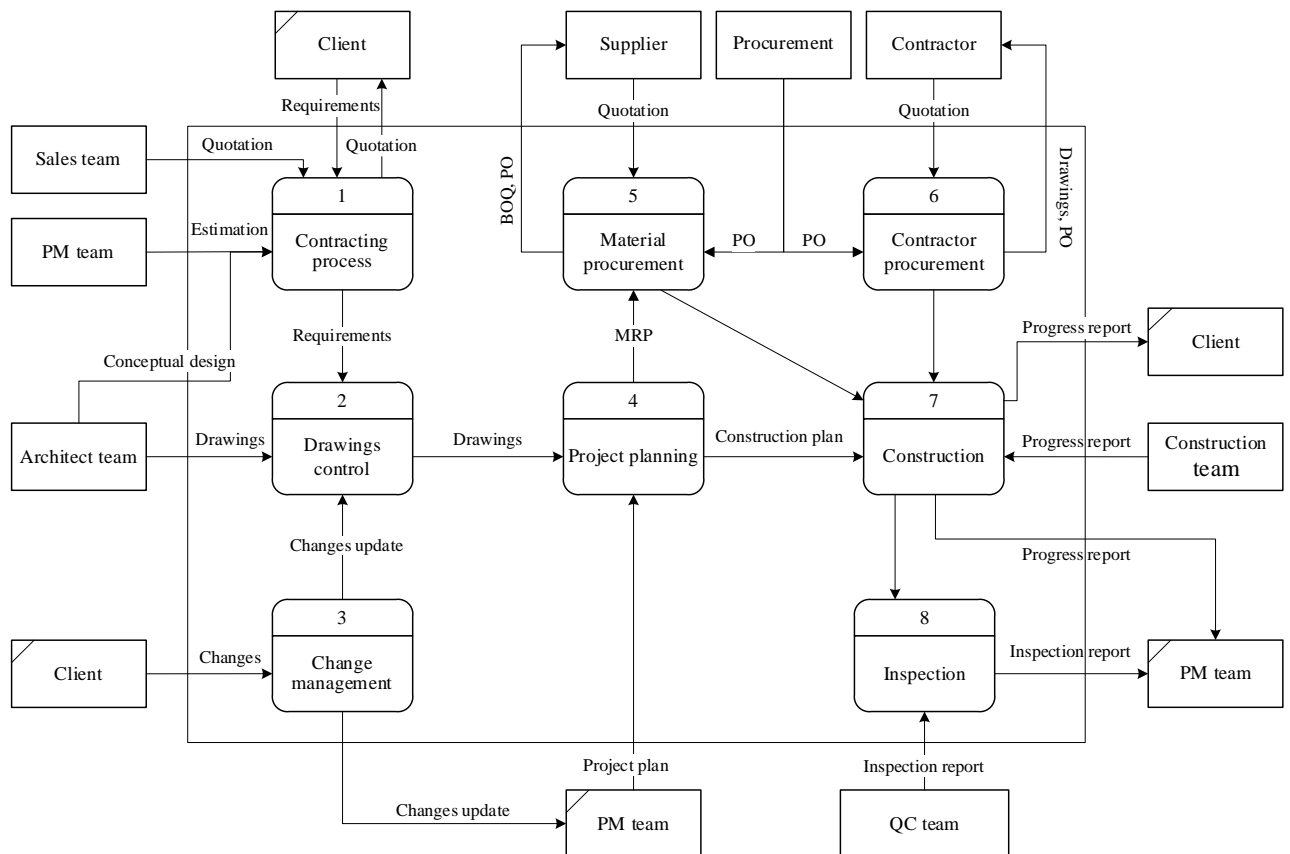


Figure 7 Level 1 DFD.

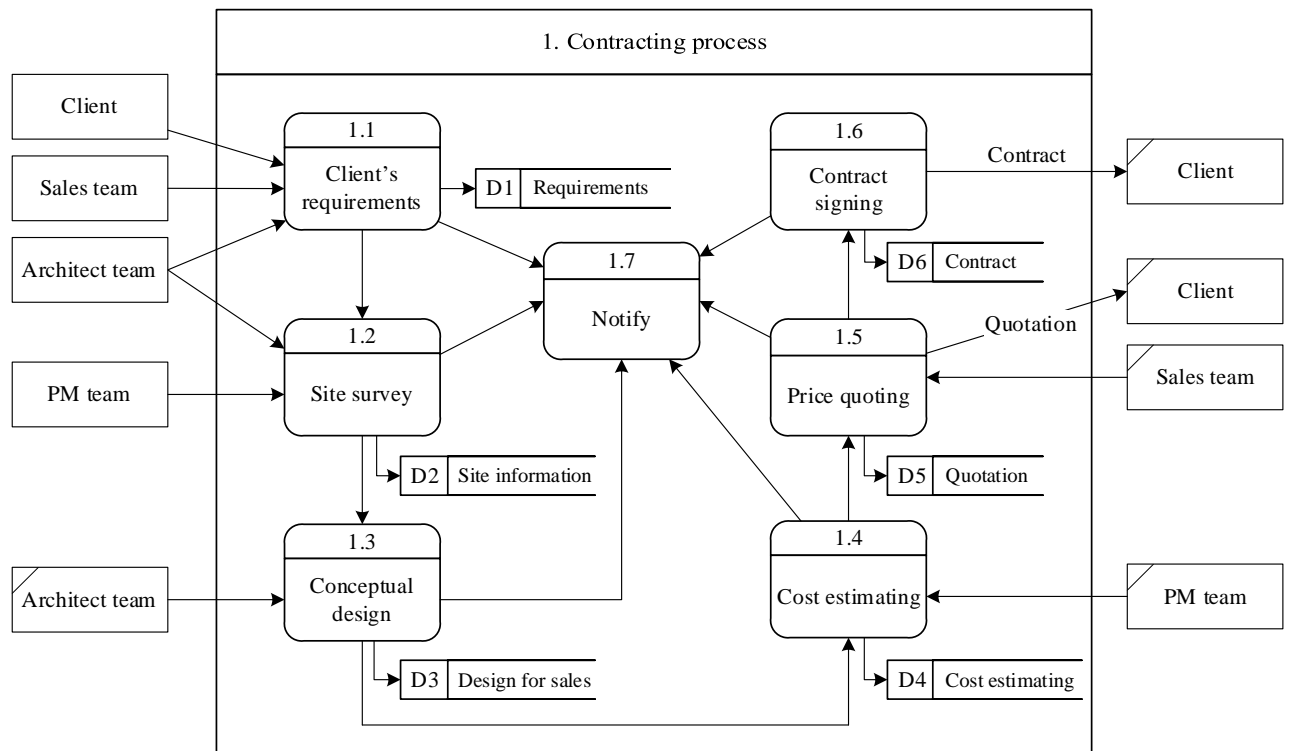


Figure 8 Level 2 DFD.

Controlled documents	General requirements form	Copy of land title deed	Site survey form	Client meeting notes (contracting phase)	Conceptual design (for sales)	...	Construction drawings	Materials purchasing	Client meeting notes (executing phase)	Construction progress (daily report)	Project status	Quality control and inspection	...
Operations	Create View Edit Delete	Create View Edit Delete	Create View Edit Delete	Create View Edit Delete	Create View Edit Delete	Create View Edit Delete	Create View Edit Delete	Create View Edit Delete	Create View Edit Delete	Create View Edit Delete	Create View Edit Delete	Create View Edit Delete	Create View Edit Delete
Sales team	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Architect team	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Project manager team	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Procurement team													
Construction team													
QC team													

Figure 9 User access authorization of the project communication structure.

Figure 10 User access control and authorization levels.

Figure 11 Example of client meeting note.

There is an average of 30-40 requests for change (additional works and deduction works) for a project. Subsequently, there is an average of 20-30 design updates. It usually takes 3-5 days, excluding the processing time of each operation, to deliver documents and to communicate between teams through the process. In addition, there is an average of 10% of those requests that are missed during the communication process.

The prototype web-based application has been tested with a pilot project of the case study company. The web-based application allows the user to fill in the information in the electronic document and instantly distribute it to the person(s) who are concerned. The results to date show that it can reduce the lead time of getting information from 3-5 days to 1 day and the number of missing requests is reduced to zero.

4. CONCLUSION

This paper focused mainly on the development of the project communication for custom home design and building projects. The proposed method can be applied to develop the communication structure for any custom home design and building company. The four domains (phase, team, activity, and document) were considered in

this study. MDM methodology was applied to manage the complex communication structure. DSM was used to represent the constituent elements and interactions among its elements for each domain while DMM was used to map the relationships between the domains. While applying the MDM for the case study company, the author and the company team found that it significantly helps in developing the project communication structure. It allows the participants to perceive the holistic view of the project and the current company's workflow. Yet, it unfolded the complex communication network into a simple representation. Subsequently, some unnecessary entities (activities and documents) were eliminated or revised then rearranged in the proper sequence. DFD was used to clarify the flow of data and information of the communication structure. The developed MDM and DFD defined the permissions granted to each team with different authorization levels. As a result, the prototype web-based application set a user's authorization levels regarding the developed MDM and DFD.

The further study will focus on the extension of the MDM model to take into account in detail the product domain, design parameters, and quality control of construction work. The technical problems in the design and construction phases will be addressed.

5. Acknowledgment

The author would like to acknowledge the Faculty of Engineering, King's Mongkut University of Technology North Bangkok, contract no. ENG-61-35, for financial support to execute this work.

6. REFERENCES

- Browning, T. R. (2001). Applying the Design Structure Matrix to System Decomposition and Integration Problems: A Review and New Directions. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 48(3), 292-306. DOI: 10.1109/17.946528
- Browning, T. R. (2016). Design Structure Matrix Extensions and Innovations: A Survey and New Opportunities. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 63(1), 27-52. DOI: 10.1109/TEM.2015.2491283
- Dehghan R. & Ruwanpura J. (2011). The Mechanism of Design Activity Overlapping in Construction Projects and the Time-Cost Tradeoff Function. *Procedia Engineering*, 14, 1959-1965. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.07.246>
- Dehghan, R., Hazini K., & Ruwanpura, J. (2015). Optimization of overlapping activities in the design phase of construction projects. *Automation in Construction*, 59, 81-95. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2015.08.004>
- Eppinger, S. D., & Browning, T. R., (2012). *Design Structure Matrix Methods and Applications*. MIT Press.
- Hauser, J. R., & Clausing, D. (1988, May). The House of Quality. *Harvard Business Review*. <https://hbr.org/1988/05/the-house-of-quality>
- Krinner, M., Elezi, F., Tommelein, I. D., & Lindemann, U. (2011). Managing Complexity in Lean Construction Design – Using the MDM Methodology to Create Organizational Modularity. In: Eppinger, S. D., Maurer, M., Eben, K., & Lindemann, U. (Eds.), *Civil Engineering* (pp. 377-390). The Design Society.
- Larson, E. W., & Gray, C. F., (2021). *Project Management: The Managerial Process* (8th ed.). McGraw-Hill.
- Maheswari, J. & Varghese, K. (2005). A Structured Approach to Form Dependency Structure Matrix for Construction Projects. *Proceedings of the 22nd International Symposium on Automation and Robotics in Construction, Ferrara, Italy*, 1-6. <https://doi.org/10.22260/ISARC2005/0062>
- Maheswari, J., Varghese, K. & Sridharan, T. (2006). Application of Dependency Structure Matrix for Activity Sequencing in Concurrent Engineering Projects, *Journal of Construction Engineering and Management*, 132(5), 482-490. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9364\(2006\)132:5\(482\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(2006)132:5(482))

- Mujumdar, P., Muraleedharan, P., & Maheswari, J. (2014). Structured Methodology for Applying Multiple Domain Matrices (MDM) to Construction Projects. In: Marle, F., Jankovic, M., Maurer, M., Schmidt, D.M., & Lindemann, U. (Eds.), *Managing Multiple Domains in Complex Projects* (pp. 299–308). Carl Hanser Verlag.
<https://doi.org/10.3139/9781569904923.029>
- Mujumdar, P. & Maheswari, J. (2018). Design iteration in construction projects – Review and directions. *Alexandria Engineering Journal*, 57(1), 321-329.
<https://doi.org/10.1016/j.aej.2016.12.004>
- PMI, (2017). *A Guide to the Project Management Body of Knowledge* (6th ed.), Project Management Institute, Inc.
- Senthilkumar, V., Varghese, K., & Chandran, A. (2010). A web-based system for design interface management of construction projects. *Automation in Construction*, 19(2), 197-212.
<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2009.10.007>
- Steward, D. V. (1981). The Design Structure System: A Method for Managing the Design of Complex Systems. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 28, 71-74. DOI: 10.1109/TEM.1981.6448589
- Suh, N. P. (2001). *Axiomatic Design*. Oxford University Press.
- Tichkiewitch, S., & Gaucheron, Th. (2000, May 16-18). *A Recycling View for Integrated Design in Car Manufacture* [Conference presentation]. CIRP Design Seminar-Design with manufacturing: Intelligent Design Concepts Methods and Algorithms, Haifa, Israel.
- Yassine, A. (2004). An Introduction to Modeling and Analyzing Complex Product Development Processes Using the Design Structure Matrix (DSM) Method. *Urbana.*, 51(9), 1–17.

การพัฒนาแขนหุ่นยนต์และระบบควบคุมผ่านสมาร์ทโฟนด้วยเทคนิคควบคุมการเคลื่อนที่เชิงเส้น
แบบหลายแกน

Development of Robotic Arm and Control System via Smartphone with Multi-Axis
Linear Motion Control Techniques.

สุภาพ มายาง^{1,2}, สุเมธ เหมะวัฒนะชัย^{1,2*}

Supap Mayang^{1,2}, Sumet Heamawatanachai^{1,2*}

¹ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

²หน่วยวิจัยเทคโนโลยีด้านวิศวกรรมความเที่ยงตรงและการแพทย์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

*Corresponding author: sumeth@nu.ac.th, sumet_h@yahoo.com

(Received: 27 August 2020, Revised: 2 March 2021, Accepted: 30 April 2021)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการออกแบบและพัฒนาแขนหุ่นยนต์ 6 แกน เพื่อช่วยหยิบสิ่งของขนาดเล็ก เช่น กระจุกยา และรีโมททีวี ซึ่งสามารถควบคุมแขนหุ่นยนต์ ด้วยแอปพลิเคชันบนสมาร์ทโฟนผ่านสัญญาณบลูทูธ และ Wi-Fi พร้อมกับแสดงภาพจากกล้องที่ติดกับแขนหุ่นยนต์บนหน้าจอสมาร์ทโฟนได้ตามเวลาจริง โดยมีการประยุกต์นำเอาทฤษฎีจลนศาสตร์แบบไปข้างหน้าและแบบผกผัน มาวิเคราะห์หาพื้นที่ทำงานที่เหมาะสมของแขนหุ่นยนต์ และมีการพัฒนาซอฟต์แวร์เพื่อควบคุมเซอร์โวมอเตอร์หลายตัวพร้อมกัน เพื่อให้ปลายแขนหุ่นยนต์เคลื่อนที่แบบเส้นตรงตามแนวหน้า-หลัง (+x, -x) และแนวขึ้น-ลง (+y, -y) เหมาะสำหรับการควบคุมผ่านหน้าจอสมาร์ทโฟน ในการทดลองเพื่อประเมินสมรรถนะของระบบแขนหุ่นยนต์ที่ได้พัฒนาขึ้น แบ่งเป็น 2 การทดลองหลัก คือ การทดลองแรกเป็นการทดสอบความสามารถในการควบคุมมือจับของแขนหุ่นยนต์ ซึ่งผลการทดลองพบว่ามือจับสามารถเคลื่อนที่ได้ตามขอบเขตพื้นที่ทำงานตามกำหนด และการทดลองที่สองเป็นการทดสอบด้านระยะเวลาที่ใช้ในการควบคุมแขนหุ่นยนต์เพื่อหยิบจับสิ่งของ จากผลการทดลองพบว่า การควบคุมแบบเคลื่อนที่เชิงเส้นแบบหลายแกนที่พัฒนาขึ้นมาในงานวิจัยนี้ใช้เวลาน้อยกว่าประมาณ 86% เมื่อเทียบกับการควบคุมแบบทีละข้อต่ออิสระ

คำสำคัญ: แขนหุ่นยนต์, จลนศาสตร์แบบไปข้างหน้าและแบบผกผัน

Abstract

This paper is a design and development of a 6-axis robot arm that can pick up small objects, such as pill boxes and TV remotes, etc. The robot arm is controlled by an application on a smartphone via Bluetooth and Wi-Fi and can show images from the camera attached to the arm on the phone's screen in real-time. The theory of forward and inverse kinematics was applied to analyze the appropriate working area of the robot arm. In order to make the system suitable for control via a smartphone's screen, the software in this research was developed to be able to control multiple servo motors simultaneously to move the gripper of the robot arm linearly, forwards-

backwards (+x, -x) and in up-down directions (+y, -y). There were two main experiments to evaluate the performance of the system. The first was to test the movement ability of the arm, and the results showed that it was able to move within the specified working area. The second examined the amount of time spent manipulating the robot arm to pick up objects. From the result of this experiment, it was found that the multi-axis linear motion control technique developed in this research, was approximately 86% less time consuming than the independent single-joint control technique.

Keywords: Robot Arm, Forward and Inverse Kinematics

1. บทนำ

ปัจจุบันโลกกำลังก้าวเข้าสู่สังคมผู้สูงอายุ จากรายงานของมูลนิธิสถาบันวิจัยและพัฒนาผู้สูงอายุไทยระบุว่าในปี พ.ศ. 2561 ประเทศไทยมีประชากรผู้สูงอายุ ประมาณ 12 ล้านคน คิดเป็นร้อยละ 18 ของประชากรทั้งหมดในประเทศ (Situation of the Thai elderly 2018, 2019) ซึ่งกลุ่มคนประเภทดังกล่าว มักมีปัญหาทางด้านการช่วยเหลือตัวเอง เช่น การเดิน การหยิบตัว รวมถึงการหยิบจับสิ่งของ การเพิ่มสูงขึ้นของผู้สูงอายุ และผู้ป่วยติดเตียงนั้น ส่งผลทำให้ขาดบุคลากรทางการแพทย์ และมีจำนวนบุคลากรไม่เพียงพอต่อความต้องการ ทำให้เกิดการดูแลที่ไม่ทั่วถึง ส่งผลกระทบต่อสภาวะความเป็นอยู่ที่ดีของกลุ่มบุคคลทั้งสองประเภท อีกทั้งยังเป็นสาเหตุทำให้ ค่าดูแลรักษาทางการแพทย์ในระดับประเทศเพิ่มขึ้น เพื่อเป็นการทดแทนบุคลากร และสนับสนุนการดำเนินงานทางการแพทย์ ในการส่งเสริมคุณภาพชีวิตที่ดีขึ้นของผู้ป่วย ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการนำเทคโนโลยีด้านหุ่นยนต์มาใช้ในการช่วยเหลือผู้ป่วย เพื่อที่จะรองรับการเข้าสู่สังคมผู้สูงอายุ และผู้ป่วยติดเตียงได้อย่างสมบูรณ์ แต่ในปัจจุบันหุ่นยนต์ในท้องตลาดยังมีราคาที่สูง จึงทำให้คนส่วนใหญ่ไม่สามารถจะจัดหาใช้งานได้

ในปัจจุบันเทคโนโลยีของหุ่นยนต์เจริญก้าวหน้าอย่างก้าวกระโดด และเริ่มเข้ามามีบทบาทกับชีวิตของมนุษย์ในด้านต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นอุตสาหกรรมการผลิต งานสำรวจ การเกษตร และการแพทย์ (Robotics for Aging Society, 2019) ในงานวิจัยนี้ศึกษาการนำแขนหุ่นยนต์มาประยุกต์ใช้ในการ

ช่วยเหลือผู้ป่วย เพื่อเพิ่มความสะดวกสบายให้กับผู้ป่วย รวมทั้งเป็นส่วนหนึ่งในการลดปัญหาในเรื่องของการขาดแคลนบุคลากรทางการแพทย์ จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า แขนหุ่นยนต์สามารถนำมาใช้งานได้อย่างหลากหลาย ในงานวิจัยของ Jung and Bae (2015) ได้นำเอาหลักการจลนศาสตร์แบบไปข้างหน้า (Forward Kinematics) และจลนศาสตร์แบบผกผัน (Inverse Kinematics) มาวิเคราะห์หาพื้นที่การทำงานของแขนหุ่นยนต์ เพื่อใช้ในการบำบัดผู้พิการ ช่วยในการพยุงและฝึกการเคลื่อนไหวของแขน งานวิจัยของ Rahul et al. (2019) ได้ทำการออกแบบและพัฒนาแขนหุ่นยนต์เคลื่อนที่ในแนวระนาบ เพื่อใช้ในการจัดเรียงกระถางกระดาของต้นกล้า ซึ่งทำงานร่วมกับสายพานลำเลียง โดยใช้หลักการจลนศาสตร์แบบไปข้างหน้าและแบบผกผัน ในการหาพื้นที่ทำงานของแขนหุ่นยนต์ งานวิจัยของ Manikphan et al. (2010) ได้จำลองการทำงานแขนหุ่นยนต์แบบ 6 แกน โดยใช้ระบบโครงข่ายประสาทเทียม ใช้โมเดลคำนวณในรูปแบบ D-H หรือ Denavit – Hartenberg ในการวิเคราะห์การทำงานของแขนหุ่นยนต์ จำลองก่อนจะใช้สมการจลนศาสตร์แบบไปข้างหน้า ในการหาความสัมพันธ์ของข้อต่อแต่ละข้อ และงานวิจัยของ Charoenseang and Chuakong (2013) เป็นการสร้างแขนหุ่นยนต์เพื่อป้อนอาหารคนพิการ ทำงานร่วมกับระบบคอมพิวเตอร์วิชั่น ติดตั้งอยู่บนรถเข็นคนพิการ ซึ่งใช้หลักการจลนศาสตร์แบบผกผันเพื่อหาตำแหน่งของข้อต่อ

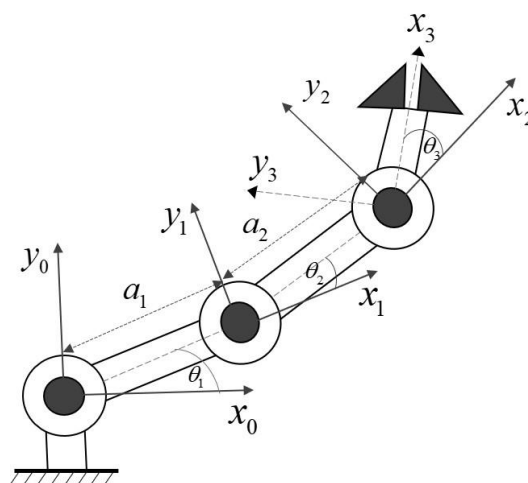
จากการศึกษาวิจัยที่ผ่านมา พบว่าหลักการจลนศาสตร์แบบไปข้างหน้า และแบบผกผัน สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับ

แขนหุ่นยนต์ เพื่อใช้งานได้อย่างหลากหลาย ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดสร้างแขนหุ่นยนต์ในราคาประหยัด ให้คนทั่วไปได้เข้าถึงเทคโนโลยีหุ่นยนต์ได้ง่ายขึ้น ซึ่งงานวิจัยนี้เป็นการออกแบบและพัฒนาแขนหุ่นยนต์เพื่อช่วยในการหยิบจับสิ่งของสำหรับผู้ป่วยติดเตียง หรือคนที่เคลื่อนไหวลำบาก เป็นการประยุกต์นำเอาทฤษฎีจลนศาสตร์แบบไปข้างหน้าและจลนศาสตร์ผกผัน เพื่อมาวิเคราะห์หาพื้นที่ทำงานของแขนหุ่นยนต์ อีกทั้งยังพัฒนาซอฟต์แวร์ให้การควบคุมแขนหุ่นยนต์ได้ง่ายขึ้น คือ ระบบควบคุมการเคลื่อนที่เชิงเส้นแบบหลายแกน (Multi-Axis Linear Motion Control -MALM Control) เป็นการควบคุมมอเตอร์หลายตัวพร้อมกัน เพื่อให้ปลายแขนหุ่นยนต์เคลื่อนที่แบบเส้นตรง เช่น แนวหน้า-หลัง (ตามแนวแกน $+x$, $-x$) และแนวขึ้น-ลง (ตามแนวแกน $+y$, $-y$) เพื่อใช้สำหรับการควบคุมผ่านหน้าจอสมาร์ทโฟน และมีการพัฒนาแอปพลิเคชันบนโทรศัพท์มือถือ ใช้ในการควบคุมแขนหุ่นยนต์ โดยมีหน้าจอที่แสดงภาพจากกล้องที่ติดอยู่กับแขนหุ่นยนต์ เพื่อให้สามารถควบคุมแขนหุ่นยนต์ได้สะดวกกว่าการควบคุมแบบที่ละข้อต่ออิสระ โดยระบบนี้สามารถควบคุมแบบไร้สายผ่านสัญญาณบลูทูธ และ Wi-Fi อีกทั้งยังสามารถแสดงภาพการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ได้ตามเวลาจริง (Real Time)

