

“วิศวกรรมลาดกระบัง”

วิศวกรรมลาดกระบังเป็นวารสารทางวิชาการซึ่งจัดทำโดยคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อ

1. เป็นเอกสารเผยแพร่งานวิจัยและพัฒนาทางด้านวิศวกรรมศาสตร์
2. เป็นสื่อแลกเปลี่ยนความรู้ใหม่ ๆ ทางด้านวิศวกรรมศาสตร์ระหว่างนักวิจัยและผู้สนใจ
3. เป็นเอกสารรวบรวมรายงาน และบทความทางวิชาการที่น่าสนใจและมีคุณค่าทางวิศวกรรมศาสตร์

วาระที่ออก

ปีละ 4 ฉบับ (ทุก 3 เดือนต่อฉบับ)

นโยบาย

บทความที่จะเสนอตีพิมพ์ จะต้องเป็นบทความที่มีคุณค่าทางวิศวกรรม เช่น เป็นรายงานการวิจัยที่ผู้เขียนได้ทำการทดลอง สร้าง หรือมีส่วนทำงานโดยตรง เป็นบทความที่เสนอถึงความคิด หรือหลักการใหม่ที่เป็นไปได้ และมีทฤษฎีประกอบ หรือสนับสนุนอย่างเพียงพอ หรือเป็นบทความทางวิชาการที่น่าสนใจ มีประโยชน์ต่อนักศึกษาและนักวิจัย โดยผู้เขียนเป็นผู้รวบรวมและเรียบเรียงเอง

รูปแบบของบทความ

บทความที่เสนอจะเป็นภาษาไทย หรือภาษาอังกฤษก็ได้ โดยจัดพิมพ์ตามรูปแบบที่กำหนดให้ ซึ่งพร้อมที่จะนำไปถ่ายเพลทเพื่อพิมพ์ได้ทันที (camera ready) และเพื่อให้รูปแบบการพิมพ์ของบทความมีมาตรฐานเดียวกันจึงขอให้ผู้เขียนจัดเตรียมเอกสารโดยใช้เวิร์ดโปรเซสเซอร์ Microsoft Word for Windows สำหรับรูปภาพประกอบ หากมีใช้ภาพถ่ายก็ควรเขียนหรือสเก็ตโดยใช้ซอฟต์แวร์ ที่สนับสนุนการทำงานในระบบ Windows

บทความที่น่าสนใจเพื่อตีพิมพ์ ควรประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ตามลำดับ ดังนี้

- | | |
|---------------------------|---|
| ชื่อเรื่อง | ภาษาไทยและภาษาอังกฤษ |
| ชื่อผู้เขียนและผู้ร่วมงาน | ไม่ต้องระบุคุณวุฒิหรือตำแหน่งทางวิชาการใด ๆ |
| สถานที่ทำงาน | ในกรณีที่ผู้เขียนหรือผู้ร่วมงานเป็นนักศึกษา ให้ใช้คณะและสถาบันที่สังกัดเป็นสถานที่ทำงาน |
| บทคัดย่อ | ภาษาไทยและภาษาอังกฤษ |
| เนื้อความ | ควรประกอบไปด้วยหัวข้อต่าง ๆ และมีเลขประจำหัวข้อตามลำดับ |
| | 1. บทนำ |
| | 2. ทฤษฎี |
| | 3. การทดลองและผลการทดลอง |
| | 4. สรุป |
| | 2.1 หลักการของ..... |
| | 2.2 หลักการใหม่..... |

เจ้าของ

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
กรุงเทพฯ 10520
โทรศัพท์ (662) 329-8000 # 3464, 3465
โทรสาร (662) 329-8317

ที่ปรึกษา

คมบดี
รศ.ดร.คมสัน มาลีสี

หัวหน้ากองบรรณาธิการ

ศ.ดร.อิสระชัย งามหุ

กองบรรณาธิการ

นายโกลล วาดเขียน
ออกแบบปกและรูปเล่ม
นางอาทิสดา ขาววิจิตร
ติดต่อประสานงานและสมาชิกสัมพันธ์
จัดทำต้นฉบับ Artwork
พิสูจน์อักษร

จัดจำหน่ายโดย

คณะวิศวกรรมศาสตร์
นางอาทิสดา ขาววิจิตร
โทร. 02-329-8317

กิตติกรรมประกาศ

(ถ้ามี)

เอกสารอ้างอิง

การอ้างในบทความให้ใช้หมายเลขประจำเอกสารหรือบทความที่อ้างอิง โดยตัวเลขจะอยู่ในวงเล็บใหญ่ โดยรูปแบบการเขียนเอกสารอ้างอิงจะเป็นดังนี้

- [1] P. Choeysuwan and S. Choomchuay, “The Economics Analysis of RFID Implementation in Logistic,” Ladrabang Engineering Journal, Vol.30, No.1, pp.7-12, March, 2556.
- [2] I. M. Filanovsky and H.P. Baltas, “Simple CMOS Analog Square-Rooting and Squaring Circuits,” IEEE Trans. Circuits and Systems, Vol.39, No.4, pp.312-315, Sept., 1992.
- [3] R. E. Blahut, Theory and Practice of Error Control Codes, Addison-Wesley, Reading, MA, 1983.

การส่งบทความ

บทความที่จะส่งตีพิมพ์ทั้งจากบุคคลภายในและภายนอกสถาบันฯ โดยเนื้อหาของบทความมีความยาวไม่เกิน 8 หน้า 2 คอลัมน์ ส่วนหน้าที 9 เป็นต้นไป ต้องเสียค่าตีพิมพ์หน้าละ 500 บาท โดยติดต่อส่งได้ที่ E-mail : kmitleng.jnl@gmail.com ส่วนวิศวกรรมลาดกระบัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง บทความจะได้รับการกลั่นกรองโดยผู้อ่านที่ทรงคุณวุฒิในสาขานั้น ๆ และเมื่อบทความได้รับการแก้ไข (หากมี) อย่างเหมาะสม ผู้เขียนจะต้องส่งต้นฉบับ 1 ชุด และซีดีข้อมูลบทความอีก 1 ชุด



วิศวกรรมลาดกระบัง

Faculty of Engineering King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ผู้ทรงคุณวุฒิในกองบรรณาธิการ “วิศวกรรมลาดกระบัง”

ศาสตราจารย์ ดร.ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ

สายวิชาเทคโนโลยีวัสดุ

คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต เอื้ออาภรณ์

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ศาสตราจารย์ ดร.ไพศาล กิตติศุภกร