2. การวิเคราะห์แขนหุ่นยนต์

การสั่งงานให้แขนหุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่กำหนดไว้ สามารถควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ได้สองวิธี คือ การควบคุมโดยป้อนค่ามุมของข้อต่อ (Joint Angle) ให้กับแขนหุ่นยนต์โดยตรง และการควบคุมโดยการป้อนตำแหน่งของปลายแขน (End Effector) (Phanomrattanak & Pornsukvittoon, 2017) ซึ่งงานวิจัยนี้ทางผู้วิจัยได้พัฒนาระบบควบคุมการเคลื่อนที่เชิงเส้นแบบหลายแกน (MALM-Control) ซึ่งเป็นการควบคุมเซอร์โวมอเตอร์หลายตัวพร้อมกัน เพื่อให้ปลายแขนหุ่นยนต์เคลื่อนที่แนวเส้นตรงตามแนวหน้า-หลัง (แกน $+x$, $-x$) และแนวขึ้น-ลง (แกน $+y$, $-y$) ตามหน้าจอในแอปพลิเคชัน โดยในงานวิจัยนี้ได้พัฒนาแขนหุ่นยนต์ที่มี joint

angle หลักอยู่ 4 มุม คือ ส่วนของส่วนหัวไหล่ (Shoulder), ส่วนข้อศอก (Elbow), ข้อมือ (Wrist Roll) และส่วนของฐาน (Base) แต่การวิเคราะห์แขนหุ่นยนต์ด้วยจลนศาสตร์แบบไปข้างหน้าและแบบผกผันสำหรับงานวิจัยนี้ เป็นการวิเคราะห์โดยสนใจ joint angle เพียง 3 มุม คือ ส่วนหัวไหล่, ส่วนข้อศอก และข้อมือ เพื่อควบคุมมือจับด้วยโมเดลในระนาบ 2 มิติ ให้อยู่ในตำแหน่งที่ต้องการอ้างอิงจากพิกัดแกนหัวไหล่ (x_0 , y_0) ดังแสดงในรูปที่ 1 โดยมุมที่ฐาน (Base) เป็นการหมุนแขนหุ่นยนต์รอบแกน y_0 เพื่อหันแขนหุ่นยนต์ไปตามทิศทางที่ต้องการ



รูปที่ 1 แขนหุ่นยนต์ 3 ก้านต่อ ในระนาบ 2 มิติ

2.1 โมเดลระบบการควบคุมการเคลื่อนที่เชิงเส้นแบบหลายแกน

การควบคุมการเคลื่อนที่เชิงเส้นแบบหลายแกน ในงานวิจัยนี้เป็นการควบคุมเซอร์โวมอเตอร์หลายตัว ให้สามารถทำมุมสัมพันธ์กัน เพื่อให้มือจับเคลื่อนที่เชิงเส้นตรงตามแนวแกน x และแกน y ได้ โดยจากรูปที่ 1 กำหนดการเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงในแนวหน้า-หลัง ($+x_0$, $-x_0$) และแนวขึ้น-ลง ($+y_0$, $-y_0$) ในการหาค่ามุมแต่ละข้อต่อทำได้โดยการกำหนดค่าตัวแปรต่างๆ ของแขนหุ่นยนต์ด้วย ดีเอช พารามิเตอร์ (Denavit-Hartenberg parameters: DH) ซึ่งเป็นวิธีการหนึ่งในการแก้ปัญหาสายโซ่จลนศาสตร์อย่างเป็นระบบ เพื่อใช้ในการวิเคราะห์พื้นที่ทำงานของแขนหุ่นยนต์ (Zar & Ei, 2017) โดยคำนวณด้วยหลักการจลนศาสตร์แบบไปข้างหน้าและแบบผกผัน

ซึ่งการควบคุมแขนหุ่นยนต์ทำได้โดยกำหนดมุมองศาให้กับเซอร์โวมอเตอร์แต่ละตัวด้วยสัญญาณทางไฟฟ้าในรูปแบบ Pulse Width Modulation (PWM) ซึ่งนิยมใช้ในการควบคุมตำแหน่งของเซอร์โวมอเตอร์

2.1.1 การกำหนด ค่า D-H parameters

ในงานวิจัยนี้สนใจแขนหุ่นยนต์ 3 ก้านต่อ ในระนาบ 2 มิติ (x-y) ในการหาพื้นที่ทำงานของแขนหุ่นยนต์ ทำได้โดยหาจากตารางความสัมพันธ์ที่มีชื่อว่า Denavit–Hartenberg (D-H) ซึ่งเป็นรูปแบบมาตรฐานการกำหนดค่าตัวแปรต่าง ๆ ของแขนหุ่นยนต์ เพื่อใช้วิเคราะห์การเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ โดยมีตัวแปร คือ มุมของแต่ละข้อต่อ (θ_i), ระยะห่างระหว่างข้อต่อ (d_i), ความยาวของแต่ละข้อต่อ (a_i) และมุมบิดของแต่ละข้อต่อ (α_i) (Tuchinda, 2016) เพื่อหาความสัมพันธ์แต่ละข้อต่อของแขนหุ่นยนต์ นำค่ามาแทนลงในรูปแบบเมทริกซ์แสดงในตารางที่ 1

Link	θ_i	d_i	a_i	α_i
1	θ_1	0	a_1	0
2	θ_2	0	a_2	0
3	θ_3	0	0	0

ตารางที่ 1 การวิเคราะห์แขนหุ่นยนต์ด้วย D-H parameter

2.1.2 จลนศาสตร์แบบไปข้างหน้า

จลนศาสตร์แบบไปข้างหน้าเป็นการหาค่าพิกัดและทิศทาง (ในรูปการแปลงเอกพันธ์) ของมือจับเมื่อทราบตำแหน่งและมุมของข้อต่อทั้งหมด

จากการคำนวณโดยใช้ค่า D-H parameter ดังตารางที่ 1 ด้วยวิธีการหาจลนศาสตร์แบบไปข้างหน้า จะได้

$${}^0T_3 = \begin{pmatrix} c_{123} & -s_{123} & 0 & a_1c_1 + a_2c_{12} \\ s_{123} & c_{123} & 0 & a_1s_1 + a_2s_{12} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

แต่สำหรับหุ่นยนต์ในระนาบสองมิตินี้ จัดให้อยู่ในรูป

$${}^0T_3 = \begin{pmatrix} c_\phi & -s_\phi & 0 & p_x \\ s_\phi & c_\phi & 0 & p_y \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

โดย 0T_3 คือ Transformation Matrix ของพิกัดและจุดอ้างอิงจากเฟรมอ้างอิงของแกนที่ 3 เทียบกับไปยังเฟรมอ้างอิงของแกน 0 p_x และ p_y คือ พิกัดที่ตำแหน่งข้อต่อที่ 3 ของแขนหุ่นยนต์ เทียบกับแกนอ้างอิง 0

2.1.3 จลนศาสตร์แบบผกผัน

จลนศาสตร์แบบผกผันเป็นการหาค่าตำแหน่งและมุมของข้อต่อเมื่อทราบค่าเมทริกซ์เอกพันธ์ของตัวทำงานส่วนปลายเทียบกับเฟรมฐาน

โดย ϕ คือทิศทางของก้านต่อ 3 เทียบกับพิกัดอ้างอิง 0 จากการ เปรียบเทียบสมการ (1) และ (2) จะได้ว่า

$$c_\phi = c_{123} = \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \quad (3)$$

$$s_\phi = s_{123} = \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \quad (4)$$

$$p_x = a_1c_1 + a_2c_{12} \quad (5)$$

$$p_y = a_1s_1 + a_2s_{12} \quad (6)$$

โดย

$$c_\phi = \cos \phi, \quad s_\phi = \sin \phi$$

$$c_1 = \cos \theta_1, \quad c_{12} = \cos(\theta_1 + \theta_2)$$

$$s_1 = \sin \theta_1, \quad s_{12} = \sin(\theta_1 + \theta_2)$$

จากสมการ (3) ถึง (6) ใช้วิธีการทางพีชคณิตเพื่อหาค่าของมุมข้อต่อ จากสมการ (5) และ (6) นำไปยกกำลังสองและรวมเข้าด้วยกันเป็น

$$p_x^2 + p_y^2 = a_1^2 + a_2^2 + 2a_1a_2c_2 \quad (7)$$

จัดรูปเพื่อหา c_2

$$c_2 = \frac{p_x^2 + p_y^2 - a_1^2 - a_2^2}{2a_1a_2} \quad (8)$$

หาค่า s_2 จากสมการความสัมพันธ์ $s_2^2 + c_2^2 = 1$ จะได้คำตอบที่เป็นไปได้ 2 คำตอบคือ

$$s_2 = \pm\sqrt{1-c_2^2} \quad (9)$$

ในกรณีนี้ กำหนดให้ s_2 มีค่าเป็นลบ เพื่อให้แขนหุ่นยนต์มีทิศทางที่เหมาะสมตามต้องการ

หาค่า θ_2 จากความสัมพันธ์

$$\theta_2 = \arctan 2(s_2, c_2) \quad (10)$$

ต่อไปหาค่า θ_1 จากการแก้สมการ (5), (6) โดยการใช้เอกลักษณ์ตรีโกณ เขียนสมการใหม่ในรูป

$$p_x = k_1c_1 - k_2s_1 \quad (11)$$

$$p_y = k_1s_1 + k_2c_1 \quad (12)$$

โดย

$$k_1 = a_1 + a_2c_2 \quad (13)$$

$$k_2 = a_2s_2 \quad (14)$$

วิธีการแก้สมการในรูปนี้คือเปลี่ยนตัวแปร สมมติให้

$$r = +\sqrt{k_1^2 + k_2^2} \quad (15)$$

$$\gamma = \arctan 2(k_2, k_1) \quad (16)$$

ดังนั้น

$$k_1 = r \cos \gamma \quad (17)$$

$$k_2 = r \sin \gamma \quad (18)$$

$$\frac{p_x}{r} = \cos \gamma \cos \theta_1 - \sin \gamma \sin \theta_1 \quad (19)$$

$$\frac{p_y}{r} = \cos \gamma \sin \theta_1 + \sin \gamma \cos \theta_1 \quad (20)$$

จัดรูปใหม่โดยใช้เอกลักษณ์ตรีโกณ

$$\cos(\gamma + \theta_1) = \frac{p_x}{r} \quad (21)$$

$$\sin(\gamma + \theta_1) = \frac{p_y}{r} \quad (22)$$

เมื่อใช้ฟังก์ชัน $\arctan 2$ จะได้ว่า

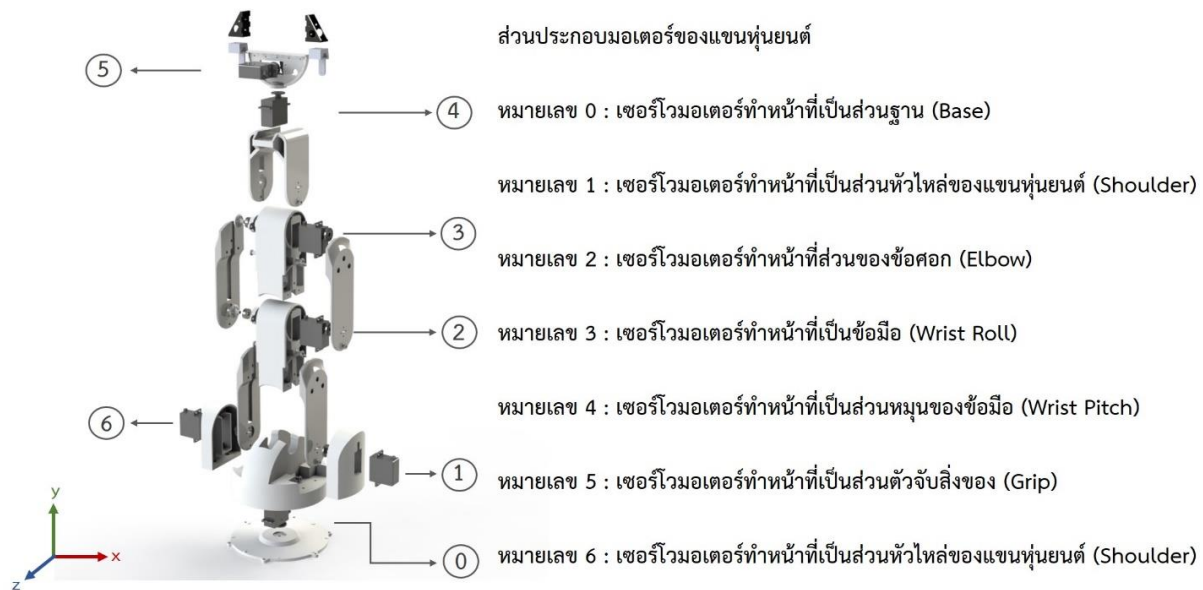
$$\gamma + \theta_1 = \arctan 2\left(\frac{p_y}{r}, \frac{p_x}{r}\right) = \arctan 2(p_y, p_x) \quad (23)$$

ดังนั้นค่ามุมของ θ_1 มีค่าเท่ากับ

$$\theta_1 = \arctan 2(p_y, p_x) - \arctan 2(k_2, k_1) \quad (24)$$

สุดท้ายหาคำตอบ θ_3 จากความสัมพันธ์ $\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 = \phi$ จะได้

$$\theta_3 = \phi - \theta_1 - \theta_2 \quad (25)$$



รูปที่ 2 ส่วนประกอบเซอร์โวมอเตอร์ของแขนหุ่นยนต์

3. ฮาร์ดแวร์ และ ซอฟต์แวร์ ของแขนหุ่นยนต์

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาระบบควบคุมแขนหุ่นยนต์โดยสั่งงานผ่านทางแอปพลิเคชันบนโทรศัพท์มือถือ โดยทำการเชื่อมต่อระหว่างแขนหุ่นยนต์กับโทรศัพท์มือถือด้วยสัญญาณไร้สาย ซึ่งมีตัวควบคุมเป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ อาร์ดุยโน (Arduino) ที่รับคำสั่งจากโทรศัพท์มือถือ แล้วส่งเป็นค่า PWM เพื่อควบคุมมุมของเซอร์โวมอเตอร์ และมีไมโครคอมพิวเตอร์ ราสเบอร์รี่พาย (Raspberry pi) ในการส่งสัญญาณภาพตามเวลาจริงจากกล้องที่ติดอยู่กับแขนหุ่นยนต์ ไปแสดงภาพบนหน้าจอบนโทรศัพท์มือถือ

3.1 ส่วนฮาร์ดแวร์ของหุ่นยนต์

ในการออกแบบกลไกของแขนหุ่นยนต์ ผู้วิจัยได้ใช้โปรแกรม Solid works ในการออกแบบ จากนั้นนำมาขึ้นรูปโดยใช้เครื่องพิมพ์สามมิติ (3D Printer) ในการควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ ใช้เซอร์โวมอเตอร์ควบคุมตำแหน่งผ่านไมโครคอนโทรลเลอร์อาร์ดุยโนกับบอร์ดขับเคลื่อน

3.1.1 การออกแบบส่วนประกอบของแขนหุ่นยนต์

โดยการออกแบบแขนหุ่นยนต์เป็นแบบ 6 ข้อต่อ ประกอบไปด้วยเซอร์โวมอเตอร์ทั้งหมด 7 ตัว แสดงดังรูปที่ 2 เซอร์โวมอเตอร์หมายเลข 0 ทำหน้าที่ส่งกำลังผ่านชุดเฟืองเพื่อให้แขนหุ่นยนต์สามารถหมุนรอบตัวได้ โดยแขนหุ่นยนต์นี้สามารถหมุนได้ 180 องศา ในแนวราบ (ระนาบ x-z), โดยเซอร์โวมอเตอร์หมายเลข 1 และหมายเลข 6 เป็นเซอร์โวมอเตอร์ที่รับน้ำหนักมากที่สุดซึ่งทำหน้าที่ขับเคลื่อนในส่วนหัวไหล่ (Shoulder) ของแขนหุ่นยนต์ ในส่วนของเซอร์โวมอเตอร์หมายเลข 2, 3, 4 และ 5 ที่ติดตั้งในส่วนข้อศอก (Elbow), ข้อมือ (Wrist Roll), ส่วนหมุนของข้อมือ (Wrist Pitch) และส่วนจับสิ่งของ (Grip) ตามลำดับ โดยส่วนประกอบต่างๆของแขนหุ่นยนต์ถูกขึ้นรูปจากเครื่องพิมพ์สามมิติ และเมื่อนำชิ้นส่วนจากการขึ้นรูป มาประกอบเข้าด้วยกันจะได้แขนหุ่นยนต์ดังแสดงในรูปที่ 3

3.1.2 ระบบขับเคลื่อน และระบบควบคุมการเคลื่อนที่

ระบบควบคุมจะประกอบไปด้วย แอปพลิเคชันบนโทรศัพท์มือถือ และไมโครคอนโทรลเลอร์ การทำงานในส่วน

ของระบบควบคุมตามรูปที่ 4 เริ่มจากผู้ใช้งานสามารถสั่งงานแอปพลิเคชันที่ผู้วิจัยได้พัฒนาขึ้นบนโทรศัพท์มือถือ ส่งคำสั่งในการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ผ่านตัวรับสัญญาณบลูทูธ (หมายเลข 3) ไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์ จากนั้นไมโครคอนโทรลเลอร์จะส่งสัญญาณ PWM ไปที่ระบบขับเคลื่อน ซึ่งระบบขับเคลื่อนประกอบด้วย แบตเตอรี่ลิเธียม-โพลิเมอร์ (หมายเลข 8) และบอร์ดขับเคลื่อน โดยบอร์ดขับเคลื่อนทำหน้าที่ให้พลังงานกลแก่มอเตอร์รวมถึงส่งสัญญาณไฟฟ้า เพื่อให้เซอร์โวมอเตอร์เคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งต่าง ๆ ตามคำสั่งที่ได้รับจากแอปพลิเคชันบนมือถือ ในการตรวจสอบการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ทำได้โดยอาศัยสัญญาณภาพจากกล้อง ซึ่งถูกประมวลด้วยไมโครคอมพิวเตอร์ก่อนที่จะถูกส่งเข้าไปแสดงผลในแอปพลิเคชันบนมือถือด้วยสัญญาณ Wi-Fi โดยระบบขับเคลื่อน และระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์แสดงในรูปที่ 4



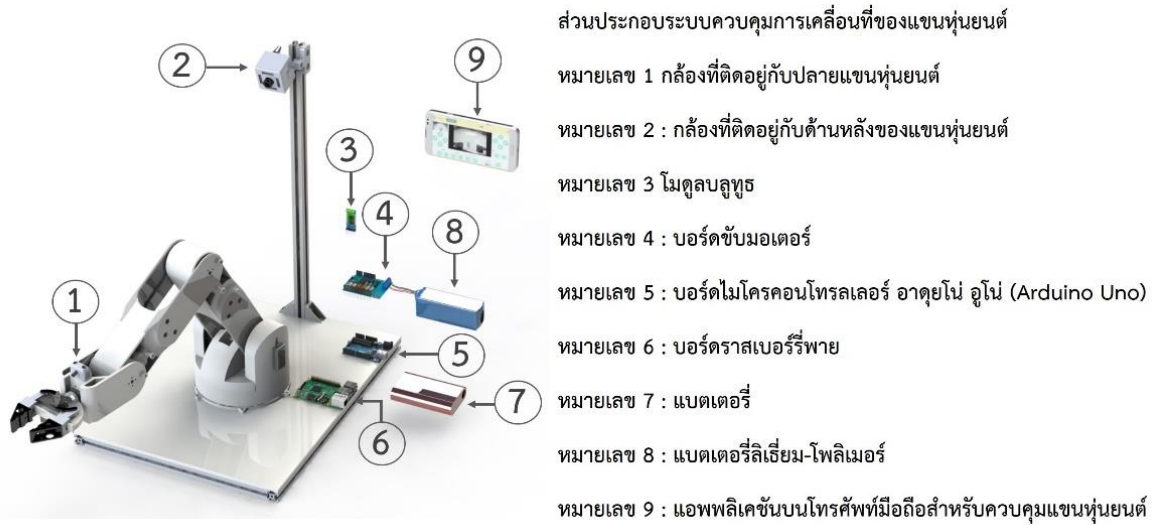
รูปที่ 3 แขนหุ่นยนต์

3.2 ซอฟต์แวร์ของหุ่นยนต์

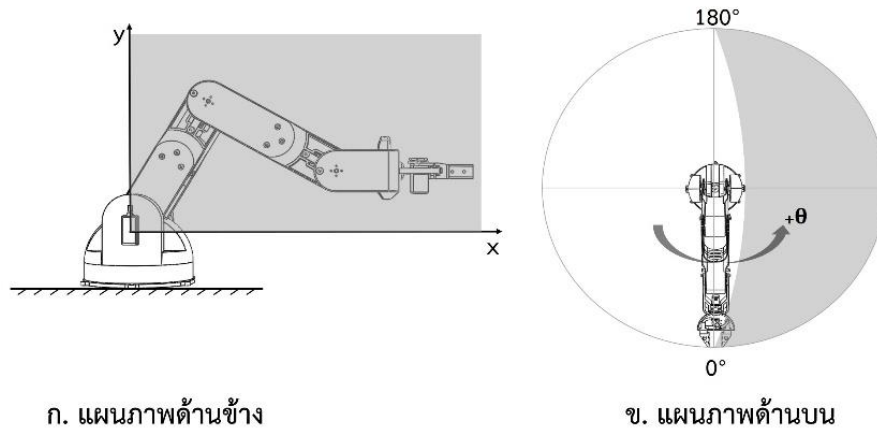
ในการออกแบบซอฟต์แวร์การทำงานของแขนหุ่นยนต์ ผู้วิจัยได้ใช้โปรแกรม MATLAB ในการคำนวณ เพื่อหาพื้นที่ทำงานหรือขอบเขตของแขนหุ่นยนต์ และใช้โปรแกรม Arduino IDE สำหรับพัฒนาโปรแกรมลงในบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อคำนวณจลนศาสตร์แบบไปข้างหน้าและจลนศาสตร์ผกผัน และรับส่งสัญญาณเซนเซอร์เพื่อใช้ในการควบคุมแขนหุ่นยนต์

3.2.1 การหาพื้นที่ทำงานของแขนหุ่นยนต์

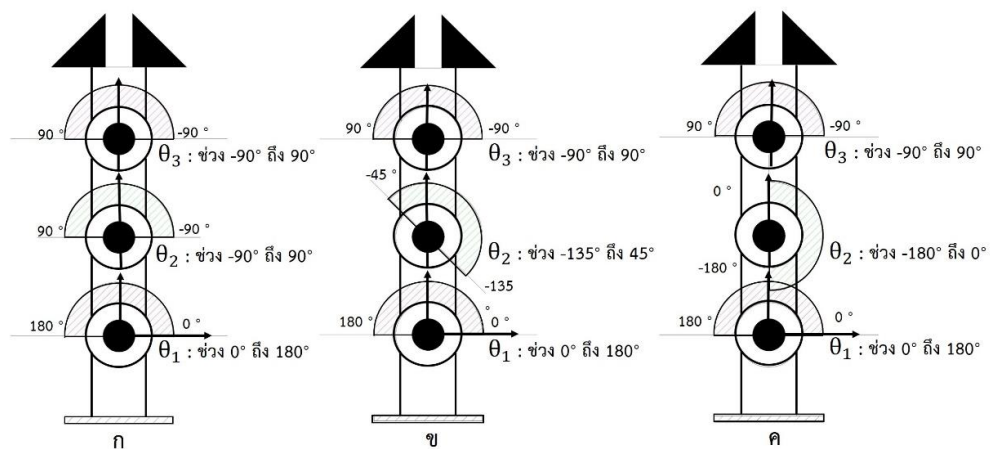
พื้นที่ทำงาน (workspace) ดังรูปที่ 5 คือพื้นที่ ที่ส่วนปลายของแขนหุ่นยนต์เข้าถึงได้ การหาพื้นที่ทำงานของแขนหุ่นยนต์ในระนาบ x-z หาได้จาก ครึ่งหนึ่งของพื้นที่วงกลม ส่วนระนาบ x-y หาได้โดยการนำค่า D-H Parameters จากตารางที่ 1 ไปใช้ร่วมกับสมการจลนศาสตร์แบบไปข้างหน้า และจลนศาสตร์แบบผกผัน จากหัวข้อที่ 2 ซึ่งแขนหุ่นยนต์ในงานวิจัยนี้ประกอบไปด้วย ข้อต่อ 3 ข้อต่อ ประกอบไปด้วยมุมในการหมุนของข้อต่อ (θ_i) มีดังนี้ θ_1 คือมุมในส่วนของหัวไหล่ของแขนหุ่นยนต์ (Shoulder), θ_2 คือมุมในส่วนข้อศอก (Elbow) และ θ_3 คือมุมในส่วนข้อมือ (Wrist Roll) เนื่องจากเซอร์โวมอเตอร์สามารถหมุนได้แค่ 180 องศา θ_2 จึงส่งผลกระทบต่อขอบเขตการทำงานของแขนหุ่นยนต์มากที่สุด ดังนั้นผู้วิจัยจึงทำการเปรียบเทียบการตั้งค่าของ θ_2 ในช่วง -90 ถึง 90 องศา, -135 ถึง 45 องศา และ -180 ถึง 0 องศา โดยการตั้งค่าช่วงมุมของเซอร์โวมอเตอร์ แสดงดังรูปที่ 6