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ศาสตราจารย์ ดร.เดวิด บรรเจิดพงศ์ชัย

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ศาสตราจารย์ ดร.ประยุทธ์ อัครเอกพาลิน

บัณฑิตวิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์นานาชาติ

สิรินธร ไทย-เยอรมัน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า-

พระนครเหนือ

ศาสตราจารย์ ดร.อภิศักดิ์ วรพิเชฐ

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

ศาสตราจารย์ ดร.สมชาย วงศ์วิเศษ

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ศาสตราจารย์ ดร.สมชาย ชูชีพสกุล

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ศาสตราจารย์ ดร.สรวิทย์ สุจิตตร

สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน)

ศาสตราจารย์ ดร.โมนัย ไกรฤกษ์

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร-

ลาดกระบัง

ศาสตราจารย์ ดร.วัลลภ สุระกำพลธร

สถาบันวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีขั้นสูง

(THAIST)

สำนักงานคณะกรรมการนโยบายวิทยาศาสตร์

เทคโนโลยีนวัตกรรมแห่งชาติ (สวทน.)

รองศาสตราจารย์ ดร. กอบชัย เดชหาญ

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร-

ลาดกระบัง



วิศวกรรมลาดกระบัง

Faculty of Engineering King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

วันที่ 30 พฤศจิกายน 2558

เรื่อง ขอเปลี่ยนแปลงเพิ่มเติมเนื้อหาของบทความวิศวกรรมลาดกระบังให้มีความยาวจำนวนหน้าเพิ่มมากขึ้น

เรียน อาจารย์ นักศึกษา นักวิจัย และผู้สนใจ

กองบรรณาธิการทางวิศวกรรมลาดกระบัง ขอเรียนแจ้งให้ท่านทราบว่า ขอเปลี่ยนแปลงเพิ่มเติมเนื้อหาของบทความให้มีความยาวจำนวนหน้าเพิ่มมากขึ้นจากเดิม ความยาวไม่เกิน 6 หน้า 2 คอลัมน์ เปลี่ยนเป็น ความยาวไม่เกิน 8 หน้า 2 คอลัมน์ หากจำนวนหน้าของเนื้อหา มากกว่า 8 หน้าขึ้นไป ในส่วนของหน้าที 9 เป็นต้นไป คิดราคาค่าตีพิมพ์เพิ่มหน้าละ 500 บาท (ห้าร้อยบาทถ้วน) โดยผู้แต่งต้องชำระเงินค่าตีพิมพ์ในจำนวนหน้าที่เกิน 8 หน้า หลังจากที่ยื่นบทความแก้ไขสมบูรณ์แล้ว และได้รับหนังสือการตอบรับการตีพิมพ์จากงานวารสารวิศวกรรมลาดกระบัง

จึงเรียนมาเพื่อโปรดทราบ จักขอบพระคุณยิ่ง

ขอแสดงความนับถือ

(ศ.ดร.อิสระชัย จามหฺร)
หัวหน้ากองบรรณาธิการ

งานบริหารการวิจัย (วิศวกรรมลาดกระบัง) คณะวิศวกรรมศาสตร์

โทร. / โทรสาร : 02-329-8317

User Authentication in an Internet Protocol

Parinya Thamthawornsakul Suvepon Sittichivapak
Department of Telecommunication Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

Abstract

This paper presents an enhancement of IP (Internet Protocol) standard to support user authentication within the protocol itself. The options field in an IP header is used for carrying specific data to add the ability of self-authentication. The specific data consist of a user identifier, a timestamp, and an HMAC calculated with important data in the IP header. The major purpose is to verify a device owner or a computer user in a local network in real time, before allowing access to restricted networks or the Internet. By this enhancement, users can be authenticated at IP layer, without needing an additional user authentication process. The self-authentication ability provides a prevention of sending source-spoofed IP packet and also provides a high reliability of identifying the user. In addition, this ability does not require a creation of specific connection and an exchange of security parameters.

Keywords: IP Options, Self-Authentication, HMAC, Source Address Spoofing, Network Access Control

1. Introduction

Nowadays, Internet almost become a basic requirement of daily life. A lot of devices online on the Internet. Regarding computer network security, identifying a device owner or a computer user is an important thing. In order to control accessing the Internet, a NAC (Network Access Controller) is used to meet this demand. On an IP network, the NAC provides a function of source address filtering. IP packets with a source address of an authorized device are allowed to access the Internet. Therefore prior to such authorization, the device owner or the computer user has to pass the authentication process first, which is done by submitting user credentials such as a username and a password.

Although NAC is a useful tool for identifying the user before accessing restricted networks or the Internet, but its common function is susceptible to a technique of sending a source-spoofed IP packet. This technique helps an unauthenticated user easily access restricted networks or the Internet, without passing any user authentication process.

The aforementioned problem encourages an enhancement of IP standard. A self-authentication ability is added to the protocol. It involves a use of undefined IP options, and an application of HMAC (Keyed-Hash Message Authentication Code) and timestamp. The benefits of this enhancement are user authentication can be performed at IP layer without needing an additional user authentication process, sending a source-spoofed IP packet can be prevented, and reliability of identifying the user is increased.

2. Literature Review

2.1. Source Address Spoofing

In term of computer network security, the creation of IP packet with a forged source address for

concealing the sender identity, is called source address spoofing. Due to the IP standard has not designed for providing data origin authentication and data integrity verification, a source-spoofed IP packet travelling on an IP network cannot be detected and protected. It may cause damage to various services on the network. Most importantly, source address spoofing is a problem without an easy solution [1].

Traditional NAC such as Captive Portal [2] still use the source address filtering function to control accessing restricted networks. An access controller monitors and filters only IP standard packet. That means NAC will consider the source-spoofed IP packet as a normal IP packet. Both of IP packets are finally allowed to access the restricted networks.

The source address spoofing issue may be mitigated by using a communication tunnel. In this scenario, tunnel is a transport protocol for carrying the regular protocol. The tunnel is designed for providing data origin authentication and data integrity verification. These interesting functions make more reliable communication at the IP layer.

2.2. Data Origin Authentication and Data Integrity Verification

In term of reliable data communication, transferring information with security awareness is significance. Data origin authentication and data integrity verification must be fully applied on the tunneling protocol.

Data origin authentication is an important property. It makes the receiving party can verify the source of data and ensure that the IP packet originate from an expected sender. Hence, the source-spoofed packet can be detected and protected. Data integrity verification is an important one that makes sure about IP packet has not been modified during transmission.