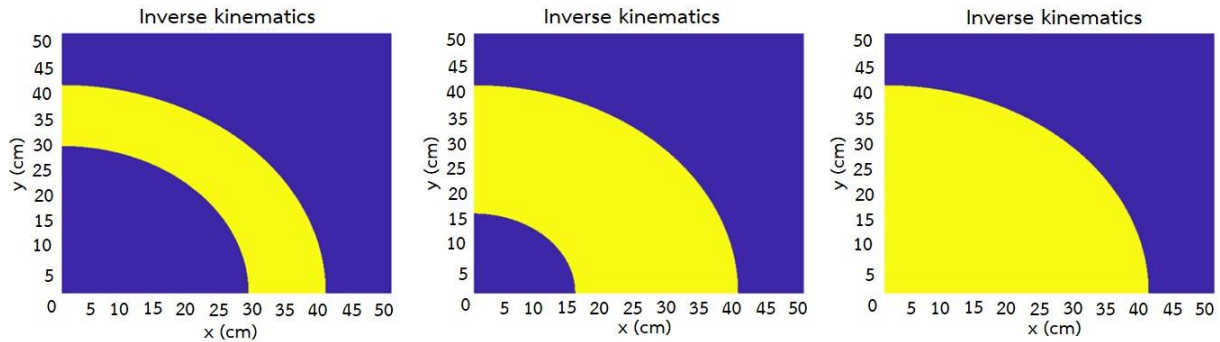
รูปที่ 4 ส่วนประกอบระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์



รูปที่ 5 พื้นที่ทำงานของแขนหุ่นยนต์



รูปที่ 6 การตั้งค่าช่วงมุมของเซอร์โวมอเตอร์



ก. กำหนดมุม θ_2 ช่วง -90 ถึง 90 องศา

ข. กำหนดมุม θ_2 ช่วง -135 ถึง 45 องศา

ค. กำหนดมุม θ_2 ช่วง -180 ถึง 0 องศา

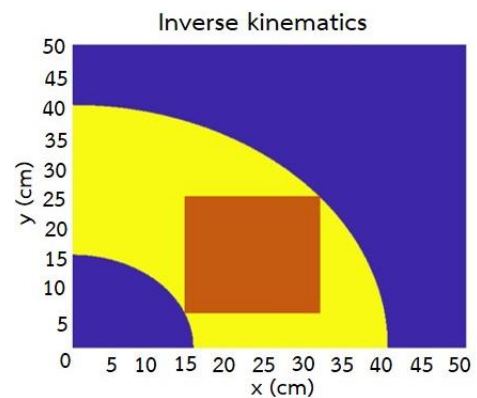
รูปที่ 7 พื้นที่ทำงานของแขนหุ่นยนต์จากการกำหนดช่วงมุมของเซอร์โวมอเตอร์

จากการคำนวณพื้นที่ทำงานของแขนหุ่นยนต์ ตามการกำหนดช่วงมุมของเซอร์โวมอเตอร์รูปแบบต่าง ๆ โดยใช้โปรแกรม MATLAB แสดงดังรูปที่ 7 โดยจากผลการคำนวณพบว่าหากตั้งค่าเซอร์โวมอเตอร์ θ_2 อยู่ในช่วง -90 ถึง 90 องศาพบว่าพื้นที่ทำงานของแขนหุ่นยนต์มีค่าไม่เหมาะสมในการใช้งาน ในการการตั้งค่ามุม θ_2 ให้เป็น -135 ถึง 45 องศา มีพื้นที่ทำงานได้มากขึ้น เมื่อเทียบกับการตั้งค่ามุมในช่วง -90 ถึง 90 องศา และแขนหุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่ได้เหมาะสมกับการใช้งานจริง ในส่วนของการการตั้งค่ามุม θ_2 ให้เป็น ให้เป็น -180 ถึง 0 องศา มีพื้นที่ทำงานได้มากที่สุด แต่ไม่เหมาะสมในการใช้งานจริง เพราะแขนหุ่นยนต์ไม่สามารถไปยังจุดอ้างอิงได้ซึ่งเป็นบริเวณโครงสร้างของฐาน ดังนั้น การตั้งค่ามุม θ_2 ที่เหมาะสมอยู่ในช่วง -135 ถึง 45 องศา

3.2.2 การกำหนดพื้นที่ทำงานของแขนหุ่นยนต์

จากการใช้โปรแกรม MATLAB จำลองพื้นที่การทำงานของแขนหุ่นยนต์ แสดงดังรูปที่ 8 จะได้การกำหนดมุมของเซอร์โวมอเตอร์ที่เหมาะสม จากนั้นกำหนดขอบเขตการทำงานของแขนหุ่นยนต์ โดยกำหนดจุดน้อยที่สุดไปมากที่สุดของแนวราบ (Horizontal) ที่ 15 เซนติเมตร ถึง 32 เซนติเมตร และแนวตั้ง (Vertical) ที่ 7 เซนติเมตร ถึง 24 เซนติเมตร จากนั้นนำข้อมูลที่ได้ไปกำหนดค่าในโปรแกรม Arduino IDE เพื่อกำหนดระยะ

ทำงานของปลายแขนหุ่นยนต์ คือ 17x17 เซนติเมตร



รูปที่ 8 กำหนดขอบเขตพื้นที่การทำงานของแขนหุ่นยนต์

3.2.3 ขั้นตอนวิธีการควบคุมของแขนหุ่นยนต์

งานวิจัยนี้เป็นการควบคุมแขนหุ่นยนต์ โดยแอปพลิเคชันบนสมาร์ตโฟนผ่านสัญญาณไร้สาย พร้อมกับแสดงภาพบนหน้าจอตามเวลาจริง ซึ่งหน้าจอของแอปพลิเคชันจะประกอบไปด้วยหลายส่วน ดังรูปที่ 9 โดยส่วนที่ 1 เป็นส่วนเลือกสัญญาณเชื่อมต่อกับอุปกรณ์, ส่วนที่ 2 เป็นหน้าจอแสดงผลจากกล้องตามเวลาจริง ซึ่งแสดงผลจากกล้องที่ติดกับส่วนปลายแขนหุ่นยนต์, ส่วนที่ 3 เป็นหน้าจอแสดงผลจากกล้องตัวที่ 2 จะแสดงภาพมุมกว้างที่เห็นภาพรวมของแขนหุ่นยนต์, ส่วนที่ 4 เป็นปุ่มการควบคุมแขนหุ่นยนต์แบบ MALM-Control เข้ามาช่วยให้ผู้ใช้สามารถควบคุมแขนหุ่นยนต์ได้ให้ง่ายขึ้น, ส่วนที่ 5 เป็นการควบคุมที่ละเอียดต่อแบบอิสระ และส่วนที่ 6 เป็นปุ่ม

ฟังก์ชันสำหรับการช่วยในการตั้งค่าตำแหน่งเริ่มต้นให้พร้อมใช้งาน และปุ่มฟังก์ชันเมื่อผู้ใช้งานทำการจับสิ่งของได้แล้ว แขนหุ่นยนต์จะนำสิ่งของไปวางไว้ที่อีกตำแหน่ง โดยผู้ใช้งานไม่ต้องบังคับเอง



รูปที่ 9 ส่วนควบคุมแขนหุ่นยนต์ แอปพลิเคชันบนสมาร์ตโฟน

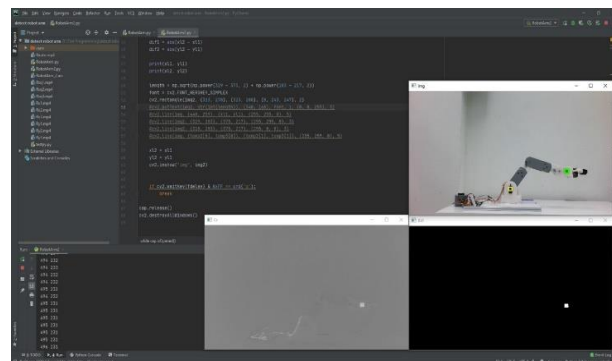
4.วิธีการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ทางผู้วิจัยได้ออกแบบการทดลองของแขนหุ่นยนต์ โดยแบ่งการทดลองเป็น 2 การทดลองหลัก คือ ทดลองแรกเป็นการทดสอบความสามารถในการควบคุมมือจับของแขนหุ่นยนต์เคลื่อนที่เป็นเส้นตรงในแนวหน้า-หลัง และแนวขึ้น-ลง ซึ่งเป็นการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ในระนาบสองมิติ โดยใช้หลักการจลนศาสตร์แบบไปข้างหน้าและจลนศาสตร์แบบผกผัน และการทดลองที่สองเป็นการเป็นการทดสอบด้านระยะเวลาที่ใช้ควบคุมแขนหุ่นยนต์เพื่อหยิบสิ่งของ โดยแบ่งการควบคุมเป็นควบคุมแบบ MALM-Control และการควบคุมด้วยข้อต่ออิสระทั้ง 6 ข้อต่อ

4.1 การทดลองการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ในระนาบสองมิติ

การทดลองการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ในระนาบสองมิติ ซึ่งเป็นการให้แขนหุ่นยนต์เคลื่อนที่เป็นเส้นตรงตามแนวราบและแนวตั้ง จากนั้นทำการตรวจสอบว่าแขนหุ่นยนต์เคลื่อนที่เป็นเส้นตรงได้ถูกต้องหรือไม่ โดยใช้เทคโนโลยีประมวลผลภาพ (Image Processing) แสดงดังรูปที่ 10 ทำการเขียนโปรแกรมด้วยไลบรารีที่ชื่อว่า Open CV ด้วยภาษาไพทอน (Python) โดยทำเครื่องหมายสีแดงไว้ที่ตำแหน่งปลายแขนหุ่นยนต์

จากนั้นกล้องจะตรวจจับเครื่องหมายสีแดงแล้วติดตามการเคลื่อนที่ตามปลายแขนหุ่นยนต์



รูปที่ 10 โปรแกรมประมวลผลภาพ ตรวจจับจุดสีแดง เคลื่อนที่ตามปลายแขนหุ่นยนต์

4.2 การทดลองการควบคุมแขนหุ่นยนต์ผ่านโทรศัพท์มือถือ

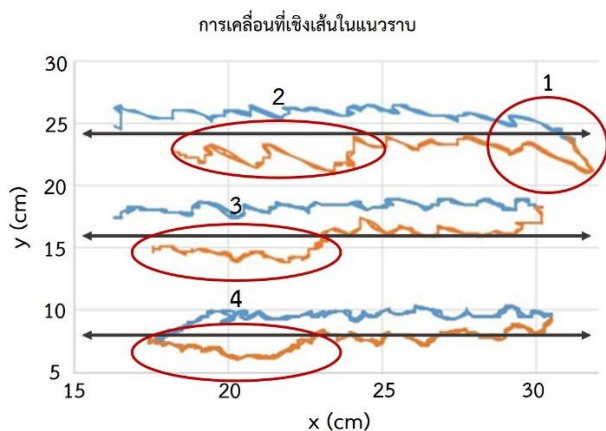
การทดลองต่อมาให้ผู้ใช้งานควบคุมแขนหุ่นยนต์ผ่านแอปพลิเคชันบนโทรศัพท์มือถือ โดยให้แขนหุ่นยนต์หยิบจับสิ่งของจากจุดหนึ่งไปไว้ที่อีกจุดหนึ่ง ซึ่งผู้ใช้งานต้องมองผ่านจอที่แสดงภาพจากกล้องตามเวลาจริง จากนั้นแบ่งการทดลองเป็นการควบคุมด้วยข้อต่ออิสระทั้ง 6 ข้อต่อ และควบคุมแบบ MALM-Control มาช่วยในการเคลื่อนที่ ซึ่งทำการทดลองให้ผู้ใช้งาน 3 คน ทดลองทั้งหมด 3 ครั้ง โดยโปรแกรมจำลองแสดงการหยิบจับสิ่งของจากจุดหนึ่งไปไว้ที่อีกจุดหนึ่ง การทดลองให้ผู้ใช้งาน ควบคุมบังคับแขนหุ่นยนต์ผ่านโทรศัพท์มือถือ แสดงดังรูปที่ 11



รูปที่ 11 การทดลองให้ผู้ใช้งาน ควบคุมบังคับแขนหุ่นยนต์ผ่านโทรศัพท์มือถือ

5. ผลลัพธ์และการอภิปราย

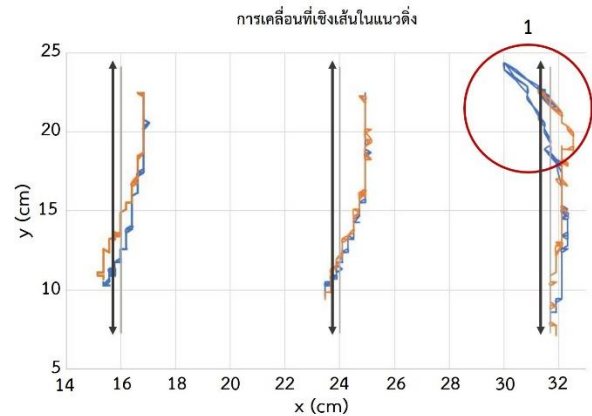
ผลการทดลองให้แขนหุ่นยนต์เคลื่อนที่เชิงเส้นตามแนวราบ โดยให้เคลื่อนที่ไปกลับ ทำการทดลองทั้งหมด 3 ระดับ คือที่ค่า $y = 8$ cm, 16 cm และ 24 cm จากรูปที่ 12 แสดงถึงเส้นอ้างอิงตำแหน่ง ซึ่งเป็นเส้นการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ในแนวราบ ต่อมาเส้นการเคลื่อนที่ขาไป (เส้นสีน้ำเงิน) และเส้นการเคลื่อนที่ขากลับ (เส้นสีส้ม) จากการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์มีจุดสังเกตคือ จุดที่ 1 มีตำแหน่งคลาดเคลื่อนจากแนวที่กำหนดไว้ประมาณ 2-3 cm ซึ่งเกิดจากการยืดแขนไปสุดพื้นที่ทำงาน ทำให้แรงบิดของมอเตอร์ส่วนหัวไหล่ และข้อศอกไม่เพียงพอ แขนหุ่นยนต์จึงไม่สามารถกลับไปสู่ตำแหน่งที่เดิมได้ จุดที่ 2, 3 และ 4 เกิดจากมอเตอร์ส่วนหัวไหล่ และข้อศอกพยายามดึงกลับมายังตำแหน่งของโปรแกรม ทำให้เกิดการกระตุกในช่วงนี้ และการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ทั้งขาไปและขากลับ ไม่เรียบสม่ำเสมอ ซึ่งเกิดจากการโครงสร้างของแขนหุ่นยนต์ส่วนของข้อมือมีความเคลื่อนตัวมาก



รูปที่ 12 การเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ในแนวราบ

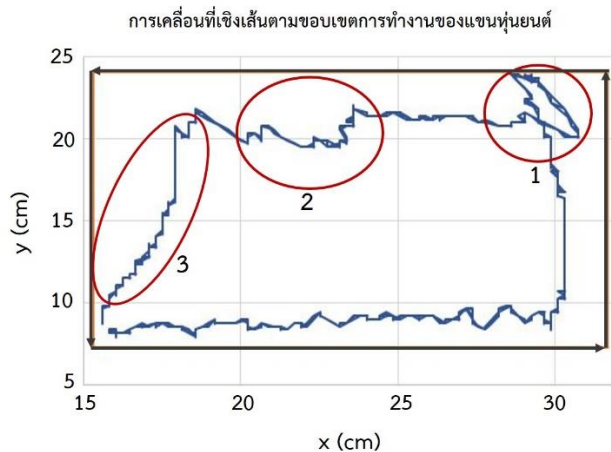
ต่อมาเป็นการทดลองเคลื่อนที่เชิงเส้นตามแนวตั้ง โดยทดลอง 3 ระดับ คือที่ค่า $x = 16$ cm, 24 cm และ 31.7 cm จากรูปที่ 13 การเคลื่อนที่มีรูปแบบที่ใกล้เคียงกันทั้งขาไปและขากลับ มีตำแหน่งคลาดเคลื่อนจากแนวที่กำหนดไว้ประมาณ 1 cm ซึ่งมีจุดสังเกตคือการเคลื่อนที่ช่วง $x = 31.7$ cm ซึ่งเกิด

จากการยืดแขนหุ่นยนต์เข้าใกล้กับแนวขอบเขตพื้นที่ทำงาน ทำให้แรงบิดของมอเตอร์ส่วนหัวไหล่ และข้อศอกไม่เพียงพอ



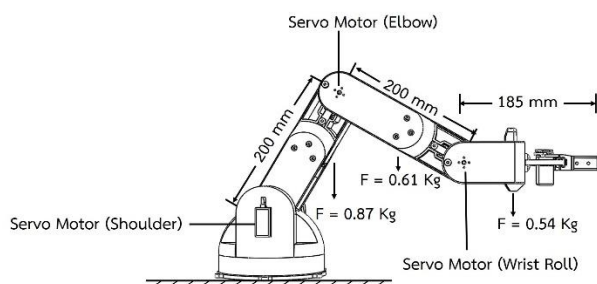
รูปที่ 13 การเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ในแนวตั้ง

ต่อมาเป็นการทดลองเคลื่อนที่เชิงเส้นตามขอบเขตการทำงานของแขนหุ่นยนต์ จากรูปที่ 14 แสดงเส้นอ้างอิงการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ จากการใช้โปรแกรมประมวลผลภาพจับตำแหน่งที่กำหนด (ดังรูปที่ 10) ทำให้เกิดค่าระยะห่างระหว่างเส้นอ้างอิงกับเส้นการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ จากการวิเคราะห์มีจุดสังเกตคือ จุดที่ 1 เป็นตำแหน่งที่ใกล้กับแนวขอบเขตพื้นที่ทำงานของแขนหุ่นยนต์ ดังนั้นการยืดแขนหุ่นยนต์ไปยังตำแหน่งดังกล่าว ทำให้แรงบิดของมอเตอร์ส่วนหัวไหล่ และข้อศอกไม่เพียงพอ ต่อมาจุดที่ 2 คือการเคลื่อนที่ขากลับเกิดจากมอเตอร์ส่วนหัวไหล่ และข้อศอกพยายามดึงกลับมายังตำแหน่งของโปรแกรม ทำให้เกิดการกระตุกในช่วงนี้ และจุดที่ 3 เกิดจากข้อจำกัดทางโครงสร้างของแขนหุ่นยนต์



รูปที่ 14 การเคลื่อนที่ตามขอบเขตการทำงานของแขนหุ่นยนต์

จากการทดลองการเคลื่อนที่เชิงเส้นของแขนหุ่นยนต์ในระนาบสองมิติพบว่า มีความคลาดเคลื่อนเล็กน้อยอันเนื่องมาจากแรงบิดของเซอร์โวมอเตอร์ไม่เพียงพอ ทางผู้วิจัยจึงได้ทำการทดสอบขีดจำกัดในด้านน้ำหนักสูงสุดในการหยิบจับสิ่งของที่แขนหุ่นยนต์สามารถเคลื่อนย้ายได้ ในรูปแบบของเวกเตอร์แรงและโมเมนต์ที่กระทำต่อแต่ละช่วงข้อต่อของแขนหุ่นยนต์ แสดงดังรูปที่ 15 และเปรียบเทียบระหว่างแรงบิดแต่ละข้อต่อที่แขนหุ่นยนต์ต้องการกับแรงบิดสูงสุดของเซอร์โวมอเตอร์ แสดงดังตารางที่ 2 โดยน้ำหนักสูงสุดของวัตถุกำหนดให้เป็น 200 g



รูปที่ 15 เวกเตอร์แรงและโมเมนต์ที่กระทำต่อแต่ละช่วงข้อต่อ

ตารางที่ 2 แรงบิดแต่ละช่วงข้อต่อของแขนหุ่นยนต์ และแรงบิด

สูงสุดของเซอร์โวมอเตอร์

ตำแหน่งเซอร์โวมอเตอร์	น้ำหนัก (kg)	แรงบิดจากการคำนวณ (kg-cm)	แรงบิดสูงสุดของมอเตอร์ (kg-cm)
Shoulder	1.74	34.76	41.40
Elbow	1.21	24.24	20.70
Wrist Roll	0.68	12.49	20.70

จากตารางที่ 2 จะเห็นได้ว่าแรงบิดของส่วน Shoulder มีค่าที่ 34.76 kg-cm ใกล้กับแรงบิดสูงสุดตามสเปกของเซอร์โวมอเตอร์ที่ 41.40 kg-cm ทั้งนี้ในการเคลื่อนที่จริงจะมีแรงบิดเพิ่มเติมที่เซอร์โวมอเตอร์ ทำให้ในการใช้งานจริงอาจเกิดความคลาดเคลื่อนได้ ต่อมาส่วน Elbow แรงบิดมีค่าที่ 24.24 kg-cm ซึ่งมากกว่าค่าแรงบิดสูงสุดของเซอร์โวมอเตอร์มีที่ 20.70 kg-cm เพียงเล็กน้อย ทำให้อาจเกิดการคลาดเคลื่อนในการใช้งาน และในส่วนแรงบิดที่แขนหุ่นยนต์ต้องการของ Wrist Roll มีค่าน้อยกว่าแรงบิดสูงสุดของเซอร์โวมอเตอร์

ผลการทดลองควบคุมให้ใช้ควบคุมแขนหุ่นยนต์ผ่านแอปพลิเคชันบนโทรศัพท์มือถือ หยิบจับสิ่งของจากจุดหนึ่งไปไว้อีกจุดหนึ่ง แสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลการทดลองการควบคุมแขนหุ่นยนต์

	ครั้งที่	ควบคุมแต่ละข้อต่อแบบอิสระ	ควบคุมแบบ MALM-Control
คนที่ 1	1	6.12 minute	1.18 minute
	2	4.10 minute	0.48 minute
	3	2.34 minute	0.38 minute
เวลาเฉลี่ย		4.19 minute	1.08 minute
คนที่ 2	1	5.22 minute	0.54 minute
	2	3.24 minute	0.44 minute
	3	2.18 minute	0.27 minute
เวลาเฉลี่ย		3.55 minute	0.42 minute
คนที่ 3	1	5.48 minute	0.49 minute
	2	2.36 minute	0.36 minute
	3	1.43 minute	0.28 minute
เวลาเฉลี่ย		3.09 minute	0.38 minute

จากตารางที่ 3 แสดงผลการทดลองการควบคุมแขนหุ่นยนต์ให้หยิบจับสิ่งของ โดยการควบคุมที่ละข้อต่อแบบอิสระใช้เวลาในการควบคุมที่มากในครั้งแรก เนื่องจากการไม่คุ้นชินกับการบังคับผ่านหน้าจอแอปพลิเคชันของผู้ใช้ ทำให้การควบคุมที่ละข้อต่อแบบอิสระเกิดความสับสนว่าข้อต่อไหนควรบังคับไปที่มุมเท่าไร ต่อมาการควบคุมแบบเคลื่อนที่เชิงเส้นแบบหลายแกนที่พัฒนาขึ้นมาในงานวิจัยนี้ใช้เวลาเฉลี่ยของทั้ง 3 คน น้อยกว่าประมาณ 86% เมื่อเทียบกับแบบควบคุมที่ละข้อต่อแบบอิสระ ซึ่งวิธีการควบคุมนี้ทำให้สามารถมองผ่านจอแล้วไม่เกิดการสับสน ผู้ใช้สามารถควบคุมได้ง่ายขึ้น

6.สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการออกแบบและพัฒนาแขนหุ่นยนต์ช่วยหยิบสิ่งของควบคุมผ่านสมาร์ทโฟน เป็นการประยุกต์นำเอาทฤษฎีจลนศาสตร์แบบไปข้างหน้าและจลนศาสตร์ผกผัน เพื่อมาวิเคราะห์หาพื้นที่ทำงานของแขนหุ่นยนต์ อีกทั้งยังพัฒนาซอฟต์แวร์ให้การควบคุมแขนหุ่นยนต์ได้ง่ายขึ้น ซึ่งเป็นระบบที่มีชื่อว่า การควบคุมการเคลื่อนที่เชิงเส้นแบบหลายแกน (Multi-axis linear motion control -MALM Control) จากการทดลองแรก การเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ทั้ง 3 การทดลองคือ เคลื่อนที่เชิงเส้นตามแนวหน้า-หลัง (ตามแนวแกน $+x$, $-x$), แนวขึ้น-ลง (ตามแนวแกน $+y$, $-y$) และตามขอบเขตการทำงานของแขนหุ่นยนต์ ผลการทดลองมีจุดสังเกตที่เหมือนกันคือ การเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ทั้งขาไปและขากลับ ไม่เรียบสม่ำเสมอ ซึ่งเกิดจากการโครงสร้างของแขนหุ่นยนต์ส่วนข้อมือตามมีจุดขยับที่มาก ต่อมาการเคลื่อนที่ใกล้กับขอบเขตพื้นที่ทำงาน เกิดจากแรงบิดของมอเตอร์ส่วนหัวไหล่ และข้อศอกไม่เพียงพอต่อการกลับไปสู่ตำแหน่งเดิม และข้อจำกัดของโครงสร้างแขนหุ่นยนต์ และการเคลื่อนที่ขากลับจะเกิดการกระชาก เนื่องจากมอเตอร์ส่วนหัวไหล่ และข้อศอกพยายามดึงกลับมายังตำแหน่งของโปรแกรม ซึ่งผลการทดลองพบว่าส่วนปลายแขนหุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่ในแนวหน้า-หลัง ($+x$, $-x$), แนวขึ้น-ลง ($+y$, $-y$) ได้ตามขอบเขตที่กำหนด ต่อมาเป็นการทดลองควบคุมให้ผู้

ควบคุมแขนหุ่นยนต์ผ่านแอปพลิเคชันและมองผ่านจอที่แสดงภาพจากกล้องตามเวลาจริง โดยให้หยิบจับสิ่งของจากจุดหนึ่งไปไว้ที่อีกจุดหนึ่ง จากผลการทดลองคือ การควบคุมแบบที่ละข้อต่อแบบอิสระจะใช้เวลามากโดยเฉพาะรอบแรก ซึ่งผู้ใช้ควบคุมได้อย่างลำบาก เนื่องจากผู้ใช้งานต้องควบคุมผ่านการมองทางหน้าจอของโทรศัพท์เท่านั้น ทำให้ไม่รู้ว่าจะต้องปรับมุมแต่ละข้อต่อไปที่ตำแหน่งไหนบ้าง ส่วนการควบคุมการควบคุมแบบเคลื่อนที่เชิงเส้นแบบหลายแกนที่พัฒนาขึ้นมาในงานวิจัยนี้ ใช้เวลาเฉลี่ยของทั้ง 3 คน ได้น้อยลงถึง 85% ซึ่งการควบคุมแบบนี้ผู้ใช้งานสามารถควบคุมแขนหุ่นยนต์ โดยมองผ่านจอที่แสดงภาพจากกล้องตามเวลาได้อย่างสะดวกและง่ายขึ้น จากการทดลองให้ผู้ใช้งานควบคุมแขนหุ่นยนต์ผ่านแอปพลิเคชัน โดยควบคุมแบบ MALM-Control สรุปได้ว่าสามารถใช้งานได้จริง และไม่มีผลกระทบมากนักจากปัญหาของการทดลองการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ในระนาบสองมิติ

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นสร้างหุ่นยนต์ที่มีราคาประหยัด ทำให้คนไทยสามารถเข้าถึงเทคโนโลยีหุ่นยนต์ได้ง่ายขึ้น ซึ่งสามารถนำไปพัฒนาต่อยอดปรับปรุงให้แขนหุ่นยนต์ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น โดยปรับปรุงโครงสร้างของแขนหุ่นยนต์ออกแบบให้มีน้ำหนักที่เบาลง เปลี่ยนมอเตอร์ที่มีแรงกำลังขับเคลื่อนสูง และนำไปพัฒนาต่อยอดแขนติดตั้งกับหุ่นยนต์เคลื่อนที่ให้มีความสามารถในการหยิบจับสิ่งของที่หลากหลาย อีกทั้งยังสามารถพัฒนาต่อยอดในส่วนของการควบคุมด้วยสมาร์ทโฟน เป็นการสั่งงานด้วยเสียง หรือวิธีการควบคุมอื่น ๆ ได้ อีกทั้งยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้แขนหุ่นยนต์ในด้านอื่น ๆ เช่น งานทางด้านการเกษตร งานอุตสาหกรรมการผลิต งานสำรวจ เป็นต้น

7. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี โดยได้รับทุนสนับสนุนจากสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ ภายใต้โครงการแผนพัฒนาศักยภาพบัณฑิตวิจัยรุ่นใหม่ และได้รับการสนับสนุนจาก กองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (กองทุนส่งเสริม ววน.)

เอกสารอ้างอิง

- Charoenseang, S., & Chuakong, B. (2013). Development of Computer Vision System for Food Feeding Robot Arm for the Disabled Person. *Journal of Information Science and Technology (JIST)*, 4(1), 39-48.
<https://doi.org/10.14456/jist.2013.5>
- Foundation of Thai Gerontology Research and Development Institute (TGRI). (2019, November 7). Situation of the Thai elderly 2018.
<https://thaitgri.org/?p=38670>
- Jung, Y., & Bae, J. (2015). Kinematic Analysis of a 5 DOF Upper-limb Exoskeleton with a Tilted and Vertically Translating Shoulder Joint. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 20(3), 1428-1439.
<https://doi.org/10.1109/TMECH.2014.2346767>
- Manikpan, S., Kiatsin, S., & Leelasantitham, A. (2010). A Simulation of 6R Industrial Articulated Robot Arm Using Backpropagation Neural Network. *International Conference on Control. Automation and Systems 2010*. (pp. 823-826).
<https://doi.org/10.1109/ICCAS.2010.5670125>
- Ministry of Commerce, Department of Intellectual Property 2019. (2019). Robotics for Aging Society.
<http://ipthailand.go.th/images/2284/RoboticAnalysis219.pdf>
- Phanomrattanak, B., & Pornsukvitoon, V. (2017). A Study of Forward and Inverse Kinematic for 6-Link Robot Arm (Staubli RX90). *The Journal of King Mongkut's University of Technology North Bangkok*, 27(2), 241-252.
<https://doi.org/10.14416/j.kmutnb.2017.03.013>
- Rahul, K., Raheman, H., & Paradkar, V. (2019). Design and development of a 5R 2DOF parallel robot arm for handling paper pot seedlings in a vegetable transplanter. *Computers and Electronics in Agriculture*, 166, 105014.
<https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.105014>
- Tuchinda, W. (2016). Industrial robot analysis and control. Bangkok: Chulalongkorn University Press.
- Zar, M. T., & Ei, W. P. (2017). Point to Point Trajectory Control of 3R Planar Robot Arm. *International Journal of Science, Engineering and Technology Research(IJSETR)*, 6(11), 2278 -7798.
<http://ijsetr.org/wp-content/uploads/2017/11/IJSETR-VOL-6-ISSUE-11-1435-1441.pdf>

การฉายภาพอนาคตของปริมาณฝนภายใต้การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ
ในพื้นที่โครงการเขตพัฒนาพิเศษภาคตะวันออก

Future projections of rainfall under Climate Change in the Eastern Economic Corridor

พลเพชร สมานมิตร, จุติเทพ วงษ์เพ็ชร*, เกศวรา สิริโชค และ บัญชา ขวัญยืน

Polpech Samanmit, Jutitthep Vongphet*, Ketvara Sittichok and Bancha Kwanyuen

ภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Department of Irrigation Engineering, Faculty of Engineering at Kamphaengsaen, Kasetsart University

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

(Received: 30 September 2020, Revised: 26 April 2021, Accepted: 6 May 2021)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างภาพฉายอนาคตของปริมาณฝนภายใต้การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ โดยแบบจำลอง CanESM2 ภายใต้สถานการณ์จำลองการปล่อยก๊าซเรือนกระจก 3 กรณี ได้แก่ RCP2.6 RCP4.5 และ RCP8.5 แบ่งเป็น 2 ช่วงเวลา ได้แก่ ระยะเวลาอนาคตอันใกล้ปัจจุบัน (ค.ศ.2020 – 2035) และระยะเวลาอนาคตอันไกลจากปัจจุบัน (ค.ศ.2036 – 2099) ด้วยเทคนิคการลดมาตราส่วนทางสถิติและประมาณค่าเฉลี่ยเชิงพื้นที่ด้วยเทคนิค Inverse Distance Weighting ในรูปแบบรายจังหวัดที่ครอบคลุมพื้นที่โครงการเขตพัฒนาพิเศษภาคตะวันออก (Eastern Economic Corridor; EEC) จากผลการวิจัย พบว่า ภาพฉายอนาคตของปริมาณฝนสะสมรายปีเฉลี่ยเชิงพื้นที่ทั้ง 3 กรณี มีอัตราการเพิ่มขึ้นในระยะเวลาอนาคตอันใกล้และอนาคตอันไกลจากปัจจุบันโดยเฉลี่ยร้อยละ 12, 11, 11 และ ร้อยละ 10, 14, 22 สำหรับกรณี RCP2.6 RCP4.5 และ RCP8.5 ตามลำดับ โดยจังหวัดที่มีอัตราการเพิ่มขึ้นของปริมาณฝนเรียงลำดับจากมากไปน้อย ได้แก่ จังหวัดชลบุรี จังหวัดระยอง และจังหวัดฉะเชิงเทรา ตามลำดับ ซึ่งผลการวิจัยนี้จะเป็นข้อมูลสนับสนุนการพัฒนาแนวทางการปรับตัวอย่างเหมาะสมในการบริหารจัดการน้ำภายใต้การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศในอนาคตสำหรับพื้นที่การศึกษาต่อไป

คำสำคัญ: การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ, โครงการเขตพัฒนาพิเศษภาคตะวันออก, การลดมาตราส่วนทางสถิติ, ภาพฉายอนาคตของปริมาณฝน

Abstract

The objective of research is to generate future projection of rainfall under climate change using CanESM2 scenarios with RCP2.6 RCP4.5 and RCP8.5 for two time periods: short period (2020 – 2035) and long period (2036 – 2099). The Statistical downscaling technique and applied inverse distance weighting method in the Eastern Economic Corridor were used in this study. The result shows that rainfall projection of all three-case increased for both periods. Average increase of the rainfall was 12, 11, 11 (%) and 10, 14, 22 (%) for RCP2.6 RCP4.5 and RCP8.5 respectively. The maximum increased was Chonburi province followed by Rayong and Chachoengsao, respectively. The result of this research will be beneficial for water management and climate change adaptation approaches under climate change in future for the study area.

Keywords: Climate Change, Eastern economic corridor, Statistical Downscaling, Future projections of rainfall.

1. บทนำ

การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (Climate Change) ตามนิยามของ IPCC ในรายงานฉบับที่ 5 ระบุว่า อุณหภูมิโลกเฉลี่ยเพิ่มสูงขึ้นมากกว่า 2°C ภายในปี ค.ศ. 2100 น้ำทะเลเฉลี่ยทั่วโลกเพิ่มสูงขึ้น 0.19 m ปริมาณแก๊สเรือนกระจกเพิ่มสูงขึ้น 40% เมื่อเทียบกับยุคก่อนปฏิวัติอุตสาหกรรม เกิดคลื่นความร้อนแห้งแล้งยาวนานหรือเกิดฝนตกหนักในบางพื้นที่ (IPCC, 2014) ซึ่งเป็นผลกระทบสำคัญที่ต้องคำนึงถึงเป็นอย่างยิ่ง (อภิรักษ์ พัทธวิภาส, 2553) โดยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศส่งผลกระทบต่อเปลี่ยนแปลงของฝนในลักษณะของความถี่ การกระจายตัว และความผันแปรของปริมาณฝน (Ashraf & Ahrens, 2014) อีกทั้งปริมาณฝนเป็นตัวแปรที่ใช้ในการวิเคราะห์ดัชนีความแห้งแล้ง คือ ดัชนีความแห้งแล้งของฝนที่ต่างจากค่าปกติ (SPI) ซึ่งมีการใช้ประเมินความแห้งแล้งในพื้นที่ต่าง ๆ เช่น ลุ่มน้ำลี้กัต ประเทศมาเลเซีย (Huang et al., 2016) ดังนั้น การศึกษาเกี่ยวกับปริมาณฝนจึงมีความสำคัญโดยเฉพาะอย่างยิ่งการศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงของฝนในอนาคตภายใต้การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ โดยเครื่องมือที่ใช้ในการศึกษา คือ แบบจำลองภูมิอากาศโลก (General Circulation Models, GCMs) (Bonsal & Prowse, 2005) ซึ่งใช้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างชั้นบรรยากาศ มหาสมุทร และ พื้นที่ผิวโลก ในรูปแบบของ Grid Cell ครอบคลุมพื้นที่ทั่วโลก โดยมีความละเอียดเชิงพื้นที่ ประมาณ $200 - 500\text{ Km}$ (เกศวรา สิทธิโชค และคณะ, 2561) เพื่อสะดวกต่อการศึกษาระดับพื้นที่เป้าหมาย จึงจำเป็นต้องประยุกต์ใช้เทคนิคการย่อส่วน (Downscaling Technique) โดยเลือกวิธีย่อส่วนด้วยวิธีการทางสถิติ (Statistical downscaling method) (พัลลภ สุวรรณมัลย์ และคณะ, 2562) งานวิจัยนี้เลือกใช้แบบจำลองภูมิอากาศโลก CanESM2 (Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis) ภายใต้โครงการ Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 (CMIP5) ซึ่งมีการใช้งานในทั้งในประเทศอินเดีย (Ashraf & Ahrens, 2014) ประเทศมาเลเซีย (Huang et al., 2016) ประเทศเอธิโอเปีย (Gebremedhin et al., 2018) และประเทศไทย (เกศวรา สิทธิโชค และคณะ, 2561; พัลลภ สุวรรณมัลย์ และคณะ, 2562; พลเพชร สมานมิตร และคณะ, 2562; พลเพชร สมานมิตร และคณะ, 2563)

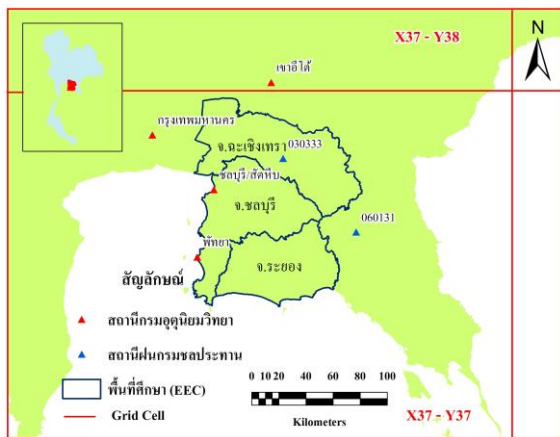
โครงการเขตพัฒนาพิเศษภาคตะวันออก (Eastern Economic Corridor; EEC) เป็นพื้นที่สำคัญต่อการพัฒนาทางเศรษฐกิจของประเทศไทยซึ่งอยู่ในช่วงเตรียมการเพื่อรองรับการเกิดขึ้นของโครงการ EEC โดยน้ำฝนถือเป็นต้นทุนของน้ำต้นทุนซึ่งเป็นทรัพยากรธรรมชาติที่มีความสำคัญต่อพื้นที่ดังกล่าวเป็นอย่างยิ่ง และเป็นองค์ประกอบในการประเมินความต้องการน้ำและสมดุลน้ำ โดยที่ผ่านมามีการศึกษาเกี่ยวกับการฉายภาพอนาคตของปริมาณฝนในพื้นที่ EEC (พลเพชร สมานมิตร และคณะ, 2562)

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อจัดทำภาพฉายอนาคตของปริมาณฝนรายเดือนและรายปีเชิงพื้นที่ ภายใต้การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศในพื้นที่โครงการเขตพัฒนาพิเศษภาคตะวันออก (EEC) ซึ่งประเมินการเปลี่ยนแปลงภายใต้สถานการณ์จำลองการปล่อยแก๊สเรือนกระจก 3 สถานการณ์ ได้แก่ RCP2.6, RCP4.5 และ RCP8.5 โดยพิจารณาจากช่วงข้อมูลตั้งแต่ปี 2020 – 2099 โดยแบ่งเป็น 2 ช่วงเวลา ได้แก่ ระยะเวลาอนาคตอันใกล้ปัจจุบัน (Short period) คือ ช่วงปี ค.ศ. 2020 – 2035 และระยะเวลาอนาคตอันไกลจากปัจจุบัน (Long period) ช่วงปี ค.ศ. 2036 – 2099 เนื่องจากอยู่ในช่วงเวลาของแผนการพัฒนาแหล่งน้ำและแผนการก่อสร้าง 20 ปี ตามยุทธศาสตร์ชาติในการพัฒนาโครงการเขตพัฒนาพิเศษภาคตะวันออก ซึ่งมีการศึกษาอยู่ในปัจจุบันโดยสำนักงานทรัพยากรน้ำแห่งชาติ (สำนักงานทรัพยากรน้ำแห่งชาติ, 2562) เพื่อเป็นข้อมูลสนับสนุนการบริหารจัดการน้ำและการวิเคราะห์ดัชนีความแห้งแล้ง (Drought Index) ในอนาคตภายใต้การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศของพื้นที่การศึกษาต่อไป

2. พื้นที่ศึกษาและข้อมูลที่ใช้ในงานวิจัย

2.1 พื้นที่การวิจัย

พื้นที่การศึกษา คือ พื้นที่เขตพัฒนาพิเศษภาคตะวันออก (Eastern Economic Corridor; EEC) ครอบคลุมพื้นที่ 3 จังหวัด ได้แก่ ฉะเชิงเทรา ชลบุรี และระยอง เมื่อพิจารณา Grid cell ของแบบจำลองภูมิอากาศโลก (General Circulation Models, GCMs) พบว่าอยู่ใน Grid cell ที่ X37 – Y37 ซึ่งเป็นพื้นที่สำคัญต่อการพัฒนาทางเศรษฐกิจของประเทศไทย และอยู่ในช่วงเตรียมการเพื่อรองรับโครงการ EEC อย่างเต็มรูปแบบ โดยงานวิจัยนี้ศึกษาจาก



รูปที่ 1 พื้นที่การศึกษา

สถานีตรวจวัดฝนจำนวน 6 สถานี ซึ่งเป็นสถานีของกรมอุตุนิยมวิทยา 4 สถานี ได้แก่ เชาอีโต้, กรุงเทพมหานคร, ชลบุรี/สัตหีบ และ พัทลุง และสถานีของกรมชลประทาน 2 สถานี ได้แก่ 030333 จังหวัดฉะเชิงเทรา และ 060131 จังหวัดจันทบุรี เนื่องจากเป็นสถานีที่มีข้อมูลสมบูรณ์ที่สุด แสดงดังรูปที่ 1

2.2 ปริมาณฝนตรวจวัด

ข้อมูลปริมาณฝนตรวจวัดโดยสถานีตรวจวัดของกรมอุตุนิยมวิทยาจำนวน 4 สถานี และสถานีตรวจวัดของกรมชลประทานจำนวน 2 สถานี ซึ่งเป็นข้อมูลรายวัน โดยตรวจสอบความกลมกลืนของข้อมูลด้วยวิธี Double Mass Curve รูปแบบฝนรายปีของสถานีที่เลือกพิจารณา พบว่า มีความกลมกลืนของข้อมูลสูงและไม่ต้องปรับแก้เนื่องจากไม่มีการย้ายตำแหน่งสถานี และวิเคราะห์ความสัมพันธ์ (Correlation; R) ของข้อมูลฝนตรวจวัดแต่ละสถานีมีค่าอยู่ระหว่าง 0.66 - 0.76 (พลเพชร สมานมิตร และคณะ, 2563) โดยข้อมูลฝนตรวจวัดในช่วงปี ค.ศ. 1980 - 2019 มีค่าเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 1,100 - 1,800 (mm/year) และเติมข้อมูลตรวจวัดที่ขาดหายด้วยวิธีอัตราส่วนปกติ (Normal-Ratio Method)

2.3 แบบจำลองภูมิอากาศโลก (General Circulation Models, GCMs)

แบบจำลองภูมิอากาศโลกที่ประยุกต์ใช้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศในอนาคตซึ่งเป็นที่ยอมรับในปัจจุบัน โดยงานวิจัยนี้เลือกใช้แบบจำลองภูมิอากาศโลก CanESM2 predictors: CMIP5 experiments ที่พัฒนาโดย Environment and Climate Change Canada ด้วยวิธี Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis (CCCma) เนื่องจากเป็นที่

นิยมอย่างแพร่หลายทั้งต่างประเทศ (Asharaf & Ahrens, 2014; Huang et al., 2016; Gebremedhin et al., 2018) และประเทศไทย (เกศวรา สิริโชค และคณะ, 2561; พัลลภ สุวรรณมาลัย และคณะ, 2562; พลเพชร สมานมิตร และคณะ, 2562; พลเพชร สมานมิตร และคณะ, 2563) และเป็นแบบจำลองที่โปรแกรมลดมาตราส่วนทางสถิติ (Statistical Downscaling ; SDSM) รองรับ การลดมาตราส่วนทางสถิติ ซึ่งเป็นชุดข้อมูล Reanalysis แบบ gridded ครอบคลุมพื้นที่ทั่วโลก ภายใต้สถานการณ์จำลองการปล่อยก๊าซเรือนกระจก 3 แบบ ประกอบด้วย RCP2.6 คือ การใช้มาตรการลดก๊าซเรือนกระจกที่เข้มงวด RCP4.5 คือ การปล่อยก๊าซเรือนกระจกในระดับปานกลาง และ RCP8.5 คือ การปล่อยก๊าซเรือนกระจกในระดับสูง

3. วิธีการดำเนินการ

3.1 การลดมาตราส่วนทางสถิติ

1) การคัดเลือกตัวแปรภูมิอากาศโลกที่มีความสัมพันธ์กับปริมาณฝนตรวจวัดด้วยวิธีการคัดเลือกแบบขั้นตอน (Stepwise Selection) โดยมีขั้นตอน คือ คัดเลือกตัวแปรอิสระทีละ 1 ตัว ซึ่งเป็นตัวแปรอิสระที่มีนัยสำคัญต่อการทำนายตัวแปรตามมากที่สุดเข้าสู่ตัวแบบการถดถอยเป็นตัวแรกเมื่อ $p\text{-value} < p_{in}$ กำหนดให้ $p_{in} = 0.05$ และ $p_{out} = 0.10$ โดยคัดเลือกตัวแปรอิสระเข้าสู่ตัวแบบการถดถอยเมื่อผ่านเงื่อนไขและหยุดคัดเลือกต่อเมื่อ $p\text{-value} \geq p_{in}$ อีกทั้งมีการตรวจสอบระดับนัยสำคัญระหว่างตัวแปรอิสระตัวต่อมากับตัวก่อนหน้าในการทำนายตัวแปรตามซึ่งทำให้เกิดวิธีการคัดเลือกแบบลดตัวแปรหากเป็นไปได้ ในกรณีระดับนัยสำคัญของตัวแปรอิสระตัวต่อมากับตัวก่อนหน้าทำให้ $p\text{-value} \geq p_{in}$ ทั้งนี้โปรแกรมจะทำการซ้ำตามนิยามและหยุดการคัดเลือกต่อเมื่อไม่สามารถนำตัวแปรอิสระเข้าสู่ตัวแบบการถดถอยหรือไม่สามารถนำตัวแปรอิสระได้ออกจากตัวแบบการถดถอยได้อีก (รัฐพงศ์ ชัยเอิก และคณะ, 2560)

2) การลดมาตราส่วนทางสถิติ (Statistical Downscaling ; SDSM) ซึ่งสามารถลดมาตราส่วนในระดับสถานี (Jam et al., 2017; Gebremedhin et al., 2018) โดยตรงทำให้มีความละเอียดสูงจากผลการคัดเลือกตัวแปรภูมิอากาศโลกที่มีความสัมพันธ์กับปริมาณฝนตรวจวัด ซึ่งมีจำนวนตัวแปรที่แตกต่างกันแสดงดังตารางที่ 1 โดยทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีการถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ (Multiple