It is the assurance of accuracy and the consistency of data in the IP packet.

There are several tunneling protocols used in computer network security. Most commonly used tunneling protocol supporting both data origin authentication and data integrity verification is an IPsec (Internet Protocol Security) [3], in a functionality of AH (Authentication Header) [4]. However, the IPsec requires an extended user authentication process before establishing the tunnel, there is a session that need to maintain. This can be viewed as a complex mechanism. To suppress the complexity, data origin authentication and data integrity verification provided on the communication tunnel should be performed without maintaining any session or state.

2.3. Stateless Authentication Mechanism

In network access control system with user session, a period of data communication depends on such user session. If the user session expires, the communication will stop and require re-authentication process to continue. In the other hand, the stateless authentication mechanism does not has a session manipulation. An agent program installed on a device or a computer attaches sufficient user credentials to the IP packet, which is used to authenticate the device owner or computer user on the NAC. The mechanism may be called self-authentication.

To create user credentials for stateless authentication, HMAC [5] is commonly used to do this. HMAC is a mechanism for message authentication. It can be used with any iterative cryptographic hash function, in a combination of message (data) and secret key. The HMAC definition is described in equation 1.

$$HMAC(K, m) = H((K \oplus opad) || H((K \oplus ipad) || m)) \quad (1)$$

In the equation, H is a cryptographic hash function, K is a secret key, m is the message to be authenticated, $||$ represents concatenation, $\oplus$ is an exclusive or (XOR) digital logic gate, $opad$ is an outer padding, and $ipad$ is an inner padding. The order of HMAC calculation is illustrated in figure 1.

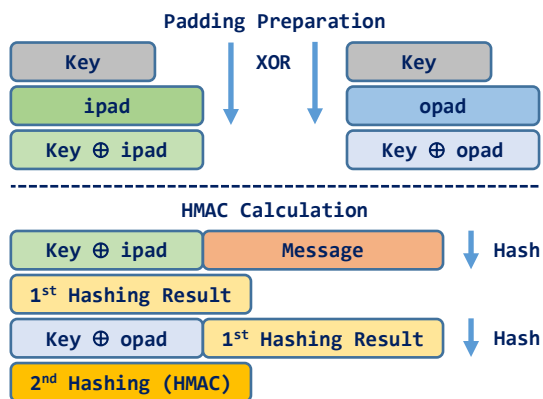


Figure 1 HMAC calculation

The iterative hash function breaks up a message into blocks of a fixed size and iterates over them with a one-way compression function. The strength of the HMAC depends on the strength of underlying cryptographic hash functions such as a SHA-1 (Secure Hash Algorithm) [6], the size of its output, and the quality of the secret key.

Using the HMAC for stateless authentication mechanism may not secure enough. The mechanism is susceptible to a replay attack [7]. By this attack, an attacker is able to duplicate the IP packet with user credentials of an authenticated user, transmit the IP packet to the same network. To reduce the possibility of the replay attack, timestamp is required.

The sender and the receiver use HMAC with timestamp to guarantee that the data is not corrupted or the data has not been modified during transmission. The timestamp is often used with some threshold to ensure that particular IP packet cannot be used more than once. An example case has been described in [8]. About replay attack mitigation, if the threshold of timestamp (acceptable time lag) is small, the replay attack is almost impossible.

2.4. Internet Protocol Options

IP options is one of fields in the IP header [9] which may be required for some data communication environments. The IP options field is variable in length. There are two option formats defined in the IP standard; a single octet of option-type, and multiple octets of option-type. The single octet of option-type indicates the end of the IP options list or it may be used between IP options, to align the beginning of a subsequent option on a 32-bit boundary. The multiple octets of option-type can be divided into three parts as shown in figure 2.

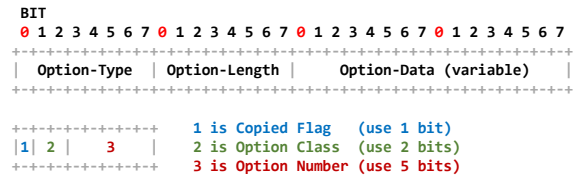


Figure 2 Multiple octets of option-type format

Regarding the figure 2, the option-type octet is viewed as having three parts; 1 bit for copied flag, 2 bits for option class, and 5 bits for option number. The copied flag indicates that this option is copied into all fragment IP packets on fragmentation, the option is not copied when using a value 0, and the option is copied when using a value 1. The option class indicates the general category into which the option belongs, there are only four option classes; class 0 for control, class 2 for debugging and measurement, class 1 and class 3 are reserved for future use. The option number specifies the kind of option, there are both defined option numbers in the IP standard and undefined numbers. The option-

length octet indicates how many octets are used in each option. It counts the option-type octet, the option-length octet as well as the option-data octets. The last option-data octets contain the actual data of its option.

3. Implementation of User Authentication in an Internet Protocol

3.1. IP Options Design for Self-Authentication

In the design about the new IP options for self-authentication ability, reserved option classes and undefined option numbers are used. Three new IP options are attached to the IP header. The first option is a user identifier, it is used as an index for finding the corresponding secret key. The next option is a timestamp, it is used in replay attack mitigation. The last option is an HMAC, it is used for data integrity verification of the IP packet itself. The new IP options can be illustrated in figure 3.

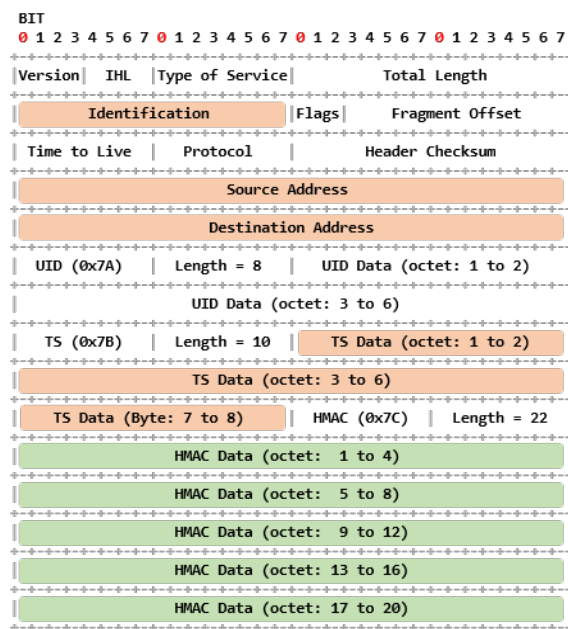


Figure 3 IP header with self-authentication options

In IP options format, the user identifier option (UID) is defined as a hexadecimal number 0x7A in option-type octet, that is 01111010 in binary number, so that this option is not copied to all fragments on fragmentation (0 value of the first bit), a reserved option class 3 (11) is used for this option, and a number 26 (11010) is assigned for this option number. The total length in octet of this option is 8, including 1 octet of option-type, 1 octet of option-length, and 6 octets of the user identifier data. NAC will use this option to find the corresponding secret key for generating the HMAC.