Regression Analysis) แล้วทำการสอบเทียบและทวนสอบผลการลดมาตราส่วนทางสถิติและตรวจสอบความแม่นยำด้วยดัชนีทางสถิติในหัวข้อ 3.2 โดยผลจากการลดมาตราส่วนทางสถิติสามารถนำไปสร้างภาพฉายอนาคต เช่น งานวิจัยในการสร้างภาพฉายการเกิดฝนในอนาคต (Yamal et al., 2002; Wilby et al., 2001)

3.2 การตรวจสอบความแม่นยำสำหรับการลดมาตราส่วนทางสถิติ

การประเมินผลการสอบเทียบและทวนสอบด้วยดัชนีทางสถิติ ประกอบด้วย

1) ค่าสัมประสิทธิ์ในการตัดสินใจ (Coefficient of Determination; R^2) เป็นดัชนีที่แสดงความสัมพันธ์ของข้อมูลจากการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น (Linear Regression) มีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 หากเข้าใกล้ 0 คือ ตัวแปรอิสระกับตัวแปรตามมีความสัมพันธ์ตามกันน้อย แต่ถ้าเข้าใกล้ 1 คือ ตัวแปรอิสระกับตัวแปรตามมีความสัมพันธ์ตามกันมาก แสดงสูตรคำนวณดังสมการที่ (1)

$$R^2 = \left(\frac{COV(O,M)}{\sqrt{VAR(O)VAR(M)}} \right)^2 \quad (1)$$

2) Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) เป็นดัชนีแสดงความสัมพันธ์ของความแปรปรวนระหว่างค่าการลดมาตราส่วนทางสถิติ (SDSM) กับค่าตรวจวัด ใช้คาดคะเนความแม่นยำ หากเข้าใกล้ 1 แสดงว่าผลการลดมาตราส่วนทางสถิติมีความแม่นยำสูงและมีความแปรปรวนน้อยเมื่อเทียบกับค่าตรวจวัด แต่หากเข้าใกล้ 0 แสดงถึงผลการลดมาตราส่วนทางสถิติมีความแม่นยำน้อยและมีความแปรปรวนเมื่อเทียบกับค่าตรวจวัดสูง แสดงสูตรคำนวณดังสมการที่ (2)

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - M_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (2)$$

3) รากที่สองของค่าเฉลี่ยความผิดพลาดกำลังสอง (Root Mean Square Error; RMSE) เป็นดัชนีแสดงความคลาดเคลื่อนของข้อมูลตรวจวัดกับข้อมูลการลดมาตราส่วนทางสถิติ (SDSM) แสดงสูตรคำนวณดังสมการที่ (3)

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (M_i - O_i)^2} \quad (3)$$

โดยที่ O คือ ปริมาณฝนตรวจวัด, M คือ ปริมาณฝนจากแบบจำลอง, $COV(O,M)$ คือ ความแปรปรวนระหว่างปริมาณฝนตรวจวัดกับแบบจำลอง และ VAR คือ ความแปรปรวนของข้อมูล

3.3 การฉายภาพอนาคตของปริมาณฝนภายใต้การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ

การฉายภาพอนาคตของปริมาณฝนจากการลดมาตราส่วนทางสถิติ (SDSM) จากแบบจำลอง CanESM2 ประกอบด้วย RCP2.6, RCP4.5 และ RCP8.5 แบ่งเป็น 2 ช่วงเวลา ได้แก่ ระยะเวลาอนาคตอันใกล้ปัจจุบัน (Short period) คือ ช่วงปี ค.ศ.2020 – 2035 และระยะเวลาอนาคตอันไกลจากปัจจุบัน (Long period) ช่วงปี ค.ศ.2036 – 2099 เนื่องจากเป็นเกณฑ์ของงานวิจัยที่อ้างอิงและใช้งานในกลุ่มน้ำของประเทศไทย (เกตุวรา สิทธิโชค และคณะ, 2561; สำนักงานทรัพยากรน้ำแห่งชาติ, 2562) แล้วประมาณค่าเชิงพื้นที่ด้วยวิธี Inverse Distance Weighting (IDW) (สุเพชร จิรขจรกุล, 2555) ในรูปแบบรายจังหวัดที่ครอบคลุมพื้นที่โครงการเขตพัฒนาพิเศษภาคตะวันออก (EEC) ได้แก่ ฉะเชิงเทรา ชลบุรี และระยอง

4. ผลลัพธ์และการอภิปรายผล

4.1 ผลการคัดเลือกตัวแปรภูมิอากาศโลกกับข้อมูลฝนตรวจวัด

จากการคัดเลือกตัวแปรภูมิอากาศโลกที่มีความสัมพันธ์กับข้อมูลฝนตรวจวัดด้วยวิธีคัดเลือกแบบขั้นตอน (Stepwise Selection) พบว่า ตัวแปรภูมิอากาศโลกที่มีความสัมพันธ์กับข้อมูลฝนตรวจวัดทั้ง 6 สถานี ได้แก่ ตัวแปรความชื้นสัมพัทธ์ที่ระดับความสูง 500 hPa (nceps500gl), ตัวแปรความสัมพันธ์ของความเร็วลมที่ระดับความสูง 500 hPa (ncepp5_zgl) และตัวแปรปริมาณน้ำฝน (ncepprcpgl) ซึ่งแต่ละสถานีมีจำนวนตัวแปรภูมิอากาศโลกที่มีความสัมพันธ์กับข้อมูลฝนตรวจวัดรายวันที่แตกต่างกันแสดงดังตารางที่ 1

4.2 การประเมินผลการสอบเทียบและทวนสอบด้วยดัชนีทางสถิติ

การประเมินผลการสอบเทียบและทวนสอบด้วยดัชนีทางสถิติ 3 ตัวแปร ดังหัวข้อที่ 3.2 โดยช่วงสอบเทียบพิจารณาจากค่า R^2 พบว่า ทุกสถานีมีความสัมพันธ์กันระหว่างตัวแปรภูมิอากาศโลกกับข้อมูลฝนตรวจวัดรายเดือนในระดับสูง (> 0.65) (พวงรัตน์ ทวีรัตน์, 2540) ทุกสถานี คือ $R^2 = 0.61 - 0.77$ ส่วนค่า NSE แสดงให้เห็นว่ามีความแม่นยำในระดับสูง (0.65 – 0.74) ถึงสูงมาก (0.75 – 1.00) (Moriassi et al., 2007) ทุกสถานี (NSE = 0.60 – 0.80) ส่วนความคลาดเคลื่อนประเมินด้วยค่า

RMSE พบว่า ทุกสถานีมีความคลาดเคลื่อนน้อย ในส่วนของช่วง ทวนสอบ เมื่อพิจารณาจากค่า R^2 พบว่า มีความสัมพันธ์ระหว่าง ตัวแปรภูมิอากาศโลกกับข้อมูลฝนตรวจวัดรายเดือนในระดับ ค่อนข้างสูง (0.40 – 0.64) 4 สถานี ($R^2 = 0.57 - 0.62$) และ ปานกลาง (0.20 – 0.39) 2 สถานี ($R^2 = 0.35 - 0.47$) สำหรับ ค่า NSE แสดงให้เห็นว่าความแม่นยำอยู่ในระดับที่ยอมรับได้

(0.50 – 0.64) 4 สถานี (NSE = 0.47 – 0.60) และค่อนข้างต่ำ (< 0.50) 2 สถานี (NSE = 0.24 – 0.30) แต่ผลจากสองสถานี จะถูกนำไปเฉลี่ยเชิงพื้นที่ ซึ่งจากผลความแม่นยำของสถานีส่วนใหญ่อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ โดยความคลาดเคลื่อนจากค่า RMSE แสดงให้เห็นว่ามีความคลาดเคลื่อนน้อยทุกสถานีแสดง ดังตารางที่ 2 และ รูปที่ 2

ตารางที่ 1 ตัวแปรภูมิอากาศโลกที่มีความสัมพันธ์กับข้อมูลปริมาณฝนตรวจวัดของสถานีต่าง ๆ (พลเพชร สมานมิตร และคณะ, 2563)

ตัวแปรทำนาย	ความหมาย	สถานี 1	สถานี.2	สถานี 3	สถานี 4	สถานี 5	สถานี 6
ncepmslpgl	ความดันที่ระดับน้ำทะเลปานกลาง				●	●	●
ncepp1_fgl	ความเร็วลมที่ระดับความสูง 1,000 hPa			●	●	●	●
ncepp1_ugl	ทิศทางการลมในแนวละติจูดที่ระดับความสูง 1,000 hPa						
ncepp1_vgl	ทิศทางการลมในแนวลองจิจูดที่ระดับความสูง 1,000 hPa			●		●	
ncepp1_zgl	ความสัมพันธ์ของความเร็วลมจริงที่ระดับความสูง 1,000 hPa	●		●	●	●	●
ncepp1thgl	ทิศทางของลมที่ระดับความสูง 1,000 hPa	●	●	●			
ncepp1zhgl	ความแตกต่างของลมที่ระดับความสูง 1,000 hPa	●	●	●			●
ncepp5_fgl	ความเร็วลมที่ระดับความสูง 500 hPa			●		●	
ncepp5_ugl	ทิศทางการลมในแนวละติจูดที่ระดับความสูง 500 hPa	●				●	
ncepp5_vgl	ทิศทางการลมในแนวลองจิจูดที่ระดับความสูง 500 hPa	●	●				
ncepp5_zgl	ความสัมพันธ์ของความเร็วลมที่ระดับความสูง 500 hPa	●	●	●	●	●	●
ncepp5thgl	ทิศทางของลมที่ระดับความสูง 500 hPa						
ncepp5zhgl	ความแตกต่างของลมจริงที่ระดับความสูง 500 hPa		●				
ncepp8_fgl	ความเร็วลมที่ระดับความสูง 850 hPa	●		●			
ncepp8_ugl	ทิศทางการลมในแนวละติจูดที่ระดับความสูง 850 hPa						
ncepp8_vgl	ทิศทางการลมตามแนวลองจิจูดที่ระดับความสูง 850 hPa	●	●	●	●		●
ncepp8_zgl	ความสัมพันธ์ของความเร็วลมจริงที่ระดับความสูง 850 hPa			●	●	●	●
ncepp8thgl	ทิศทางของลมที่ระดับความสูง 850 hPa	●		●	●	●	●
ncepp8zhgl	ความแตกต่างของลมจริงที่ระดับความสูง 850 hPa	●	●			●	
ncepp500gl	ศักยภาพแรงโน้มถ่วงของโลกที่ระดับความสูง 500 hPa		●		●		
ncepp850gl	ศักยภาพแรงโน้มถ่วงของโลกที่ระดับความสูง 850 hPa		●	●			
ncepprcpgl	ปริมาณน้ำฝน	●	●	●	●	●	●
nceps500gl	ความชื้นสัมพัทธ์ที่ระดับความสูง 500 hPa	●	●	●	●	●	●
nceps850gl	ความชื้นสัมพัทธ์ที่ระดับความสูง 850 hPa			●	●	●	●
ncepslumgl	ความชื้นสัมพัทธ์ที่ระดับความสูง 1,000 hPa	●				●	
nceptempgl	อุณหภูมิเฉลี่ยที่ระดับความสูง 2 m			●	●		

หมายเหตุ : สถานี 1 คือ 030333, สถานี 2 คือ 060131, สถานี 3 คือ กรุงเทพมหานคร, สถานี 4 คือ ชลบุรี/สัตหีบ, สถานี 5 คือ เขาค้อ และ สถานี 6 คือ พัทลุง

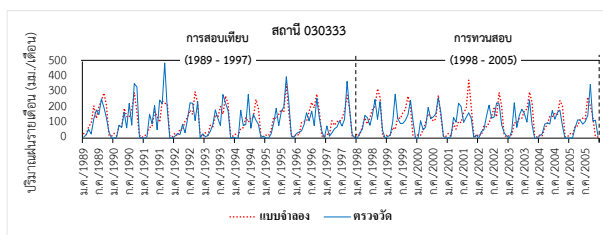
4.3 ภาพฉายอนาคตของปริมาณฝนรายปีเฉลี่ยเชิงพื้นที่

แสดงผลการฉายภาพอนาคตของปริมาณฝนรายปีเฉลี่ยเชิงพื้นที่รายจังหวัดที่ครอบคลุม พื้นที่การศึกษา ได้แก่ ฉะเชิงเทรา ชลบุรี และระยอง ภายใต้ 3 กรณี ได้แก่ RCP2.6

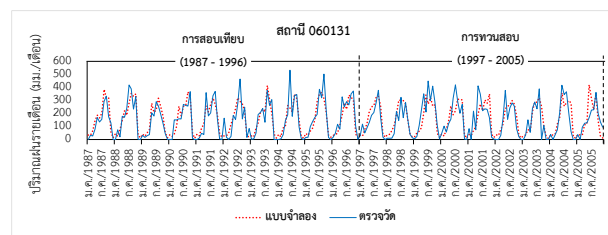
ไกลจากปัจจุบัน (Long period) ค.ศ.2036 – 2099 เปรียบเทียบกับปริมาณฝนตรวจวัดเฉลี่ยเชิงพื้นที่ช่วงเวลา ค.ศ.1980 – 2019 แสดงดังรูปที่ 3 ถึง รูปที่ 5 จากการเปรียบเทียบของจังหวัด ฉะเชิงเทรา ทั้งระยะเวลานานก่อนใกล้ปัจจุบันและระยะเวลา

ตารางที่ 2 ผลการสอบเทียบและทวนสอบจากการลดมาตราส่วนทางสถิติของข้อมูลปริมาณฝนแต่ละสถานี (พลเพชร สมานมิตร และคณะ, 2563)

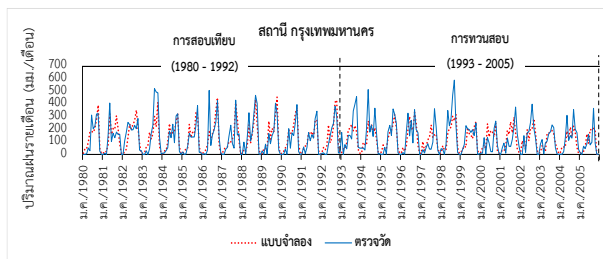
สถานี	การสอบเทียบ			การทวนสอบ		
	R ²	NSE	RMSE	R ²	NSE	RMSE
030333	0.61	0.60	64.90	0.47	0.30	66.80
060131	0.77	0.77	65.39	0.62	0.59	81.87
กรุงเทพมหานคร	0.73	0.73	70.58	0.53	0.52	87.50
ชลบุรี/สัตหีบ	0.70	0.70	58.21	0.35	0.24	88.47
เขาอีโต้	0.74	0.73	75.81	0.57	0.47	100.54
พัทยา	0.71	0.70	47.67	0.57	0.56	60.02



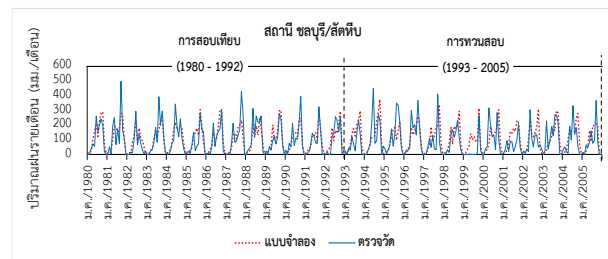
(ก)



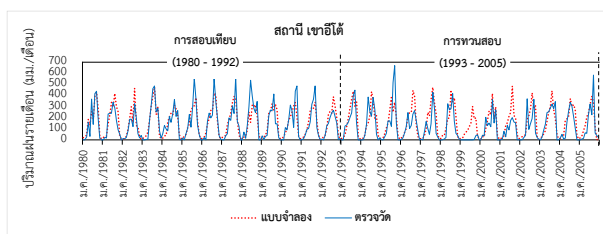
(ข)



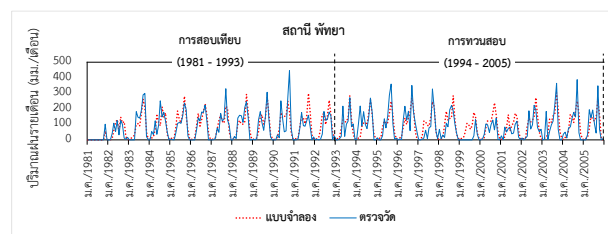
(ค)



(ง)



(จ)



(ฉ)

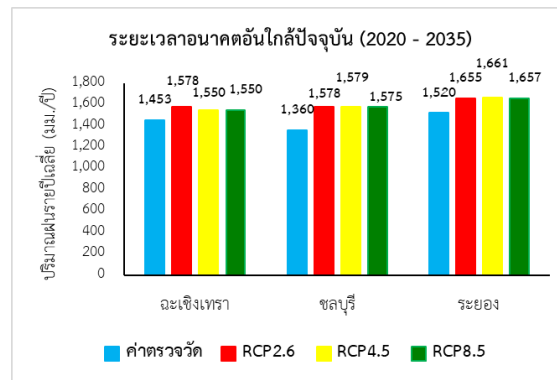
รูปที่ 2 เปรียบเทียบปริมาณฝนตรวจวัดกับปริมาณฝนจากการลดมาตราส่วนทางสถิติของสถานีต่าง ๆ (พลเพชร สมานมิตร และคณะ, 2563)

RCP4.5 และ RCP8.5 แบ่งเป็น ระยะเวลานานก่อนใกล้ปัจจุบัน (Short period) คือ ค.ศ. 2020 – 2035 และระยะเวลานานก่อน

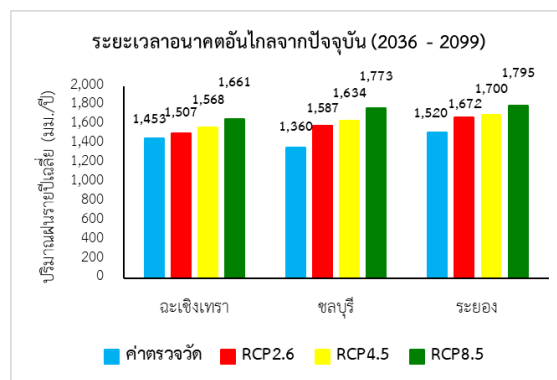
อนาคตอันไกลจากปัจจุบันมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยกรณี RCP2.6 เพิ่มขึ้นร้อยละ 3 – 9 ส่วนกรณี RCP4.5 เพิ่มขึ้นร้อยละ 6 – 8

และกรณี RCP8.5 เพิ่มขึ้นร้อยละ 6 – 14 ในส่วนของจังหวัดชลบุรี ทั้งระยะเวลาอนาคตอันใกล้ปัจจุบันและระยะเวลาอนาคตอันไกลจากปัจจุบันมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน โดยกรณี RCP2.6 เพิ่มขึ้นร้อยละ 16 – 17 ส่วนกรณี RCP4.5 เพิ่มขึ้นร้อยละ 16 – 20 และกรณี RCP8.5 เพิ่มขึ้นร้อยละ 15 – 30 ซึ่งเป็นจังหวัดที่มีร้อยละการเพิ่มขึ้นมากที่สุด และจังหวัดระยอง มีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับสองจังหวัดแรกทั้งระยะเวลาอนาคตอันใกล้ปัจจุบันและระยะเวลาอนาคตอันไกลจากปัจจุบัน โดยกรณี RCP2.6 เพิ่มขึ้นร้อยละ 8 – 10 ส่วนกรณี RCP4.5 เพิ่มขึ้นร้อยละ 9 – 12 และกรณี RCP8.5 เพิ่มขึ้นร้อยละ 9 – 12 จากการพิจารณาผลรูปที่ 3 จึงกล่าวได้ว่าในอนาคตภายใต้การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศทุกกรณีมีโอกาสที่ปริมาณฝนรายปีจะเพิ่มขึ้นแต่ไม่มากนักซึ่งขึ้นอยู่กับการกระจายตัวของฝนแต่ละจังหวัดด้วย แต่ผลในรูปที่ 3 เป็นค่าเฉลี่ย เพื่อให้เห็นความแปรปรวนตามช่วงเวลาอนาคตในปีต่าง ๆ จึงแสดงผลต่อไปในรูปที่ 4

จากรูปที่ 4 พิจารณาปริมาณฝนตรวจวัดเฉลี่ยเชิงพื้นที่กับภาพฉายอนาคตของปริมาณฝนรายปีช่วงปี ค.ศ.2006 – 2019 พบว่า มีแนวโน้มทั้งเหมือนและแตกต่างกับทั้ง 3 กรณี ทั้งเชิงปริมาณและความแปรปรวนที่เพิ่มขึ้นและลดลงที่แตกต่างกันในแต่ละปี ซึ่งความแตกต่างนี้เกิดขึ้นภายใต้การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศโลกที่แตกต่างกัน สำหรับการกระจายตัวของปริมาณฝนเชิงพื้นที่ทั้งปริมาณฝนตรวจวัดเฉลี่ยเชิงพื้นที่ และภาพฉายอนาคตของปริมาณฝนรายปีเชิงพื้นที่ทั้งระยะเวลาอนาคตอันใกล้ปัจจุบัน และ ระยะเวลาอนาคตอันไกลจากปัจจุบัน มีรูปแบบการกระจายตัวที่ยังคงเป็นลักษณะเดิม คือพื้นที่แถบที่ติดทะเลของจังหวัดชลบุรีและระยองจะเป็นส่วนที่มีปริมาณฝนน้อยและเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ มายังตอนกลางของพื้นที่และมีปริมาณฝนมากที่สุดในแถบที่ติดกับจังหวัดจันทบุรีที่มีปริมาณฝนรายปีมาก (1,500 – 2,500 mm/year) ซึ่งมีอิทธิพลต่อพื้นที่การศึกษาด้วย แต่ในอนาคตปริมาณฝนจะมีความแตกต่างกัน คือ การเปลี่ยนแปลงเพิ่มมากขึ้นภายใต้การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศในแต่ละกรณี ได้แก่ RCP2.6 RCP4.5 และ RCP8.5 แสดงดังรูปที่ 5



(ก)



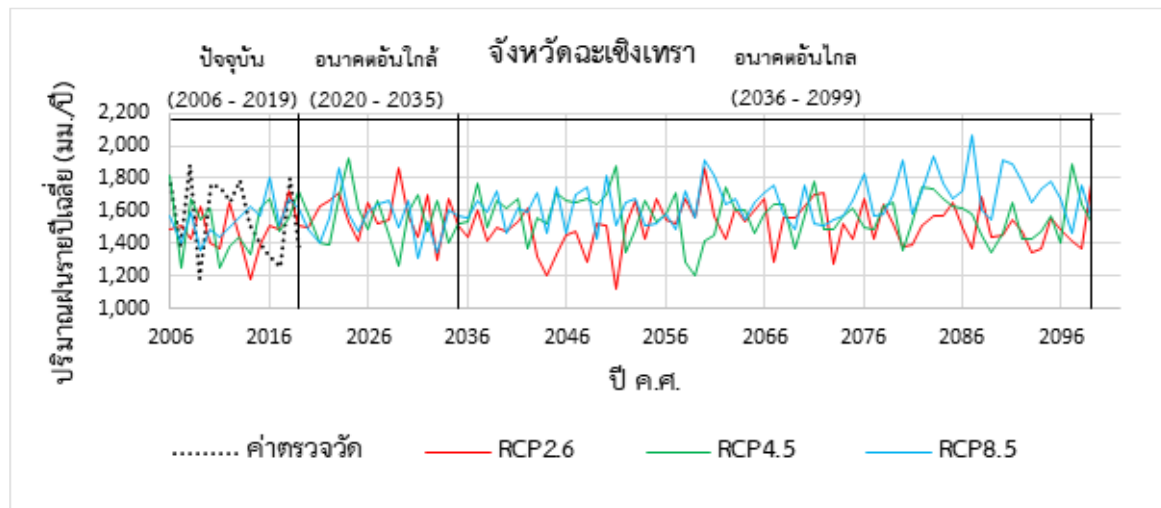
(ข)