The timestamp option (TS) is defined as a hexadecimal number 0x7B in option-type octet, that is 01111011 in binary number, so that this option is not copied to all fragments on fragmentation, it is in

the reserved option class 3, and a number 27 (11011) is assigned for this option number. The total length of this option is 10, including 1 octet of option-type, 1 octet of option-length, and 8 octets of the timestamp data which is a hexadecimal number converted from an integer number of the UNIX timestamp. The timestamp is used to compare with the timestamp of the NAC for replay attack mitigation purpose.

The last HMAC option is defined as a hexadecimal number 0x7C in option-type octet. It has the same properties as the previous two options, and a number 28 (11100) is assigned for this option number. The total length of this option is 22, including 1 octet of option-type, 1 octet of option-length, and 20 octets of HMAC data calculated with the SHA-1 hash function (160 bits of output).

In HMAC calculation, the Identification data, the Source Address data, the Destination Address data in the IP header, the timestamp data in the timestamp option, and the secret key corresponding to the user identifier option, are concatenated and used as an input message of the hash function. The procedure of HMAC calculation can be written in the following pseudo code.

```
def gen_icv(packet_in, ts_in, key_in):
    icv = hmac.new(key_in, "", hashlib.sha1)
    icv.update(str(packet_in[IP].id))
    icv.update(str(packet_in[IP].src))
    icv.update(str(packet_in[IP].dst))
    icv.update(hex(ts_in)[2:])
    return icv.digest()
```

The input message that is used for calculating the HMAC contains both of persistent data and dynamic data. The **packet_in[IP].id** represents data in the Identification field, the **packet_in[IP].src** represents data in the Source Address field, the **packet_in[IP].dst** represents data in the Destination Address field, the **ts_in** represents the timestamp data in form of hexadecimal number, and the **key_in** represents the HMAC secret key.

In addition, the self-authentication options might be adapted to use with IPv6 (Internet Protocol version 6). The options format look like the format used on IP (version 4). But there are some differences about the option-type octet and the IPv6 header that is used for carrying the self-authentication options. For option-type octet, the format is changed but it still can be defined within 1 octet of option-type, by following the IPv6 standard [10] in part of Type-Length-Value (TLV) encoding. About IPv6 header, there is no IP options field in the header. Hence, self-authentication options will be carried by one of IPv6 extension headers called Hop-by-Hop options header. It carries optional information that must be examined by every node along a delivery path of IPv6 packet. The options header is identified by a Next Header value of 0 in the IPv6 header. The design of self-authentication options for IPv6 can be illustrated in figure 4.

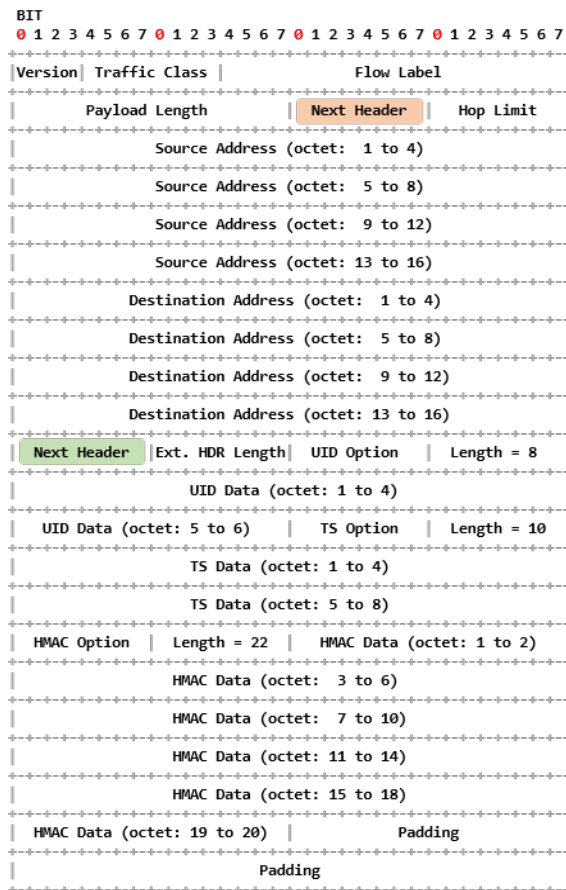


Figure 4 IPv6 header with self-authentication options

3.2. Data Flow and Operations

The Linux operating system is used in this enhancement. In order to control the flow of IP packet and manipulate the IP header, using a netfilter framework and a Scapy [11] program is the right solution. The netfilter framework is used to provide IP traffic control on the host. The **POSTROUTING** chain **mangle** table of the framework is mainly used to do mangling on IP packets. In the operation, the IP packets are redirected from kernel space to user space at this point (chain and table), by using the **NFQUEUE** (the Netfilter Queue). Scapy is a powerful interactive IP packet manipulation program written in Python. It works on the user space, and it can inject the IP packet back to the kernel space.

The self-authentication ability focuses on an outgoing IP traffic, an original IP packet is transmitted from client device in a local network through the NAC before reaching the destination. At the client device, the IP packet is redirected to the user space, then the IP header is modified by the IP header manipulation program, the modified IP packet is injected back to the kernel space, and is sent out to the network. The IP packet flow on the client device is shown in figure 5.

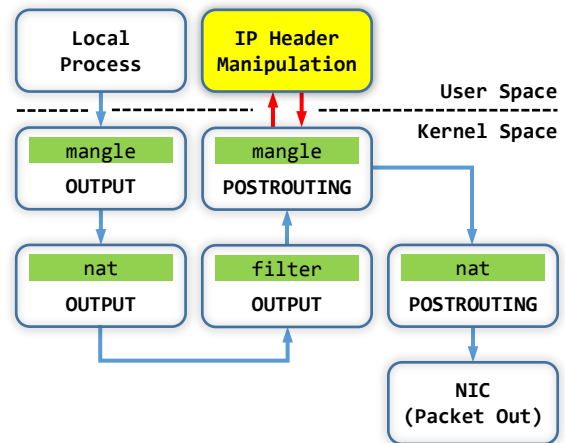


Figure 5 IP packet flow on the client device

At the NAC, the IP packet is received on an incoming network interface, then will be bridged to an outgoing network interface. The IP packet is redirected to the IP header manipulation program on user space for verifying the self-authentication options in the IP header. For any valid IP packet, the self-authentication options are deleted from the IP header, and the modified IP packet is injected back to the kernel space and is sent out to the network. The IP packet flow on the NAC is shown in figure 6.

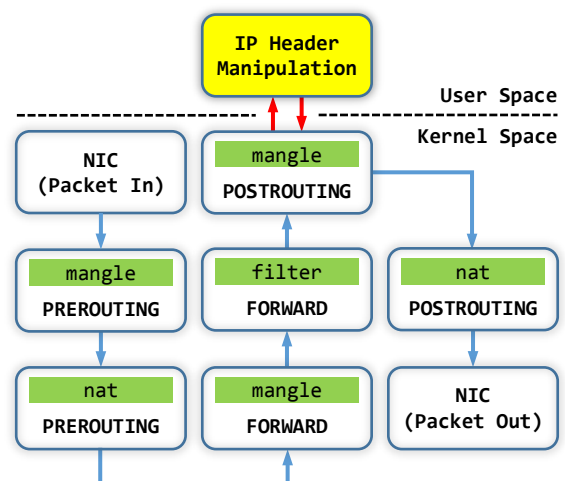


Figure 6 IP packet flow on the NAC

For the operation of IP header manipulation on client device, the particular program running on user space deletes all IP options (if any) in the incoming IP packet, then adds the UID option, the TS option, and the HMAC option respectively. After adding self-authentication options, the IHL value in the IP header is increased to 15 (1111 in binary), the Header Checksum value is recalculated as well. Finally, the modified IP packet is sent back to the kernel space.

An action on IP packet on the NAC consists of self-authentication verification and IP header manipulation. All actions are described in figure 7.

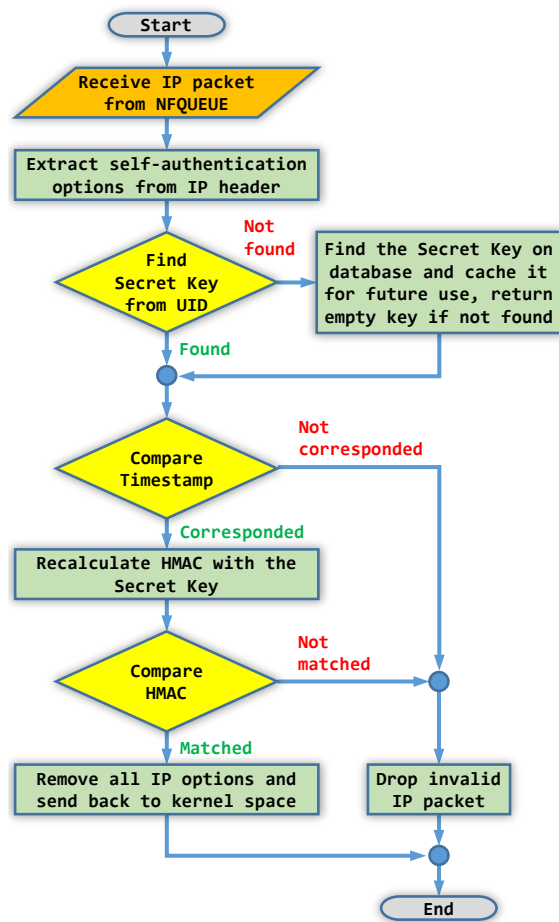


Figure 7 Self-authentication verification

In part of self-authentication verification on the NAC, self-authentication options are extracted from the incoming IP header. The particular program will find the secret key corresponding the UID option in the cache. The timestamp is firstly checked. The HMAC is recalculated with obtained secret key and is compared with the HMAC option. IP packets that do not pass timestamp checking and HMAC comparison are dropped.

4. Experimentation and Results

There are four computers, two network switches, and one Internet router in the experimental environment. The computers work as a client device, a NAC, and analyzers. The test IP packet is sent from the client device to the Internet. IP packet passing the network switches is copied and sent to the analyzers. IP packets captured on the analyzers are used as an experimental result. Figure 8 shows the experimental topology.

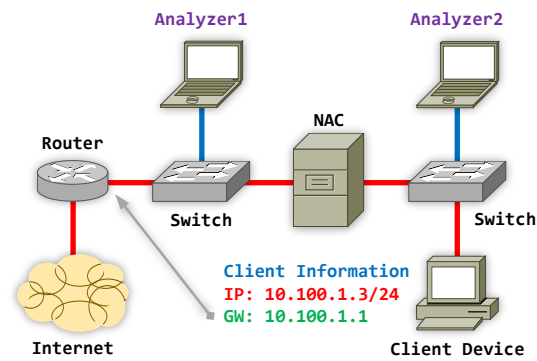


Figure 8 Experimental topology

In the figure, the client device has one NIC (Network Interface Card) named **ens160**, the NAC has two NICs named **ens160** (router side) and **ens192** (client side). The NAC operates in bridge mode, the two physical NICs are member of the bridge. In order to redirect IP packet to the IP header manipulation program, the following **iptables** commands are executed on both NAC and client device.

```

## IPTables command for Client Device.
# iptables -t mangle -I POSTROUTING \
> -o ens160 -j NFQUEUE --queue-num 0

## IPTables command for NAC.
# iptables -t mangle -I POSTROUTING \
> -m physdev --physdev-out ens160 \
> -j NFQUEUE --queue-num 0
  
```

After sending the test ICMP packet from the client device (10.100.1.3) to the destination (8.8.8.8), Captured IP packet on the analyzer1 and the analyzer2 is decoded as displayed in figure 9 and 10.