รูปที่ 3 เปรียบเทียบปริมาณฝนรายปีเฉลี่ยเชิงพื้นที่กรณีต่าง ๆ

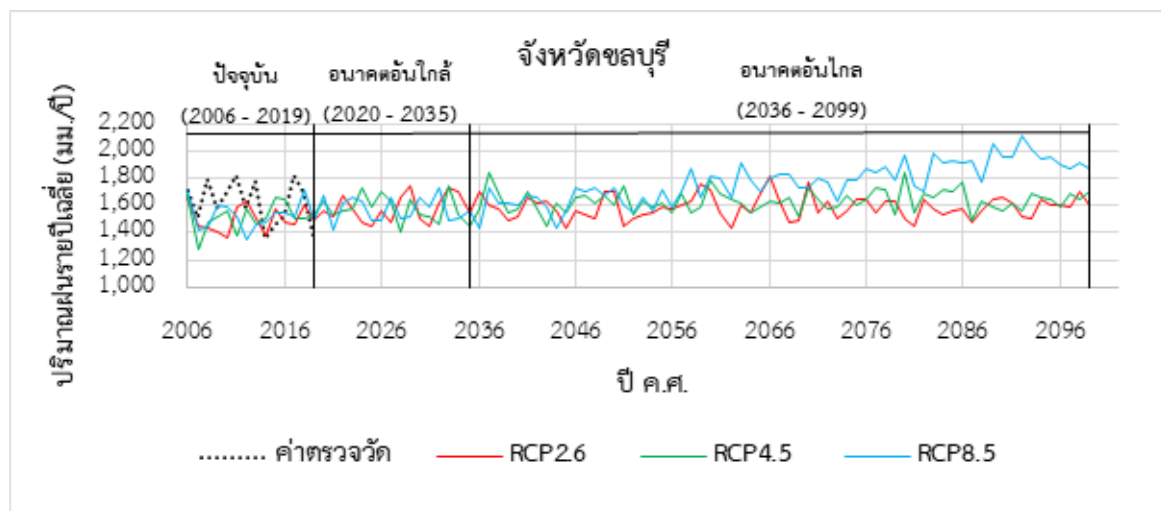
4.4 ภาพฉายอนาคตของปริมาณฝนรายเดือนเฉลี่ยเชิงพื้นที่

แสดงผลเป็นกราฟแท่งเปรียบเทียบระหว่างปริมาณฝนรายเดือนตรวจวัดเชิงพื้นที่กับภาพฉายอนาคตของปริมาณฝนรายเดือนกรณี RCP2.6 RCP4.5 และ RCP8.5 แบ่งเป็นระยะเวลาอนาคตอันใกล้ปัจจุบัน (Short period) คือ ช่วงปี ค.ศ.2020 – 2035 และ ระยะเวลาอนาคตอันไกลจากปัจจุบัน (Long period) ช่วงปี ค.ศ.2036 – 2099 แสดงดังรูปที่ 6

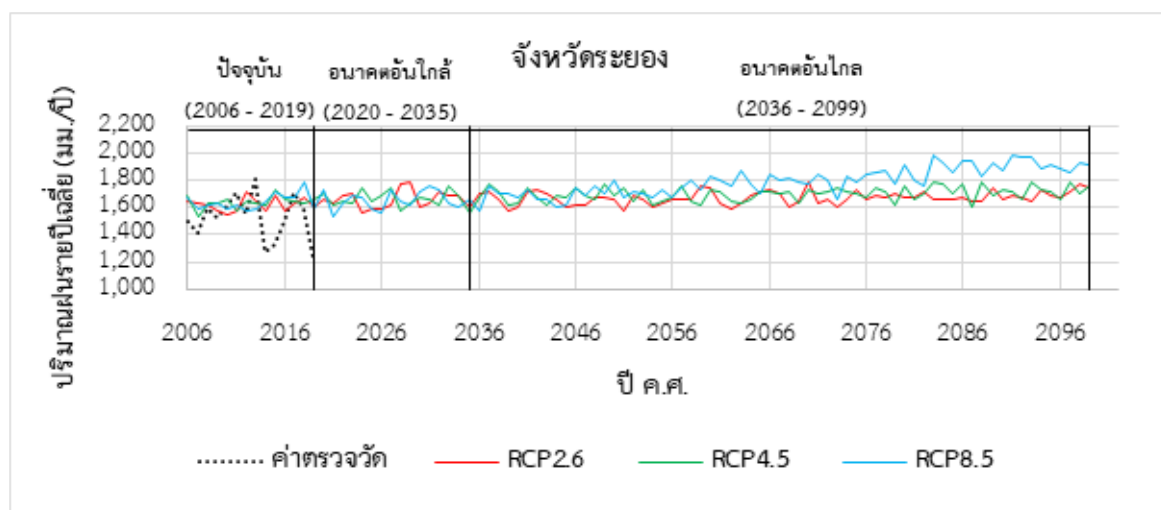
พิจารณาจังหวัดฉะเชิงเทรา พบว่า ทั้งระยะเวลาอนาคตอันใกล้ปัจจุบันและระยะเวลาอนาคตอันไกลจากปัจจุบัน มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงที่เหมือนกัน โดยมีปริมาณฝนรายเดือนเฉลี่ยลดลงมากที่สุดในเดือนพฤศจิกายน (เปลี่ยนแปลงร้อยละ 61 – 70) ส่วนช่วงเดือนที่ปริมาณฝนรายเดือนเฉลี่ยเพิ่มขึ้นมากที่สุดคือเดือนกันยายน (เปลี่ยนแปลงร้อยละ 38 – 89) โดยปริมาณฝนรายเดือนตรวจวัดเชิงพื้นที่ของจังหวัดฉะเชิงเทราจะมีปริมาณฝนมากที่สุดในเดือนกันยายน ซึ่งภาพฉายอนาคตของปริมาณฝนรายเดือนเฉลี่ยมีแนวโน้มเช่นเดียวกับปริมาณฝนตรวจวัดเชิงพื้นที่



(ก)



(ข)

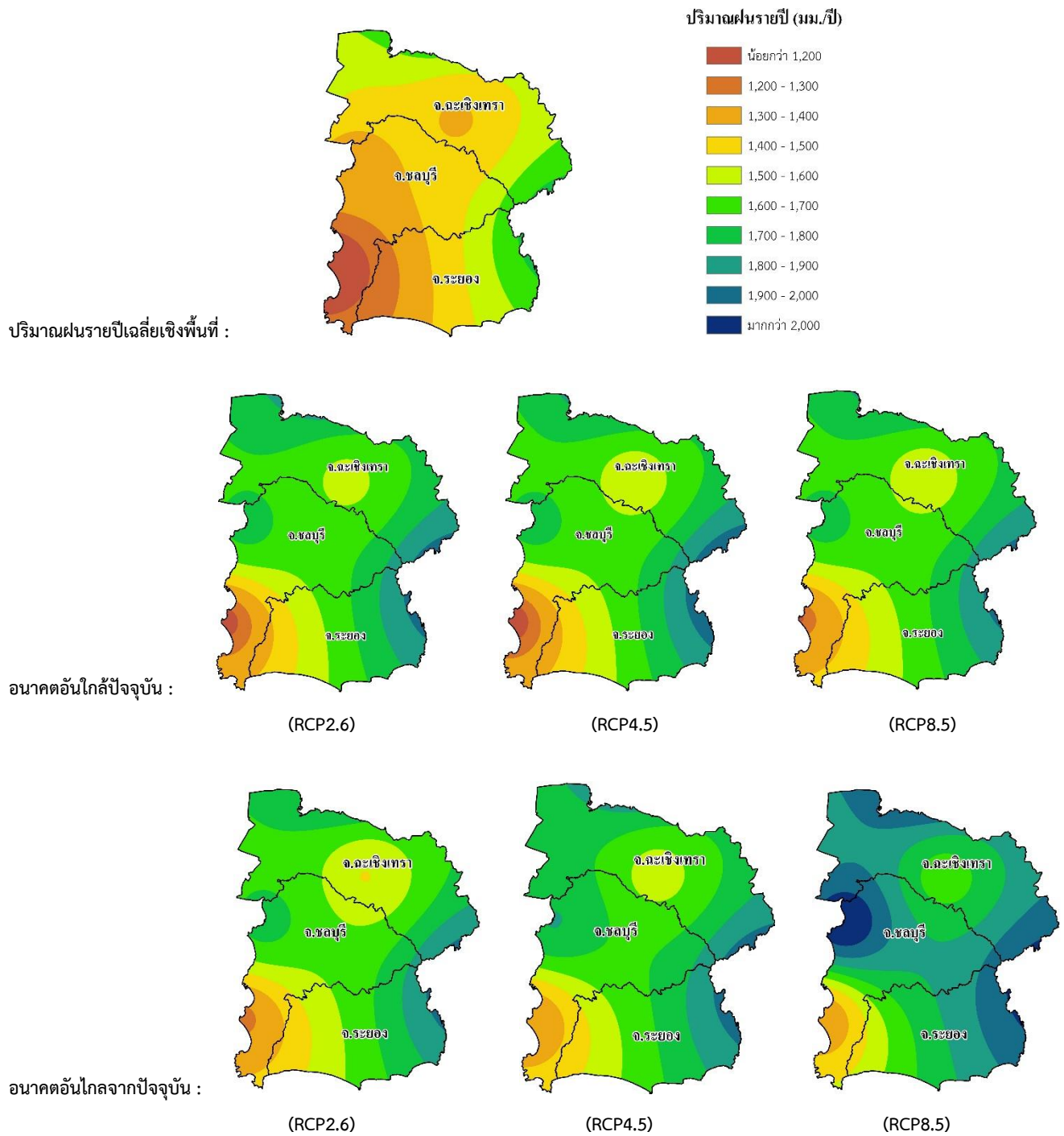


(ค)

รูปที่ 4 เปรียบเทียบปริมาณฝนรายปีเฉลี่ยเชิงพื้นที่รายจังหวัดกรณีต่าง ๆ

ในส่วนของจังหวัดชลบุรีและระยอง ทั้งระยะเวลาอนาคตอันใกล้ปัจจุบันและระยะเวลาอนาคตอันไกลจากปัจจุบัน มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงภาพรวมเหมือนกัน แต่เดือนที่มีปริมาณฝนลดลงมากที่สุดมีความแตกต่างกัน โดยอนาคตอันใกล้ เดือนมกราคมมีการเปลี่ยนแปลงลดลงร้อยละ 21 – 30

ส่วนระยะเวลาอนาคตอันไกลจากปัจจุบัน เดือนกันยายนเปลี่ยนแปลงลดลงร้อยละ 16 – 33 ส่วนเดือนที่มีปริมาณฝนเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นทั้งระยะเวลาอนาคตอันใกล้ปัจจุบันและระยะเวลาอนาคตอันไกลจากปัจจุบันเหมือนกัน คือ พฤษภาคม (มากกว่าร้อยละ 62) เมื่อพิจารณาเดือนที่มีปริมาณฝนตรวจวัด

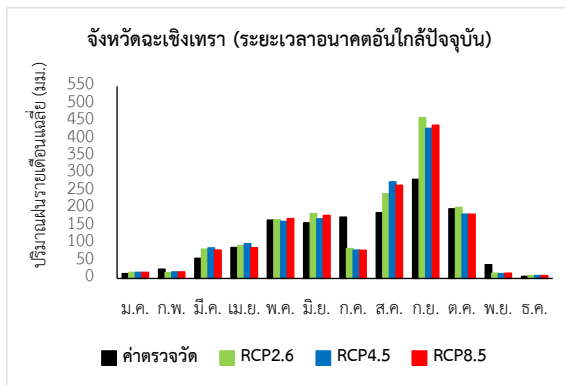


รูปที่ 5 แผนที่การกระจายตัวของปริมาณฝนรายปีเฉลี่ยเชิงพื้นที่ที่กรณีต่าง ๆ

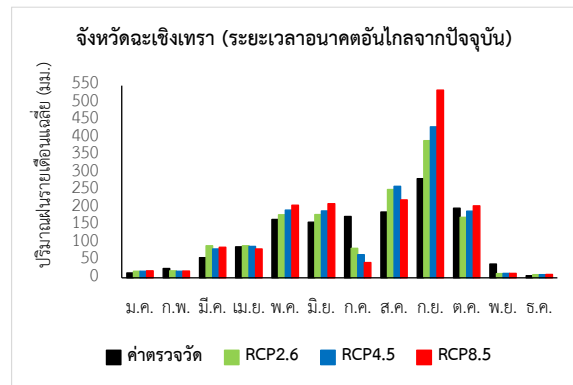
รายเดือนเฉลี่ยเชิงพื้นที่ที่สูงที่สุด คือ กันยายน แต่จากภาพฉายอนาคตของปริมาณฝนรายเดือนเฉลี่ยมีการเปลี่ยนช่วงเดือนที่มีปริมาณฝนสูงสุดเป็นเดือนพฤษภาคมและเดือนตุลาคม

แสดงให้เห็นว่าในอนาคตภายใต้การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศตามนิยามของ RCPs มีโอกาสเกิดความแปรปรวนของปริมาณฝนในพื้นที่การศึกษา ซึ่งหากพิจารณาในรูปแบบ

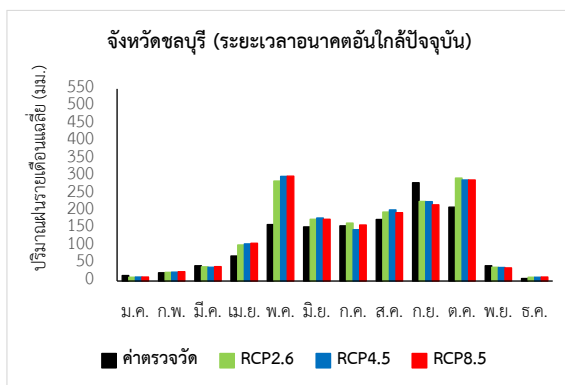
ปริมาณฝนรายปีมีโอกาสมากขึ้นและก็อาจลดลงสลับช่วงกันในอนาคตแต่ละปี แต่เมื่อพิจารณาในรูปแบบปริมาณฝนรายเดือนเฉลี่ย แสดงให้เห็นว่าอาจมีการเปลี่ยนแปลงช่วงเดือนที่ฝนตกทั้งเดือนที่มีปริมาณฝนตกน้อยและเดือนที่มีปริมาณฝนตกมากหรืออาจมีแนวโน้มเหมือนสถานการณ์ปัจจุบันดังเช่นจังหวัดฉะเชิงเทรา



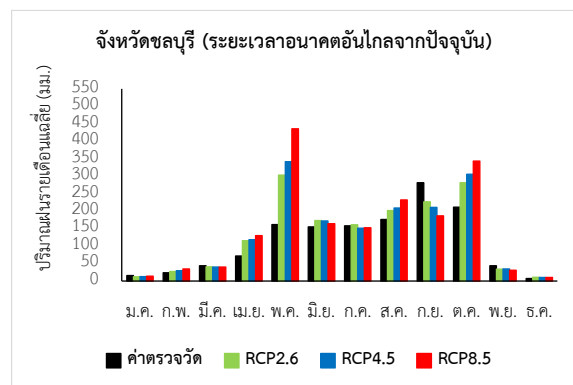
(ก)



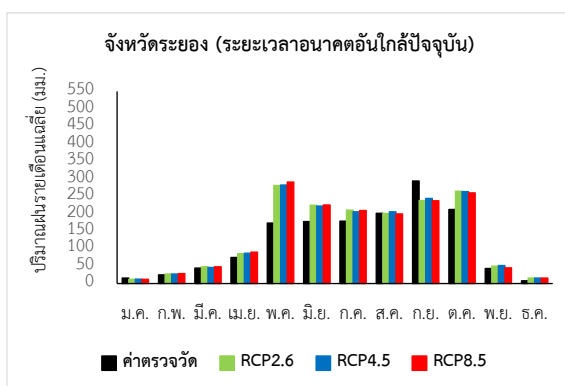
(ข)



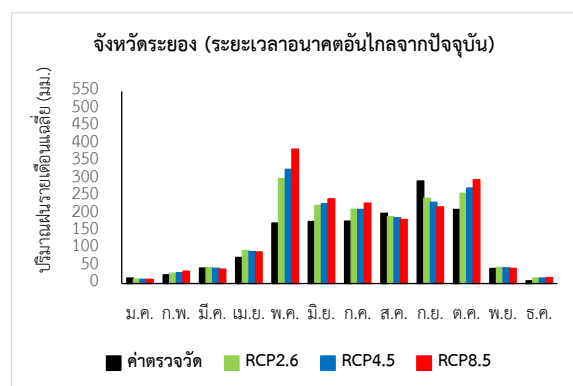
(ค)



(ง)



(จ)



(ฉ)

หมายเหตุ : ค่าตรวจวัด = ปริมาณฝนตรวจวัดรายเดือนเฉลี่ย, ระยะเวลาอนาคตอันใกล้ปัจจุบัน = ช่วงปี ค.ศ.2020 - 2035 และ ระยะเวลาอนาคตอันไกลจากปัจจุบัน = ช่วงปี ค.ศ. 2036 - 2099

รูปที่ 6 กราฟเปรียบเทียบภาพฉายอนาคตของปริมาณฝนรายเดือนเฉลี่ยกรณีต่าง ๆ เมื่อเทียบกับปริมาณฝนรายเดือนเฉลี่ยตรวจวัด

5. สรุปผลและข้อเสนอแนะ

การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศมีผลกระทบต่อปริมาณฝน ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่รองรับการพัฒนาโครงการเขตพัฒนาพิเศษภาคตะวันออก ในงานวิจัยนี้เลือกใช้แบบจำลอง CanESM2 ภายใต้ 3 สถานการณ์ คือ RCP2.6, RCP4.5 และ RCP8.5 โดยแบ่งเป็น 2 ช่วงเวลา ได้แก่ ระยะเวลาอนาคตอันใกล้ปัจจุบัน (Short period) คือ ช่วงปี ค.ศ.2020 – 2035 และระยะเวลาอนาคตอันไกลจากปัจจุบันไกล (Long period) ช่วงปี ค.ศ.2036 – 2099 ผลการศึกษาสรุปได้ว่า ในอนาคตภายใต้การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ จากภาพฉายอนาคตของปริมาณฝนรายปีเฉลี่ยเชิงพื้นที่ที่มีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเทียบกับปริมาณฝนตรวจวัดรายปีเฉลี่ย โดยกรณี RCP2.6 เพิ่มขึ้นร้อยละ 3 – 17 ส่วนกรณี RCP4.5 เพิ่มขึ้นร้อยละ 6 – 20 และกรณี RCP8.5 เพิ่มขึ้นร้อยละ 6 – 30 เมื่อพิจารณาภาพฉายอนาคตของปริมาณฝนรายเดือนเชิงพื้นที่ในส่วนของจังหวัดชลบุรีและระยอง พบว่า มีการเปลี่ยนแปลงเดือนที่เกิดปริมาณฝนสูงสุดจากเดือนกันยายนเป็นพฤษภาคมและตุลาคม แต่จังหวัดฉะเชิงเทรายังคงเกิดปริมาณฝนสูงสุดในเดือนกันยายนเช่นเดิม สำหรับผลการวิจัยนี้จะเป็นข้อมูลสนับสนุนการบริหารจัดการน้ำในอนาคตระยะยาว เพื่อเตรียมพร้อมในการปรับตัวภายใต้การเปลี่ยนแปลงของปริมาณฝนในอนาคตได้อย่างเหมาะสม และเป็นข้อมูลสนับสนุนงานวิจัยอื่น ๆ ที่มีการดำเนินการวิจัยในพื้นที่การศึกษาต่อไป

จากผลการวิจัยนี้สามารถนำข้อมูลไปใช้ประโยชน์ในการวิจัยต่อเนื่อง เช่น การวิเคราะห์ดัชนีความแห้งแล้ง (Drought Index) ซึ่งมีการวิเคราะห์ในรูปแบบข้อมูลรายเดือนหรือรายปี รวมถึงสามารถนำข้อมูลไปใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณน้ำทำในอนาคตภายใต้การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ หรือเป็นข้อมูลประกอบการคำนวณปริมาณความต้องการน้ำภาคเกษตรกรรมในส่วนของการคำนวณฝนใช้การ ดังนั้น เมื่อผ่านกระบวนการนำข้อมูลจากงานวิจัยนี้ไปใช้ประโยชน์แล้วจะทำให้สามารถวิเคราะห์สมดุลน้ำและการขาดแคลนน้ำเพื่อเป็นข้อมูลสนับสนุนการบริหารจัดการน้ำของพื้นที่การศึกษาต่อไป ทั้งนี้ยังสามารถพัฒนาผลการวิจัยให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น คือ การปรับค่าอคติ (Bias Correction) ซึ่งทำให้ปริมาณฝนรายเดือนมีความแม่นยำมากยิ่งขึ้นและอาจสามารถวิเคราะห์ได้ถึงฝนรายวันได้

แต่งงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการสนับสนุนการบริหารจัดการน้ำในรูปแบบรายฤดูกาลหรือรายปีและไม่มีมีการปรับแก้ค่าอคติเชิงวิเคราะห์ในรูปแบบฝนรายเดือนและฝนรายปี

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากอาจารย์ที่ปรึกษางานวิจัยและคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน ในการให้คำแนะนำสำหรับกระบวนการวิจัย จึงขอขอบพระคุณทุกท่านเป็นอย่างยิ่ง ที่มีส่วนช่วยให้งานวิจัยนี้ประสบความสำเร็จตามวัตถุประสงค์ทุกประการ

7. เอกสารอ้างอิง

เศวรา สิริโชค, จุติเทพ วงษ์เพ็ชร, นิธิธิด์ สงวนเดือน และไชยาพงษ์ เทพประสิทธิ์. (2561). *ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศต่อปริมาณน้ำท่าในพื้นที่ลุ่มน้ำเพชรบุรี*. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

พัลลภ สุวรรณมาลัย, จุติเทพ วงษ์เพ็ชร และ เศวรา สิริโชค. (2562). การคัดเลือกตัวแปรภูมิอากาศโลกที่มีความสัมพันธ์กับข้อมูลสภาพภูมิอากาศท้องถิ่นที่มีอิทธิพลต่อความต้องการน้ำของพืชในพื้นที่โครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาสองพี่น้อง. *การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทยระดับชาติ ครั้งที่ 20* (น. 179-185). สมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย.

พลเพชร สมานมิตร, จุติเทพ วงษ์เพ็ชร, ทรงศักดิ์ ภัทราวุฒิชัย และบัญชา ขวัญยืน. (2562). การลดมาตราส่วนทางสถิติสำหรับฝนรายวันภายใต้การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ: กรณีศึกษาสถานีอุตุนิยมวิทยาชลบุรี-สัตหีบ. *การประชุมวิชาการระดับชาติ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ครั้งที่ 16* (น. 373-382). มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน.

พลเพชร สมานมิตร, จุติเทพ วงษ์เพ็ชร, เศวรา สิริโชค และบัญชา ขวัญยืน. (2563). การลดมาตราส่วนทางสถิติสำหรับฝนรายเดือนภายใต้การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศในพื้นที่โครงการ

- เขตพัฒนาพิเศษภาคตะวันออก. การประชุมวิชาการ ครั้งที่ 4 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา (น.362-369). https://www.src.ku.ac.th/conference/Proceeding_2020
- พวงรัตน์ ทวีรัตน์. (2540). วิธีการวิจัยทางพฤติกรรมศาสตร์และสังคมศาสตร์. สำนักพิมพ์กรุงเทพฯ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ประสานมิตร.
- รัฐพงศ์ ชัยเอิก, ปริม ชูคากร และ วรณพร จันโทภาส. (2560). วิธีการคัดเลือกตัวแปรในการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ. มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- สุเพชร จิระจกุล. (2555). เรียนรู้ระบบภูมิสารสนเทศด้วยโปรแกรม ArcGIS Desktop 9.3.1. ภาควิชาเทคโนโลยีชนบท คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
- สำนักงานทรัพยากรน้ำแห่งชาติ. (2562). โครงการศึกษาเพื่อจัดทำแผนหลักการพัฒนาและจัดการทรัพยากรน้ำภาคตะวันออก. http://www.onwr.go.th/?page_id=3924
- อภินันท์ พิชโรภาสวัฒนกุล. (2553). ผลกระทบและแนวทางการปรับตัวของเกษตรกรผู้ปลูกมันสำปะหลังต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ กรณีศึกษา: จังหวัดนครราชสีมา. วารสารเศรษฐศาสตร์และนโยบายสาธารณะ, 8(16), 18-27.
- Asharaf, S. & Ahrens, B. (2014). Indian Summer Monsoon Rainfall Processes in Climate Change Scenarios. *American Meteorological Society*, 28, 5414-5429.
- Bonsal, B. R. & Prowse, T. D. (2005). Regional Assessment of GCM-Simulated Current Climate over Northern Canada. *The Arctic Institute of North America*, 59, 115-128.
- Gebremedhin, M. A., Abraha, A. Z. & Fenta, A. A. (2018). Changes in future climate indices using Statistical Downscaling Model in the upper Baro basin of Ethiopia. *Theor Appl Climatol*, 133, 39-46.
- Huang, Y. F., Ang, J. T., Tionga, Y. J., Mirzaei, M. & Mat, M. Z. (2016). Drought Forecasting using SPI and EDI under RCP-8.5 Climate Change Scenarios for Langat River Basin, Malaysia. *Procedia Engineering*, 154, 710-717.
- IPCC. (2014). Climate Change 2014: *Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC. Geneva. Switzerland.
- Jam, A. S., Reihan, M. K., Saravi, M. M., Bazrafshan, J. & Sigaroudi, S. K. (2017). Investigation of Climate Change Effect on Drought Characteristics in the Future Period using the HadCM3 model (Case Study: Khoy Station, Northwest of Iran). *Desert*, 22(1), 43-50.
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D. & Veith, T. L. (2007). Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 50(3), 885-900.
- Yamal, B., Comrie, A. C., Frakes, B. & Brown, D. P. (2002). Developments and prospects in synoptic climatology. *The 21th International Journal of Climatology* (pp. 1923-1950). <https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/joc.675>
- Wilby, R. L., Dawson, C. W. & Barrow, E. M. (2001). SDSM a decision support tool the assessment of regional climate change impacts. *Environmental Modelling & Software*, 17(2), 145-157.

ปัจจัยและประสิทธิภาพของวัสดุต้านทานการเกิดคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีต

กรณีศึกษา จังหวัดนครปฐม

Factors and Performance of Material Carbonation Resistance to Concrete

Case study : Nakhon Pathom Province

บัญญัติ วารินทรไศล^{1*} และ ปิตินันท์ กร่ำมาตร์²

Banyut Warinlai and Pitisan Krammart

¹สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม จังหวัดนครปฐม

²ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี

¹Civil Engineering, Faculty of Science and Technology, Nakhonpathom Rajabhat University, Nakhonpathom

²Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, PathumThani

*Corresponding author: nowsurvey@hotmail.com

(Received: 19 May 2020, Revised: 31 August 2020, Accepted: 18 June 2021)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาปัจจัย และประสิทธิภาพของวัสดุต้านทานการเกิดคาร์บอนเนชั่นในคอนกรีตในสภาวะแวดล้อม กรณีศึกษา จังหวัดนครปฐม โดยใช้ สี และมอร์ตาร์ปูนฉาบ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 0.55 และ 0.65 ตามลำดับ ทดสอบความลึกคาร์บอนเนชั่น หลังก่อคอนกรีตอยู่ในสภาวะแวดล้อมครบ 120 210 และ 300 วัน ผลศึกษาสรุปว่า ความลึกคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีตที่ทาสี และคอนกรีตที่ฉาบปูน มีค่าน้อยกว่าคอนกรีตเปลือย คอนกรีตที่ทาสี และคอนกรีตที่ฉาบปูนช่วยให้สัมประสิทธิ์คาร์บอนเนชั่นลดลงร้อยละ 75 และ 60 ตามลำดับ ผลลัพธ์จากการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองคณิตศาสตร์ แสดงเป็นสัมประสิทธิ์อัตราเร็วการเกิดคาร์บอนเนชั่น เนื่องจากทาสี (β_{pc}) ค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราเร็วการเกิดคาร์บอนเนชั่นเนื่องจากมอร์ตาร์ปูนฉาบ (β_{mc}) และสัมประสิทธิ์ของอัตราเร็วการเกิดคาร์บอนเนชั่นเนื่องจากสีที่ผิวมอร์ตาร์ปูนฉาบ (β_{pm}) ผลลัพธ์สามารถใช้ออกแบบ วางแผนดูแลรักษาโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ต้องเผชิญสภาวะแวดล้อมคาร์บอนเนชั่นในจังหวัดนครปฐม โดยฉาบปูนหนา 10 มิลลิเมตร หรือใช้สีน้ำอะคริลิคสำหรับทาภายนอกเคลือบผิวคอนกรีตอีกหนึ่งชั้น

คำสำคัญ: คาร์บอนเนชั่น, สัมประสิทธิ์คาร์บอนเนชั่น, สี, มอร์ตาร์ปูนฉาบ, สมการคณิตศาสตร์

Abstract

This research aims to verify the influenced factors and performances of carbonation-resistance materials for concrete. The laboratory was mainly conducted at Nakhon Pathom province. The carbonation-resistance materials investigated in this research are painting colour and plaster for carbonation resistance of concrete. The water to binder ratios were 0.45 0.55 and 0.55 respectively. Tests for the depth of carbonation after the concrete was left

in the environment were conducted at 120, 210, and 300 days. The results show that the carbonation depth of painting colour and plaster is less than bare concrete. Painting colour and plaster contributed a 75% and 60% reduction in the carbonation coefficient, respectively. Results from mathematical model analysis. Expressed as the velocity coefficient of carbocation due to paint (β_{pc}), Coefficient of rate of carbonation due to plaster (β_{mc}), and the coefficient of the rate of carbocation due to the colour of the plaster surface (β_{pm}). The results can be used for designed and maintaining plan of reinforced concrete structures that are exposed to the carbonation environment at Nakhon Pathom Province by plastering 10 mm thick or use acrylic paint for another coat of concrete exterior.

Keywords: Carbonation, Carbonation coefficient, Painting colour, Plaster, The mathematical model

1. บทนำ

ปัจจุบัน คอนกรีตนิยมในงานก่อสร้างแต่ต้องออกแบบแข็งแรงทนทานตลอดอายุการใช้งาน โดยปราศจากการซ่อมแซมในระดับที่เกินการคาดหมาย ปกติวิศวกรจะคำนึงถึงกำลัง แต่คำนึงถึงสภาวะแวดล้อมที่คอนกรีตสัมผัสค่อนข้างน้อย คอนกรีตจึงไม่คงทน โดยเฉพาะจะเสื่อมสภาพอย่างรวดเร็วในสภาวะแวดล้อมที่รุนแรง ทำให้สมบัติทางกล และ อายุใช้งานของโครงสร้างลดลง โดยการเสื่อมสภาพคอนกรีตมีหลายประเภท ทั้งหมดขึ้นกับสภาวะแวดล้อม เช่น เนื่องจากคาร์บอนเนชั่น จากงานวิจัยการนำวัสดุเหลือทิ้งมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ เช่น ฟูนินปูน ผลวิจัยมีแนวโน้มที่ช่วยลดการเกิดคาร์บอนเนชั่นได้ (Warinlai, 2014) ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิ มีผลต่อการเกิดคาร์บอนเนชั่น โดยความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 50 - 75 ทำให้อัตราการเกิดคาร์บอนเนชั่นสูง (Roy, 1998) (Khunthongkeaw, 2006) และ (Cengiz, 2003) พบว่าชนิดของวัสดุประสานมีผลต่อการเกิดคาร์บอนเนชั่น โดยการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยทำให้เกิดคาร์บอนเนชั่นได้เร็วขึ้น

อำเภอเมือง จังหวัดนครปฐม มีการจราจรหนาแน่น เฉลี่ยประมาณ 100,000 คันต่อวัน (Department of Highway, 2017) ทำให้มีปริมาณความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูง 600 ppm อาจมีความเสี่ยงต่อการการเสื่อมสภาพเนื่องจากคาร์บอนเนชั่นค่อนข้างมาก โดยความเป็นต่างของคอนกรีตในบริเวณที่เกิดคาร์บอนเนชั่นต่ำลงเนื่องจากแคลเซียมไฮดรอกไซด์

(Ca(OH)₂) ถูกใช้ในปฏิกิริยาคาร์บอนเนชั่น ทำให้เหล็กเสริมเป็นสนิมได้ ถ้าคาร์บอนเนชั่นเกิดเข้าไปถึงเหล็กเสริม ทำให้ความเป็นต่างของคอนกรีตรอบเหล็กลดต่ำลงถึงระดับวิกฤติ

โครงสร้างคอนกรีตที่ก่อสร้างในเขตจังหวัดนครปฐมกับในสถานที่จังหวัดอื่น ๆ อาจมีคอนกรีตฉาบปูน หรือทาสี ความคงทนของคอนกรีตขึ้นอยู่กับปฏิสัมพันธ์ระหว่างวัสดุในโครงสร้าง และสภาวะแวดล้อม อย่างไรก็ตาม ยังไม่มีงานศึกษาวิจัยเกี่ยวกับผลของการฉาบปูน และสีต่อความคงทนของโครงสร้างคอนกรีตเพียงพอ มีศึกษาซึ่งพบว่าวัสดุเคลือบผิวบางชนิดสามารถต้านทานการเกิดคาร์บอนเนชั่นได้ (Miguel, 2000) ไม่เพียงพอจะเลือกใช้วัสดุที่จะช่วยเพิ่มความคงทนได้อย่างมีประสิทธิภาพทำให้ไม่สามารถประเมินอายุการใช้งาน และวางแผนบำรุงรักษาที่เหมาะสมโครงสร้างคอนกรีตที่ฉาบปูนและทาสีการทดสอบเพื่อประเมินผลของมอร์ตาร์ปูนฉาบ และสีต่ออัตราการเสื่อมสภาพของคอนกรีต และการออกแบบโดยคำนึงถึงความคงทน จึงเป็นวัตถุประสงค์การศึกษานี้

2. วิธีศึกษา

2.1 วัสดุที่ใช้

ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ใช้วัสดุประสานประกอบด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก โดยมวลรวมใช้หิน ทรายแม่น้ำ น้ำประปามอร์ตาร์ปูนฉาบ สีอะคริลิก และวัสดุเคลือบผิว

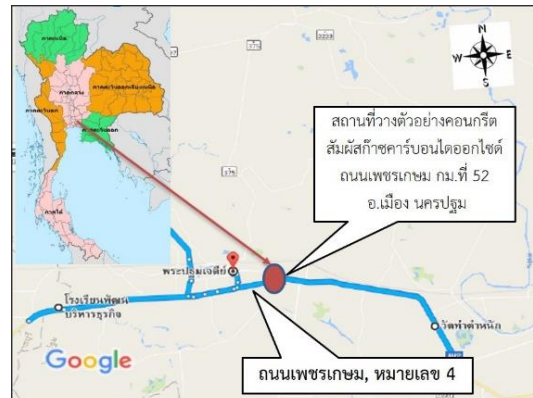
2.2 วิธีการศึกษา

การศึกษาในครั้งนี้ประกอบด้วยทดสอบหาความลึกคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีต โดยเตรียมตัวอย่างคอนกรีต ขนาด $100 \times 100 \times 100$ มิลลิเมตร ตาม ASTM C856 ฉาบและทาสีผิวของตัวอย่างทดสอบหนึ่งด้านเพื่อใช้ในการทดสอบหาความลึกคาร์บอนเนชั่น ส่วนอีกห้าด้านจะทาสีเคลือบผิวเพื่อป้องกันการแพร่ขององค์ประกอบทางเคมีไม่ให้คอนกรีตเสื่อมสภาพ ตารางที่ 1 แสดงอายุของตัวอย่างทดสอบ ณ เวลาที่ฉาบปูน ทาสี และเคลือบผิวตัวอย่างทดสอบก่อนทดสอบ โดยทุกขั้นตอนจะทำภายในระยะเวลา 28 วัน ก่อนที่จะนำตัวอย่างทดสอบไปไว้ในสภาวะแวดล้อมกิโลเมตรที่ 52 ถนนมาลัยแมน จังหวัดนครปฐม (รูปที่ 1) โดยมีความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 590 - 600 ppm ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 55 - 60 อุณหภูมิ 30 - 35 องศาเซลเซียส เมื่อก่อนคอนกรีตอยู่ในสภาวะแวดล้อมครบตาม 120 210 และ 300 วัน จึงหาความลึกของการเกิดคาร์บอนเนชั่น แบ่งตัวอย่างออกเป็นสองซีก โดยใช้เครื่องทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต ฉีดสารละลายฟีนอล์ฟทาลีน (Phenolphthalein - สมบัติของฟีนอล์ฟทาลีนจะมีสีชมพูไปจนถึงม่วงเข้ม เมื่ออยู่ในสภาวะเบส และจะจางลง หรือปราศจากสี เมื่ออยู่ในสภาวะกรด โดยเปลี่ยนสี ณ pH ประมาณ 8.5 ถึง 13) ที่ตัวอย่างซึ่งจะปรากฏสีม่วงในบริเวณที่ไม่เกิดคาร์บอนเนชั่น แต่ส่วนที่เกิดคาร์บอนเนชั่นตัวอย่างคอนกรีตจะไม่มีสี (Fattuhi, 1986) แสดงในรูปที่ 2 ใช้เวอร์เนียร์วัดค่าความลึกบริเวณที่เกิดคาร์บอนเนชั่นคอนกรีตแต่ละซีก (รูปที่ 3) แล้วหาค่าเฉลี่ย

ความลึกการเกิดคาร์บอนเนชั่น และระยะเวลาที่คอนกรีตเผชิญกับสิ่งแวดล้อมคาร์บอนเนชั่น สามารถคำนวณสัมประสิทธิ์คาร์บอนเนชั่น จากสมการที่ 1 (Roy, 1998)

$$d = k\sqrt{t} \quad (1)$$

โดยที่ d คือ ค่าความลึกการเกิดคาร์บอนเนชั่น (มิลลิเมตร), t คือ เวลาอายุของคอนกรีตที่เผชิญสิ่งแวดล้อมคาร์บอนเนชั่น (วัน) และ k คือ สัมประสิทธิ์คาร์บอนเนชั่น (มิลลิเมตร/วัน^{1/2})



รูปที่ 1 ตำแหน่งสถานที่วางตัวอย่างคอนกรีตสัมผัสมลพิษสิ่งแวดล้อม



รูปที่ 2 ฉีดสารละลายฟีนอล์ฟทาลีนที่คอนกรีต ปรากฏสีม่วงในบริเวณที่ไม่เกิดคาร์บอนเนชั่น



รูปที่ 3 การวัดความลึกคาร์บอนเนชั่นของตัวอย่างคอนกรีต

รูปที่ 4 แสดงการเคลือบผิวตัวอย่างด้านที่ไม่ต้องการให้เกิดการเสื่อมสภาพเนื่องจากคาร์บอนเนชั่นภายหลังขั้นตอนฉาบและทาสี (ตารางที่ 1) โดยในการทดสอบนี้จะทำการศึกษาความคงทนของตัวอย่างทดสอบดังนี้ คือ คอนกรีตเปลือย - คอนกรีตทาสี - คอนกรีตฉาบปูนและ

ทาสี และมอร์ตาร์ปูนฉาบ โดยตารางที่ 1 แสดงอายุของตัวอย่างทดสอบ ณ เวลาที่ทำการฉาบปูน ทาสี และเคลือบผิวตัวอย่างทดสอบก่อนทดสอบ

ตารางที่ 1 อายุของตัวอย่างทดสอบ ณ เวลาฉาบปูน ทาสี และเคลือบผิวตัวอย่างทดสอบก่อนทดสอบ

ขั้นตอน	ระยะเวลาเมื่อคอนกรีตมีอายุนับจากวันหล่อ (วัน)
ถอดแบบ	1
บ่มในน้ำ	2 ⁽¹⁾
ฉาบปูน	7
ทาสี	21
เคลือบผิวด้านที่ไม่มีมอร์ตาร์ปูนฉาบและสี	23 ถึง 24
นำตัวอย่างทดสอบไปไว้ในสภาวะแวดล้อม	28

(1) ตั้งแต่ถอดแบบและในบ่อบ่ม



ก) คอนกรีตเปลือย



ข) คอนกรีตฉาบปูน



ค) คอนกรีตฉาบปูน - ทาสี

รูปที่ 4 ตัวอย่างคอนกรีตสำหรับทดสอบการเกิดคาร์บอนเนชั่น

2.3 ส่วนผสมของคอนกรีต

ส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ในการหาความลึกคาร์บอนเนชั่นแสดงในตารางที่ 2 โดยคอนกรีตใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) 0.45 0.55 และ 0.65 โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 2 ส่วนผสมของคอนกรีตต่อ 1 ลูกบาศก์เมตร โดยน้ำหนักของคอนกรีต เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) 0.45 0.55 และ 0.65 โดยน้ำหนัก

ที่	สัญลักษณ์	W/C	ส่วนผสมของคอนกรีต			
			ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	ทราย	หิน	น้ำ
1	CC-0.45	0.45	489	845	1230	220
2	CC-0.55	0.55	428	845	1230	235
3	CC-0.65	0.65	384	845	1230	250

2.4 ส่วนผสมของมอร์ตาร์ปูนฉาบ

มอร์ตาร์ปูนฉาบที่ใช้ในการทดสอบ คือ ปูน ก่อ ฉาบ เท ที่นิยมใช้ก่อสร้างทั่วไปในงานฉาบ และงานก่ออิฐอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก ในการทดสอบจะควบคุมให้สัดส่วนระหว่างปูนกับทราย 1:5 โดยน้ำหนัก และให้อัตราส่วนระหว่างน้ำกับมอร์ตาร์ปูนฉาบ 0.9

3. ผลทดสอบ และการวิเคราะห์

3.1 สมบัติพื้นฐานของวัสดุประสาน

ผลทดสอบสมบัติพื้นฐานของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และมอร์ตาร์ปูนฉาบที่ใช้ในการศึกษา ได้ผลการศึกษารองค์ประกอบทางเคมี ความละเอียดโดยวิธีเบลน และความถ่วงจำเพาะแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 องค์ประกอบทางเคมี ของวัสดุประสานที่ใช้

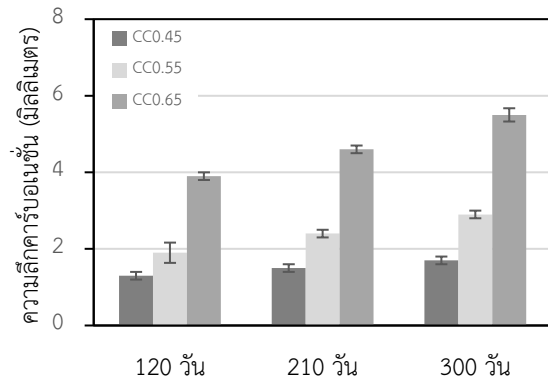
องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละ)	ปูนซีเมนต์ ประเภทที่ 1	มอร์ตาร์ ปูนฉาบ
Si·O ₂	19.50	5.56
Al ₂ ·O ₃	4.97	1.17
Fe ₂ ·O ₃	3.78	3.01
Ca·O	65.38	87.77
Mg·O	1.08	-
S·O ₃	2.16	2.09
Na ₂ ·O	0.22	-
K ₂ ·O	0.47	-
L·O	2.27	-
Free lime	1.00	-
Zn·O	-	0.02
Ti·O ₂	-	0.24
ความละเอียดโดยวิธีเบลน (ตารางเซนติเมตรต่อกรัม)	3,250	4,500
ความถ่วงจำเพาะ	3.12	2.95

3.2 ความลึกคาร์บอนชั้นของคอนกรีต

จากการทดสอบความลึกคาร์บอนชั้นของคอนกรีตในครั้งนี้ ได้พิจารณาถึงผลกระทบต่อความลึกคาร์บอนชั้น 3 ประการ คือ 1) ผลกระทบจากอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 2) ผลกระทบจากสี 3) ผลกระทบจากมอร์ตาร์ปูนฉาบ ดังนี้

3.2.1 ผลกระทบจากอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์

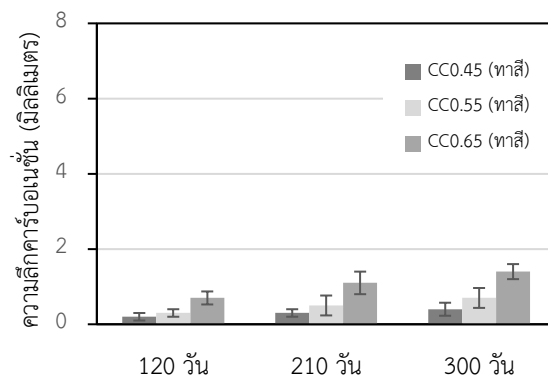
รูปที่ 5 แสดงความลึกคาร์บอนชั้นของคอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ 0.45 0.55 และ 0.65 โดยสัมผัสกับสิ่งแวดล้อมที่อายุ 120 210 และ 300 วัน พบว่าความลึกคาร์บอนชั้นของคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่ 0.65 มากกว่าของคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ 0.55 และ 0.45 ตามลำดับ ทั้งนี้ เนื่องจากคอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์มากมีการใช้น้ำในส่วนผสมมากกว่าทำให้เนื้อคอนกรีตมีโพรงและพรุนมาก ทำให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้าไปทำปฏิกิริยาได้ง่ายขึ้น ซึ่งมีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ (Fattuhi, 1986) และ (Warinlai, 2017)



รูปที่ 5 ความลึกคาร์บอนชั้นของคอนกรีตเปลี่ยน

3.2.2 ผลกระทบจากสี

รูปที่ 6 แสดงความลึกคาร์บอนชั้นของคอนกรีตทาสีที่อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ 0.45 0.55 และ 0.65 โดยสัมผัสกับสิ่งแวดล้อมที่อายุ 120 210 และ 300 วัน พบว่าคอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานทุกอัตราส่วนมีความลึกคาร์บอนชั้นน้อยกว่าคอนกรีตที่ไม่ได้ทาสีทุกสัดส่วนผสม เนื่องจากสีที่ทาบนคอนกรีตมีฟิล์มบางที่ช่วยป้องกันการถูกทำลายโดยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ทำให้ความลึกคาร์บอนชั้นน้อยลง

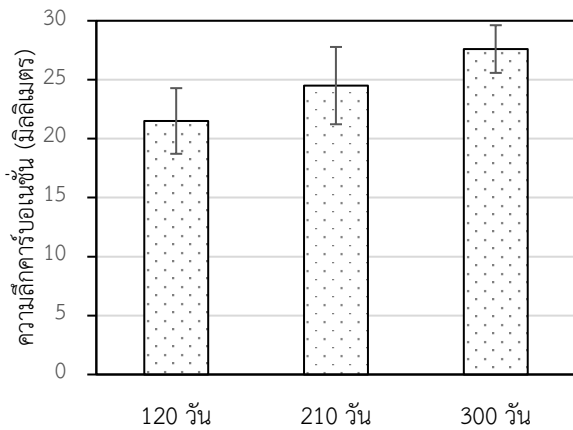


รูปที่ 6 ความลึกคาร์บอนชั้นของคอนกรีตทาสี

3.2.3 ผลกระทบจากมอร์ตาร์ปูนฉาบ

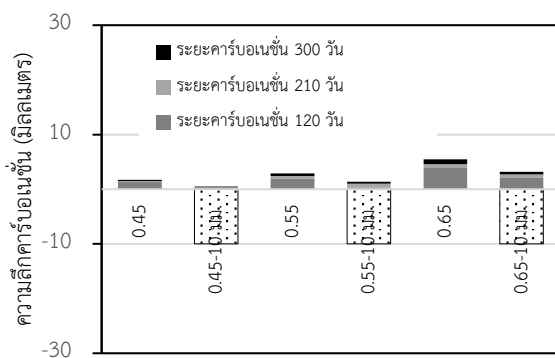
รูปที่ 7 แสดงความลึกคาร์บอนชั้นของมอร์ตาร์ปูนฉาบโดยสัมผัสกับสิ่งแวดล้อมที่อายุ 120 210 และ 300 วัน พบว่าความลึกของมอร์ตาร์ปูนฉาบมีค่ามากกว่าของคอนกรีตเปลือย และคอนกรีตที่ทาสีในรูปที่ 4 และ 5 ตามลำดับ ทั้งนี้ อาจเกิดจากมอร์ตาร์ปูนฉาบมีความพรุนมากกว่าคอนกรีต รวมถึงมอร์ตาร์ปูนฉาบมีผงฝุ่นหินปูนเป็นส่วนผสม ทำให้ความเป็นด่างลดลงเมื่อเทียบกับกรณีของปูนซีเมนต์มาตรฐานทั่วไป จะทำให้สูญเสียความเป็นด่างได้ง่าย นอกจากนี้ มอร์ตาร์ปูนฉาบไม่มี

มวลรวมหยาบซึ่งสามารถช่วยป้องกันให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์แพร่เข้าสู่คอนกรีต (เนื่องจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะต้องเคลื่อนที่แทรกผ่านมวลรวมหยาบเพื่อแพร่เข้าไปในเนื้อคอนกรีต) ทำให้มอร์ตาร์ปูนฉาบเสียหายเนื่องจากคาร์บอนชั้นได้มากกว่า



รูปที่ 7 ความลึกคาร์บอนชั้นของมอร์ตาร์ปูนฉาบ

รูปที่ 8 แสดงการเปรียบเทียบความลึกคาร์บอนชั้นของคอนกรีตเปลือยกับคอนกรีตที่มีมอร์ตาร์ปูนฉาบ 10 มิลลิเมตร โดยสัมผัสกับสิ่งแวดล้อมจริงจังหวัดนครปฐมที่อายุ 120 210 และ 300 วัน แสดงให้เห็นว่าสามารถต้านทานการเกิดคาร์บอนชั้นได้ค่อนข้างน้อย แต่ช่วยให้ความลึกคาร์บอนชั้นของคอนกรีตที่ฉาบปูนน้อยลง เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตส่วนผสมเดียวกันที่ไม่มีมอร์ตาร์ปูนฉาบ