No.	Source	Destination	Protocol
1	10.100.1.3	8.8.8.8	ICMP
2	8.8.8.8	10.100.1.3	ICMP

Identification: 0x28de (10462)	
> Flags: 0x02 (Don't Fragment)	
Fragment offset: 0	
Time to live: 64	
Protocol: ICMP (1)	
> Header checksum: 0x4113 [validation disabled]	
Source: 10.100.1.3	
Destination: 8.8.8.8	
[Source GeoIP: Unknown]	
[Destination GeoIP: Unknown]	
Options: (40 bytes)	

0000	00 0c 29 c2 03 cf 00 0c	29 3c b3 0d 08 00 4f 00
0010	00 7c 28 de 40 00 40 01	41 13 0a 64 01 03 08 08
0020	08 08 7a 08 30 30 30 30	30 31 7b 0a 35 38 62 32
0030	38 62 39 64 7c 16 88 9e	9a 49 2e 03 c6 4f 3d d7
0040	48 d5 f8 27 d3 9d 46 e7	ef 98 08 00 a3 a1 08 11
0050	00 01 9d 8b b2 58 00 00	00 00 34 95 09 00 00 00

Figure 9 IP packet decoded on the analyzer1

No.	Source	Destination	Protocol
→ 1	10.100.1.3	8.8.8.8	ICMP
← 2	8.8.8.8	10.100.1.3	ICMP

Identification: 0x28de (10462)			
Flags: 0x02 (Don't Fragment)			
Fragment offset: 0			
Time to live: 64			
Protocol: ICMP (1)			
Header checksum: 0xf654 [validation disabled]			
Source: 10.100.1.3			
Destination: 8.8.8.8			
[Source GeoIP: Unknown]			
[Destination GeoIP: Unknown]			
Internet Control Message Protocol			

0010	00 54 28 de 40 00 40 01 f6 54 0a 64 01 03 08 08
0020	08 08 08 00 a3 a1 08 11 00 01 9d 8b b2 58 00 00
0030	00 00 34 95 09 00 00 00 00 00 10 11 12 13 14 15
0040	16 17 18 19 1a 1b 1c 1d 1e 1f 20 21 22 23 24 25
0050	26 27 28 29 2a 2b 2c 2d 2e 2f 30 31 32 33 34 35
0060	36 37

Figure 10 IP packet decoded on the analyzer2

In figure 9, the self-authentication options are attached to the test IP packet (ICMP) sent from the client device. The identification number of the IP header is 10462. The self-authentication options including UID option (0x7A), TS option (0x7B), and HMAC option (0x7C), as described in the section of implementation, are inserted into the IP options field. After passing the self-authentication verification, the self-authentication options are removed and sent on a wire as shown in figure 10. In another view on the NAC, the IP header manipulation program running in verbose mode also displays the same information of the test IP packet, which is shown in figure 11.

```

*****
- IP packet from: 10.100.1.3 to: 8.8.8.8
- Identification: 10462 (0x28de)
- UID Value: 000001
- TS Value: 1488096157
- HMAC Value: 889e9a492e03c64f3dd748d5f827d39d46e7ef98
*****

```

Figure 11 Test IP packet displayed on the NAC

In another one experimentation, the NAC is placed between routers. The test IP packet is sent from client device and is routed to an Internet router by an internal router. Network configuration and **iptables** commands used on both client device and NAC same as previous experimental topology. IP packet passing the network switches and the NAC, is copied and sent to the analyzers. IP packets captured on the analyzers are used as an experimental result. The experimental topology 2 is shown in figure 12.

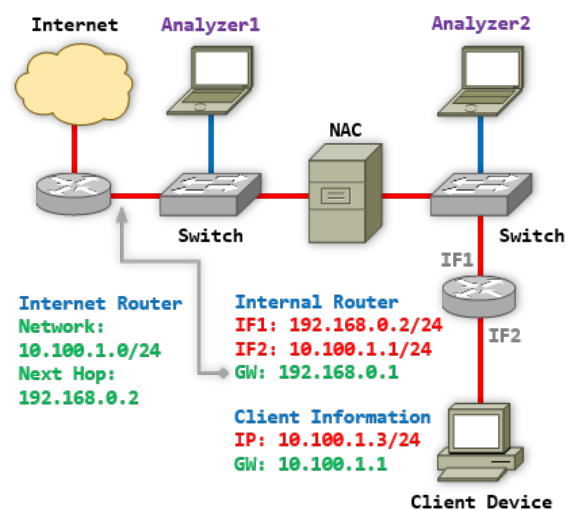


Figure 12 Experimental topology 2

About results of sending the test IP packet from client device, self-authentication options inserted in the IP header are decoded and displayed on the analyzer2, as shown in figure 13. After passing the verification process on NAC, the self-authentication options are removed. The same IP packet without any IP options is decoded and displayed on the analyzer1, as shown in figure 14. All operations and results like the previous experimentation. But there is one thing different, the TTL (Time-to-Live) of the test IP packet is decreased, from value of 64 to 63, because of the routing process.

No.	Source	Destination	Protocol
→ 1	10.100.1.3	8.8.4.4	ICMP
← 2	8.8.4.4	10.100.1.3	ICMP

Identification: 0x2d96 (11670)			
Flags: 0x02 (Don't Fragment)			
Fragment offset: 0			
Time to live: 63			
Protocol: ICMP (1)			
Header checksum: 0x33b0 [validation disabled]			
[Header checksum status: Unverified]			
Source: 10.100.1.3			
Destination: 8.8.4.4			
[Source GeoIP: Unknown]			
[Destination GeoIP: Unknown]			
Options: (40 bytes)			
Unknown (0x7a) (8 bytes)			
Unknown (0x7b) (10 bytes)			
Unknown (0x7c) (22 bytes)			
Internet Control Message Protocol			

0000	00 0c 29 c2 03 cf 00 0c 29 db 3e fe 08 00 4f 00
0010	00 7c 2d 96 40 00 3f 01 33 b0 0a 64 01 03 08 08
0020	04 04 7a 08 30 30 30 30 30 31 7b 0a 35 39 34 65
0030	39 32 34 39 7c 16 da 4f 90 38 25 18 3a a3 83 df
0040	ee 4a 8f 80 ad d7 43 0c 23 31 08 00 1a de 74 96
0050	00 01 49 92 4e 59 00 00 00 00 06 cc 0b 00 00 00
0060	00 00 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 1a 1b 1c 1d
0070	1e 1f 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 2a 2b 2c 2d
0080	2e 2f 30 31 32 33 34 35 36 37

Figure 13 IP header with self-authentication options

No.	Source	Destination	Protocol
→ 1	10.100.1.3	8.8.4.4	ICMP
← 2	8.8.4.4	10.100.1.3	ICMP


```

0100 .... = Version: 4
.... 0101 = Header Length: 20 bytes (5)
> Differentiated Services Field: 0x00 (DSCP: CS0, ECN: 0)
Total Length: 84
Identification: 0x2d96 (11670)
> Flags: 0x02 (Don't Fragment)
Fragment offset: 0
Time to live: 63
Protocol: ICMP (1)
Header checksum: 0xf6a0 [validation disabled]
[Header checksum status: Unverified]
Source: 10.100.1.3
Destination: 8.8.4.4
[Source GeoIP: Unknown]
[Destination GeoIP: Unknown]
> Internet Control Message Protocol

```

Figure 14 IP header after passing the NAC

In case of reliability test, the IP header manipulation program running on client device has been modified, to simulate sending of some IP packets through the NAC. The conditions and results of the simulation are list in table 1.