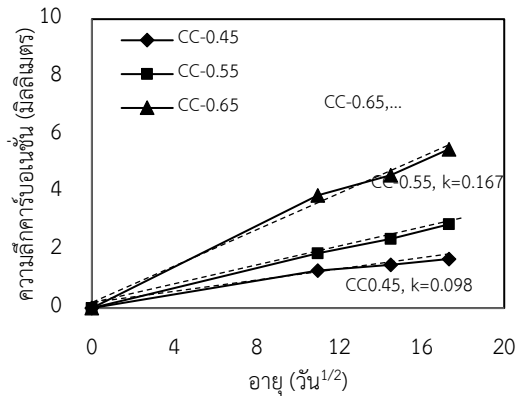


รูปที่ 8 เปรียบเทียบความลึกคาร์บอนชั้นของคอนกรีตเปลือยกับคอนกรีตที่มีมอร์ตาร์ปูนฉาบ

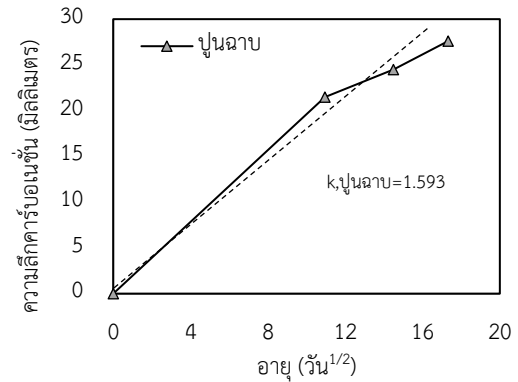
ตารางที่ 4 แสดงค่าสัมประสิทธิ์คาร์บอนชั้น (k) ของคอนกรีตเปลือย - คอนกรีตทาสี - คอนกรีตฉาบปูนและมอร์ตาร์ปูนฉาบรูปที่ 9 ถึง 11 ตามลำดับ ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความลึกคาร์บอนชั้น และอายุ ($\text{วัน}^{1/2}$) จากข้อมูลทั้งหมดปรากฏว่าสัมประสิทธิ์คาร์บอนชั้นของคอนกรีตเปลือยจะมากขึ้น เมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากความพรุนในตัวซีเมนต์เพสต์ และปริมาณปูนซีเมนต์ที่ลดลง นอกจากนั้นจากผลของการทาสีสามารถช่วยลดการเกิดคาร์บอนชั้นของคอนกรีตได้ ดังจะเห็นจากการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์คาร์บอนชั้นของคอนกรีตที่ทาสี (รูปที่ 10) กับสัมประสิทธิ์คาร์บอนชั้นของคอนกรีตที่ไม่ได้ทาสีในรูปที่ 9 การทาสีช่วยลดค่าสัมประสิทธิ์คาร์บอนชั้นได้มากถึงร้อยละ 75 เมื่อเทียบกับคอนกรีตชนิดเดียวกันที่ไม่ได้ทาสีส่วนคอนกรีตที่ฉาบปูนพบว่ามีส่วนช่วยในการต้านทานการเกิดคาร์บอนชั้นได้เช่นกัน โดยเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์คาร์บอนชั้นของคอนกรีตรูปที่ 9 และ 11 ซึ่งการฉาบช่วยลดสัมประสิทธิ์คาร์บอนชั้นได้มากถึงร้อยละ 60 เช่นกัน สำหรับมอร์ตาร์ปูนฉาบแสดงความสัมพันธ์ดังรูปที่ 12 สรุปได้ว่า สัมประสิทธิ์คาร์บอนชั้นมีค่ามากกว่าของคอนกรีตเปลือยคอนกรีตที่ทาสี และคอนกรีตที่ฉาบปูน ด้วยเหตุผลดังที่กล่าวข้างต้นแล้ว

ตารางที่ 4 สัมประสิทธิ์คาร์บอนชั้น (k) ของคอนกรีตเปลือยคอนกรีตทาสีคอนกรีตฉาบปูน และมอร์ตาร์ปูนฉาบ

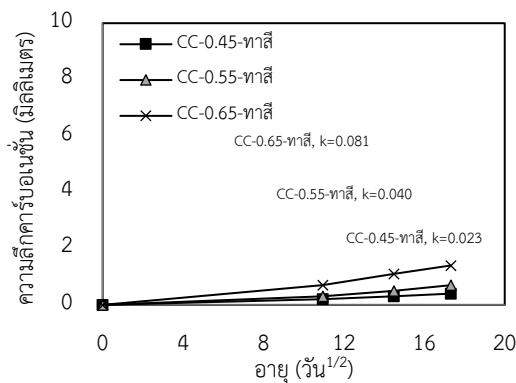
สัดส่วนผสม	ค่าสัมประสิทธิ์คาร์บอนชั้น, k (มิลลิเมตร/วัน ^{1/2})
CC - 0.45	0.098
CC - 0.55	0.167
CC - 0.65	0.318
CC - 0.45 - ทาสี	0.023
CC - 0.55 - ทาสี	0.040
CC - 0.65 - ทาสี	0.081
CC - 0.45 - ฉาบปูน	0.040
CC - 0.55 - ฉาบปูน	0.081
CC - 0.65 - ฉาบปูน	0.185
มอร์ตาร์ปูนฉาบ	1.593



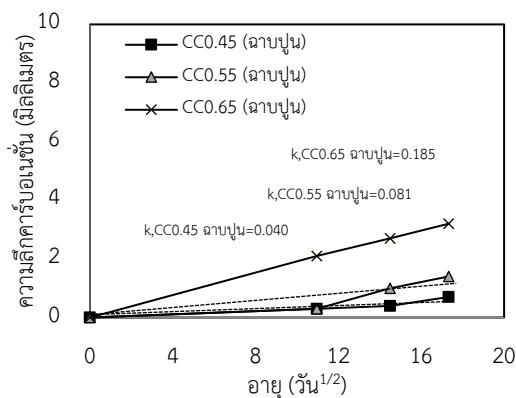
รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกคาร์บอนเนชั่น และอายุ (วัน^{1/2}) ของคอนกรีต



รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกคาร์บอนเนชั่น และอายุ (วัน^{1/2}) ของมอร์ตาร์ปูนฉาบ



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกคาร์บอนเนชั่น และอายุ (วัน^{1/2}) ของคอนกรีตทาสี



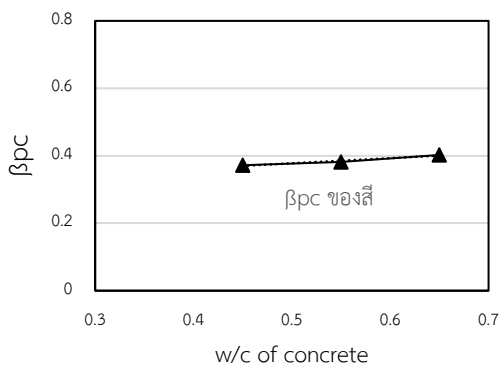
รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกคาร์บอนเนชั่น และอายุ (วัน^{1/2}) ของคอนกรีตที่ฉาบปูน

จากความสัมพันธ์ของคอนกรีตทาสีที่เกิดคาร์บอนเนชั่นในสภาวะแวดล้อมสามารถคำนวณสัมประสิทธิ์ของอัตราเร็วการเกิดคาร์บอนเนชั่นเนื่องมาจากการทาสี (สมการที่ 2) ซึ่งประยุกต์หาปัจจัยของสีที่มีผลต่อการเกิดคาร์บอนเนชั่นในสภาวะแวดล้อมได้ โดยอาศัยความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์คาร์บอนเนชั่นของคอนกรีตเปลี่ยนกับสัมประสิทธิ์คาร์บอนเนชั่นของคอนกรีตที่ทาสี จะได้ความสัมพันธ์ในสมการที่ 2

$$\beta_{pc} = \frac{k_{pc}}{k_c} \quad (2)$$

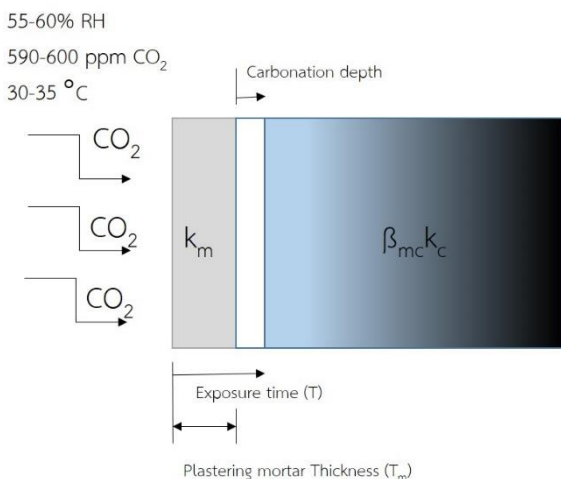
โดยที่ β_{pc} คือ สัมประสิทธิ์ของอัตราเร็วการเกิดคาร์บอนเนชั่นเนื่องมาจากการทาสีในสภาวะแวดล้อม k_{pc} คือสัมประสิทธิ์คาร์บอนเนชั่นของคอนกรีตที่ทาสี และ k_c คือสัมประสิทธิ์คาร์บอนเนชั่นของคอนกรีตเปลี่ยน

รูปที่ 13 แสดงสัมประสิทธิ์ของอัตราเร็วการเกิดคาร์บอนเนชั่นเนื่องมาจากการทาสีในสภาวะแวดล้อม ปรากฏว่าปัจจัยของสีมีผลกระทบต่อคอนกรีตที่เกิดคาร์บอนเนชั่นในสภาวะแวดล้อมเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานของคอนกรีต

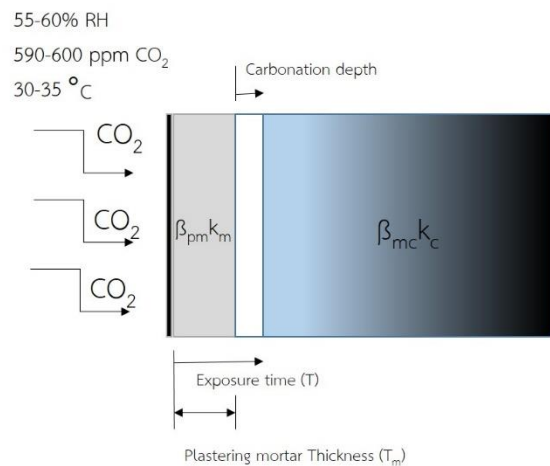


รูปที่ 13 สัมประสิทธิ์ของอัตราเร็วการเกิดคาร์บอนเนชั่นอันเนื่องจากการทาสีในสภาวะแวดล้อม

รูปที่ 14 แสดงแผนภาพการถูกทำลายของคอนกรีตเนื่องจากคาร์บอนเนชั่นจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยรูปที่ 14 ก คอนกรีตที่มีมอร์ตาร์ปูนฉาบ ถูกทำลายโดยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะเริ่มซึมผ่านชั้นของมอร์ตาร์ปูนฉาบอย่างต่อเนื่องจนถึงชั้นของคอนกรีต ส่วนรูปที่ 14 ข เป็นการทำลายของคอนกรีตที่มีสี และมอร์ตาร์ปูนฉาบ ถูกทำลายโดยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะเริ่มซึมผ่านชั้นของสี ผ่านชั้นของมอร์ตาร์ปูนฉาบไปจนถึงชั้นของคอนกรีต ซึ่งกระบวนการถูกทำลายทั้งสองแผนภาพ ล้วนทำให้ความเป็นด่างของคอนกรีตลดลง เป็นผลทำให้คอนกรีตเกิดการเสื่อมสภาพเนื่องจากคาร์บอนเนชั่น



ก) คาร์บอนไดออกไซด์ทำลายคอนกรีตที่มีมอร์ตาร์ปูนฉาบ



ข) คาร์บอนไดออกไซด์ทำลายคอนกรีตที่มีมอร์ตาร์ปูนฉาบ และทาสี

รูปที่ 14 ชั้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ทำลายคอนกรีต

รูปที่ 14ก สามารถประยุกต์สร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์ของการเกิดคาร์บอนเนชั่นในคอนกรีตที่มีมอร์ตาร์ปูนฉาบ โดย k_m คือ สัมประสิทธิ์คาร์บอนเนชั่นของมอร์ตาร์ปูนฉาบ β_{mc} คือ สัมประสิทธิ์ของอัตราเร็วการเกิดคาร์บอนเนชั่นอันเนื่องจากมอร์ตาร์ปูนฉาบ แบบจำลองดังกล่าวจะสามารถสร้างสมการความสัมพันธ์ระหว่างความลึกคาร์บอนเนชั่น (วัดจากผิวคอนกรีต) ดังสมการที่ 3

จาก $d = k\sqrt{t}$

$$\left(\frac{d}{k}\right)^2 = t$$

$$t = t_m + t_c$$

$$t = \left(\frac{T_m}{k_m}\right)^2 + \left(\frac{D}{k_c}\right)^2$$

$$D = k_c \left(\sqrt{t - \left(\frac{T_m}{k_m}\right)^2} \right)$$

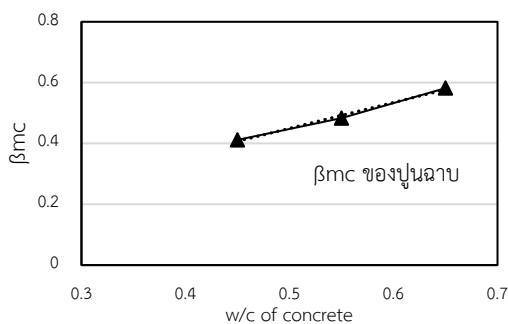
$$\text{หรือ } D = \beta_{mc} k_c \left(\sqrt{t - \left(\frac{T_m}{k_m}\right)^2} \right) \quad (3)$$

$$\beta_{mc} = \frac{k_{mc}}{k_c} \quad (4)$$

โดย T_m คือ ความหนาของมอร์ตาร์ปูนฉาบ, D คือ ความลึกคาร์บอนเนชั่น

สมการที่ 3 สามารถใช้ค่า k_c และ k_m ที่ได้จากการทดสอบการเกิดคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีต และมอร์ตาร์ปูนฉาบ ส่วน β_{mc} หาได้จากสมการที่ 4 โดยหาก β_{mc} มีค่าเท่ากับ 1 แสดงว่ามอร์ตาร์ปูนฉาบไม่ส่งผลต่อการเกิดคาร์บอนเนชั่น แต่หาก β_{mc} น้อยกว่า 1 แสดงว่ามอร์ตาร์ปูนฉาบทำให้อัตราการเกิดคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีตลดลง

รูปที่ 15 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราเร็วการเกิดคาร์บอนเนชั่นอันเนื่องมาจากมอร์ตาร์ปูนฉาบในสภาวะแวดล้อม ซึ่งจะเพิ่มมากขึ้นเมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานมากขึ้น



รูปที่ 15 สัมประสิทธิ์ของอัตราเร็วการเกิดคาร์บอนเนชั่นมอร์ตาร์ปูนฉาบในสภาวะแวดล้อม

ขณะเดียวกัน หากพิจารณาคอนกรีตที่ทาสีและฉาบปูนด้วย สามารถสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์ของการเกิดคาร์บอนเนชั่นโดยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะผ่านชั้นสี มอร์ตาร์ปูนฉาบ ไปยังชั้นคอนกรีต (สมการที่ 5 และ 6) อย่างไรก็ตาม สมการที่ 6 ตัวแปรความหนาของชั้นสี ซึ่งค่อนข้างบางมาก ($30 - 40 \mu m$) แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเกิดคาร์บอนเนชั่นเป็นดังสมการที่ 7 โดย β_{pm} หาได้จากสมการที่ 8 ซึ่งจากผลทดสอบการเกิดคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีต มอร์ตาร์ปูนฉาบ และสี ในสภาวะแวดล้อมจังหวัดนครปฐม จะทราบ β_{pm} เท่ากับ 0.38 ใช้เป็นฐานข้อมูลในการออกแบบความคงทนของคอนกรีตกับการเสื่อมสภาพเนื่องจากคาร์บอนเนชั่นภายใต้สภาวะแวดล้อมจังหวัดนครปฐมต่อไป

จาก $d = k\sqrt{t}$

$$\left(\frac{d}{k}\right)^2 = t$$

$$t = t_p + t_m + t_c \quad (5)$$

$$t = (T_p / k_p)^2 + (T_m / k_m)^2 + (D / k_c)^2$$

$$t = (T_p / k_p)^2 + (T_m / \beta_{pm} k_m)^2 + (D / \beta_{mc} k_c)^2 \quad (6)$$

กำหนดให้ความหนาของชั้นสีบางมาก ($30 - 40 \mu m$)

ค่า $T_p = 0$

$$t = (D / \beta_{mc} k_c)^2 + (T_m / \beta_{pm} k_m)^2 \quad (7)$$

$$(T_m / \beta_{pm} k_m)^2 = t - (D / \beta_{mc} k_c)^2$$

$$(\beta_{pm} k_m)^2 = \frac{T_m^2}{t - (D / \beta_{mc} k_c)^2}$$

หรือ

$$\beta_{pm} = \frac{1}{\frac{k_m}{T_m} \sqrt{[t - (\frac{D}{\beta_{mc} k_c})^2]}} \quad (8)$$

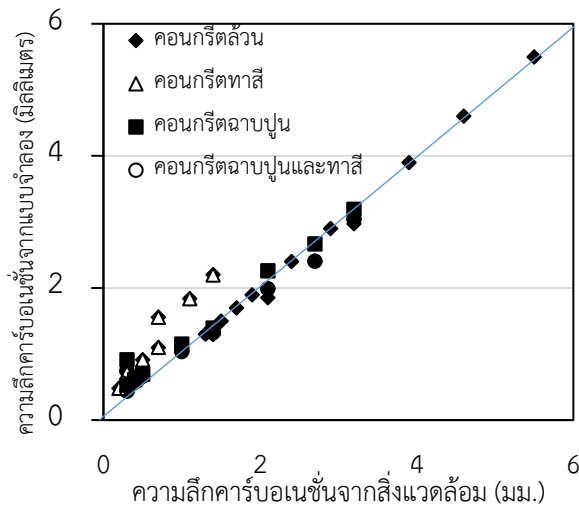
เมื่อ t_c , t_m และ t_p คือ เวลาที่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ซึมผ่านคอนกรีต มอร์ตาร์ปูนฉาบ และสี (วัน), T_p คือ ความหนาของชั้นสี (มิลลิเมตร), k_p คือ ค่าสัมประสิทธิ์คาร์บอนเนชั่นของสี (มิลลิเมตร/วัน^{1/2}) และ β_{pm} คือ สัมประสิทธิ์ของอัตราเร็วการเกิดคาร์บอนเนชั่นอันเนื่องมาจากสีที่ผิวมอร์ตาร์ปูนฉาบ

3.3 การตรวจสอบแบบจำลองคณิตศาสตร์ด้านทานคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีตที่มีสีหรือมอร์ตาร์ปูนฉาบกับผลการทดลองในสภาวะแวดล้อม กรณีศึกษา จังหวัดนครปฐม

บทความนี้ได้เสนอการสร้างสมการทางคณิตศาสตร์พื้นฐานเพื่อทำนายความลึกคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีตที่ฉาบปูน หรือทาสีในทุกช่วงอายุของโครงสร้างคอนกรีตเมื่อทราบชนิดของสีและสัดส่วนผสมของมอร์ตาร์ปูนฉาบ ทำให้ทราบปัจจัยตัวแปรต่าง ๆ ที่เสนอในบทความนี้ คือ β_{pc} , β_{mc} และ β_{pm} นำไปสู่กระบวนการประเมินที่ถูกต้องและใช้งานได้จริง

อย่างไรก็ตาม ตัวแปร β_{pc} , β_{mc} และ β_{pm} ได้จากการทดสอบวัสดุ และเงื่อนไขการทดสอบของสภาวะแวดล้อมกรณีศึกษาจังหวัดนครปฐมเท่านั้น ซึ่งอาจจะมีการทดสอบใน

สภาวะแวดล้อมที่เสี่ยงต่อการบอบเนชันต่อไปในอนาคตได้ แนวคิดที่เสนอในบทความนี้แสดงให้เห็นว่าสมการคณิตศาสตร์ พื้นฐานสามารถใช้ประมาณความลึกคาร์บอนเนชันของคอนกรีต ที่ฉาบปูน และทาสีได้ (รูปที่ 16)



รูปที่ 16 เปรียบเทียบความลึกคาร์บอนเนชันจากแบบจำลอง และคาร์บอนเนชันจากสิ่งแวดล้อมมอร์ตาร์ปูนฉาบ

อย่างไรก็ตาม การทดลองครั้งนี้ได้ศึกษาพื้นที่จังหวัด นครปฐม ซึ่งค่าตัวแปรต่าง ๆ ตลอดจนแบบจำลองคณิตศาสตร์ ที่สร้างขึ้นย่อมเกิดจากสภาวะแวดล้อมจังหวัดนครปฐมเท่านั้น ในอนาคต อาจต้องมีการศึกษาพื้นที่ที่สภาวะแวดล้อมต่างจากนี้ เช่น ชายทะเล ขนบท เพื่อให้ผลการทดลองที่หลากหลาย ตลอดจนค่าตัวแปรต่างๆ และแบบจำลองคณิตศาสตร์จะได้ใช้เป็นฐานข้อมูลการออกแบบการเสื่อมสภาพเนื่องจากคาร์บอนเนชันต่อไปได้

4. สรุปผล

ผลศึกษาวิจัยสรุปได้ดังนี้

1. คอนกรีตที่ทาสีและคอนกรีตที่ฉาบปูนมีค่าความลึกคาร์บอนเนชันน้อยกว่าของคอนกรีตเปลือย
2. คอนกรีตที่ ทาสีและคอนกรีตที่ ฉาบปูนช่วยให้ค่าสัมประสิทธิ์คาร์บอนเนชันลดลงร้อยละ 75 และ ร้อยละ 60 ตามลำดับเมื่อเทียบกับคอนกรีตเปลือย

3. วัสดุต้านทานการเกิดคาร์บอนเนชัน คือ สี และมอร์ตาร์ปูน ฉาบสามารถประยุกต์ด้วยแบบจำลองคณิตศาสตร์ได้ค่า β_{pc} , β_{mc} และ β_{pm}
4. สามารถคำนวณปัจจัยและประสิทธิภาพของวัสดุต้านทาน การเกิดคาร์บอนเนชันในสภาวะแวดล้อมจริง จังหวัด นครปฐมได้ โดยไปใช้ในการออกแบบ วางแผนดูแลรักษา โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ต้องเผชิญกับสภาวะ แวดล้อมคาร์บอนเนชันตลอดจนป้องกันความเสียหายที่ได้

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณวิจัยแห่งชาติ (วช.) ที่สนับสนุนทุนวิจัยในนี้ ตลอดจนสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม และภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

6. เอกสารอ้างอิง

- American Society for Testing and Materials. (2004). Standard Practice for Petrographic Examination of Hardened Concrete. ASTM C 856: Annual Book of ASTM Standards, United States of America.
- Cengiz, D. A. (2003). Accelerated carbonation and testing of concrete made with fly ash. Construction and Building Materials, 17(3), 147–152.
- Department of Highways. (2017, February 22). Traffic Volume. https://www.data.go.th/dataset/item_4be8c846-a4db-4ec4-99dd-59688b9e0dea (in Thai)
- Fattuhi, N. I. (1986). Carbonation of concrete as affected by mix constituents and initial water curing period. Materiaux et Constructions, 19(2), 131-136.

Khunthongkeaw, j., Tangtermsirikul, S., & Leelawat, T. (2006). A study on carbonation depth prediction for fly ash concrete. *Construction and Building Materials*, 20(9), 744-753.

Miguel, A. S. & Cesar, D. O. (2000). Carbonation resistance of one industrial mortar used as a concrete coating. *Building and Environment*, 36(8), 949-953.

RILEM Committee CPC-18. (1988). Measurement of hardened concrete carbonation depth. *Material and Structure*, 21(126), 453-458.

Roy, S.K., Poh, K.B., & Northwood, D.O. (1996). Effect of plastering on the carbonation of a 19-year-old reinforced concrete building. *Construction and Building Materials*, 10(4), 267-272.

Roy, S. K. , Poh, K. B. , & Northwood, D. O. (1999). Durability of concrete accelerated carbonation and weathering studies. *Building and Environment*, 34(5), 597-606

Warinlai, B. , & Krammart, P. (2014). A study of carbonation depth of concrete in real environment of Nakhon Pathom Province. The 10th Annual Concrete Conference, Thailand Concrete Association, (pp. mat 313-319). (in Thai)

Warinlai, B. & Krammart, P. (2017) Basic properties and carbonation of concrete replaced with different binders. *SWU Engineering Journal*, 13(1), 27-38. (in Thai)