Item	Conditions	Accept	Drop
1	Sending packet with self-authentication options corresponding the design	•	
2	Timestamp option on client device is increased/decreased before calculating the HMAC		•
3	Using different secret key between NAC and client device for IP packet with same UID in self-authentication options		•
4	Input parameters for calculating the HMAC do not meet the specifications		•
5	Sending packet without attaching the self-authentication options in IP header		•

Table 1 Self-authentication verification test results

In addition, when considering about the mentioned network access control which are Captive Portal, IPsec AH, and self-authentication options, the key features of each methods can be compared as shown in table 2.

Method \ Features	IP options	IPsec AH	Captive Portal
Control accessing networks	Yes	Yes	Yes
Anti-spoofing	Yes	Yes	No
Per-packet self-authentication	Host-to-Any	Host-to-Host	No
Not require for authentication before data communication	Yes	No	No
Not require for session maintenance	Yes	No	No

Table 2 A comparison of access control applications

5. Conclusion

User authentication in an Internet Protocol provides a new mechanism for verifying an identity of device owner or computer user. It is especially suitable to use with network access control application. The key feature is a design of self-authentication options. Data communication at IP layer can be controlled by the NAC which can be placed everywhere on the communication path. It is similar to IPsec AH but it also works on LAN. Without needing additional user authentication process and there is no session to be maintained, it makes data communication more smooth and seamless. For security awareness, it also provides a mitigation of replay attack and a prevention of sending source-spoofed IP packet, which make identifying the user more reliability. The enhancement makes user authentication mechanism look different.

6. References

- [1] C. Manusankar, S. Karthik, and T. Rajendran, "Intrusion Detection System with Packet Filtering for IP Spoofing," International Conference on Communication and Computational Intelligence, India, pp. 563-567, December, 2010.
- [2] G. Appenzeller, M. Roussopoulos, and M. Baker, "User-Friendly Access Control for Public Network Ports," INFOCOM IEEE, vol. 2, pp. 699-707, March, 1999.
- [3] S. Kent and K. Seo, "Security Architecture for the Internet Protocol," RFC 4301, December, 2005.
- [4] S. Kent, "IP Authentication Header," RFC 4302, December, 2005.
- [5] H. Krawczyk, M. Bellare, and R. Canetti, "HMAC: Keyed-Hashing for Message Authentication," RFC 2104, February, 1997.
- [6] D. Eastlake and P. Jones, "US Secure Hash Algorithm 1 (SHA1)," RFC 3174, September, 2001.
- [7] P. Syverson, "A taxonomy of replay attacks," IEEE Computer Society Press, pp. 187-191, 1994.
- [8] D. Denning and G. Sacco, "Timestamps in Key Distribution Protocols," Communications of the ACM, Vol. 24, pp. 533-536, August, 1981.
- [9] J. Postel, "INTERNET PROTOCOL," RFC 791, September, 1981.
- [10] S. Deering and R. Hinden, "Internet Protocol, Version 6 (IPv6) Specification," RFC 2460, December, 1998.
- [11] P. Biondi, "Packet generation and network based attacks with Scapy," CanSecWest/core05, France, May, 2005.

สายอากาศร่องรูปตัวเอสแพร่กระจายคลื่นสองทิศทางโพลาไรซ์ วงกลมสำหรับเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดียูเอชเอฟสากล

Circularly Polarized Bidirectional S-Slot Antenna for Universal UHF-RFID Reader

พิสิษฐ์ จันแปงเงิน¹ ชวรงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์¹ สิทธิชัย เค่นศรี²

¹ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

²หน่วยวิจัยเทคโนโลยีไร้สายและความมั่นคง, ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ

สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการออกแบบสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลสำหรับระบบอาร์เอฟไอดีย่านความถี่ยูเอชเอฟสากล โดยช่วงความถี่ใช้งานตั้งแต่ 840 ถึง 960 MHz ซึ่งมีโครงสร้างของสายอากาศประกอบด้วยร่องรูปตัวเอส สำหรับแพร่กระจายคลื่นโพลาไรซ์วงกลม โดยสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลมีความกว้าง 120 mm และยาว 120 mm เท่ากัน สร้างบนวัสดุฐานรองชนิด FR-4 มีความหนา 3.18 mm มีค่าคงตัวไดอิเล็กตริกเท่ากับ 4.3 จากผลการทดสอบสายอากาศมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นสองทิศทาง อิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ครอบคลุมช่วงความถี่ใช้งานตั้งแต่ 650 MHz ถึง 1200 MHz คิดเป็นอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ 59% โพลาไรซ์วงกลมตลอดช่วงความถี่ 660 MHz ถึง 1050 MHz คิดเป็นอัตราส่วนแบนด์วิดท์ 46% มีอัตราส่วนแกน 1.03 dB และอัตราขยาย 3.23 dBic ที่ความถี่ 900 MHz ซึ่งเป็นความถี่กลางของย่านความถี่ระบบอาร์เอฟไอดียูเอชเอฟสากล

คำสำคัญ : โพลาไรซ์วงกลม อาร์เอฟไอดี ยูเอชเอฟ สายอากาศเครื่องอ่านข้อมูล

Abstract

This paper presents a design of the universal reader antenna applied for the ultra-high frequency (UHF) - radio frequency identification (RFID) system with the operating frequency from 840 MHz to 960 MHz. The antenna structure consists of S-Slot to produce the circular polarization. The total size of the reader antenna is 120 mm × 120 mm fabricated on the FR4 substrate with the dielectric constant of 4.3 and a thickness of 3.18 mm. From the measured results, it is shown that the proposed reader antenna radiates a bidirectional pattern with the circular polarization, covering the operating frequency from 660 MHz to 1050 MHz with axial ratio bandwidth of 46%. The axial ratio and gain at the boresight direction are 1.03 -

dB and 3.23 dBic, respectively at 900 MHz which is the center frequency of universal UHF RFID standard band.

Keywords : Circular polarization (CP), RF Identification (RFID), Ultra high frequency (UHF), Reader antenna.

1. บทนำ

ในปัจจุบันระบบอาร์เอฟไอดี (Radio Frequency Identification System: RFID) เป็นเทคโนโลยีที่ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในชีวิตประจำวันได้อย่างหลากหลาย อาทิเช่น ระบบการควบคุมการเข้า-ออกในสถานที่ทำงานหรือห้องเรียน ระบบติดตามการขนส่ง การใช้แสดงตัวตนของคน สัตว์ หรือผลิตภัณฑ์ รวมไปถึงการใช้งานในเชิงเทคโนโลยีอุตสาหกรรม วิทยาศาสตร์ และการแพทย์ [1] ระบบอาร์เอฟไอดี ประกอบไปด้วยเครื่องอ่านข้อมูลและแท็กเป็นองค์ประกอบหลัก โดยโครงสร้างทางสถาปัตยกรรมภายในของระบบอาร์เอฟไอดีมีรูปแบบที่คล้ายคลึงกับเทคโนโลยีสมาร์ทการ์ด ซึ่งเครื่องอ่านข้อมูลจะส่งสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุผ่านสายอากาศแล้วไปยังแท็ก จากนั้นแท็กที่ได้รับคลื่นความถี่วิทยุจะมีการตอบสนอง โดยจะแพร่กระจายคลื่นความถี่วิทยุที่แฝงข้อมูลที่อยู่ภายในแท็กกลับไปยังสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูล และส่งต่อไปให้เครื่องอ่านข้อมูลเพื่อทำการวิเคราะห์ประมวลผลต่อไป ซึ่งตัวแท็กจะมีหน่วยความจำฝังอยู่ภายในชิพวงจรรวมอยู่ด้วย แต่เนื่องจากสายอากาศแท็กส่วนใหญ่จะออกแบบเป็นสายอากาศชนิดโพลาริซิงเส้น เนื่องจากขนาดของแท็กชนิดโพลาริซิงเส้นส่วนมากจะมีขนาดเล็กกว่าแท็กชนิดโพลาริซิงวงกลม ทำให้แท็กส่วนมากนิยมออกแบบให้มีคุณลักษณะการโพลาริซิงเส้น

จากคุณสมบัติดังกล่าว ซึ่งแท็กโพลาริซิงเส้นโดยส่วนใหญ่มีขนาดเล็ก จึงทำให้เกิดปัญหาการอ่านข้อมูลสั้นลง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องออกแบบสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลให้มีอัตราขยายที่มีความเหมาะสมเพื่อให้ได้ระยะการอ่านที่ไกลขึ้นเมื่อมีการใช้ร่วมกับแท็ก นอกจากนี้ปัญหาทางด้านอัตราขยายของสายอากาศแล้วสิ่งที่ควรพิจารณาในการออกแบบสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลคือ

การออกแบบให้สายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลสามารถ รับส่งข้อมูลกับแท็กได้ในทุกระนาบ เนื่องจากการนำแท็กไปติดตั้งใช้งานบนตัวสินค้า ตำแหน่งของแท็กอาจไม่สามารถควบคุมได้

ในกรณีที่สายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลและแท็กมีโพลาริซิงเป็นชนิดเชิงเส้นเหมือนกัน ตำแหน่งการติดตั้งแท็กและเครื่องอ่านข้อมูลจะต้องมีทิศทางของสายอากาศตรงกัน เพื่อให้สามารถรับและส่งข้อมูลได้อย่างมีประสิทธิภาพตลอดเวลา แต่ในการใช้งานจริงตำแหน่งของวัตถุที่นำแท็กไปติด กับตำแหน่งของเครื่องอ่านข้อมูลอาจไม่สามารถกำหนดให้มีทิศทางของสายอากาศตรงกันได้ ดังนั้นสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลจึงควรมีความสามารถที่จะรับส่งข้อมูลกับแท็กได้ในทุกระนาบและตำแหน่งการวาง ดังนั้นสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลจึงควรมีคุณลักษณะการโพลาริซิงเป็นชนิดวงกลม และมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่มีความเหมาะสม และมีคุณลักษณะที่สามารถรับและส่งข้อมูลจากแท็กได้ในทุกระนาบและตำแหน่งการติดตั้ง

ในปัจจุบันสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลที่ทำงานในช่วงความถี่เอชเอฟจะเป็นสายอากาศที่มีโพลาริซิงเส้นทำให้การนำไปประยุกต์ใช้งานในเชิงอุตสาหกรรมจำเป็นต้องมีความระมัดระวังในการนำแท็กไปติดกับผลิตภัณฑ์ หรือในบางกรณีผลิตภัณฑ์อาจมีการเปลี่ยนตำแหน่งโดยไม่ทราบล่วงหน้าได้ เป็นผลให้การสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็กมีประสิทธิภาพลดลงทำให้ระยะการอ่านสั้นลง เนื่องจากการสูญเสียเชิงโพลาริซิง เพื่อที่จะป้องกันไม่ให้เกิดการสูญเสียเชิงโพลาริซิงในขณะที่มีการสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลและแท็ก จึงได้ทำการออกแบบสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลที่มีโพลาริซิงวงกลมซึ่งจะช่วยลดปัญหาที่ได้กล่าวมาข้างต้นได้ โดยสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลที่ทำการออกแบบ มีลักษณะแบนราบ มีขนาดเล็ก

กะทัดรัด ง่ายต่อการติดตั้งใช้งานเมื่อเทียบกับผลิตภัณฑ์ที่มีจำหน่ายในท้องตลาดและงานวิจัยที่นำเสนอมาก่อนนี้ [6]-[12]

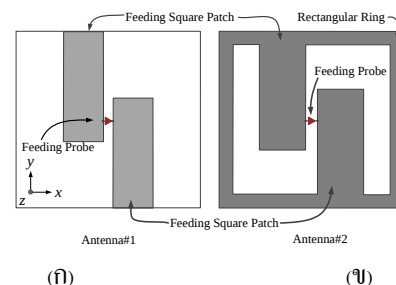
จะเห็นได้ว่าสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลมีผลต่อสมรรถนะการใช้งาน โดยเฉพาะระยะการอ่านข้อมูลของระบบอาร์เอฟไอดีเป็นอย่างมาก เพราะคุณลักษณะของสายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูล โดยเฉพาะลักษณะแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศจะมีผลต่อระยะการรับส่งข้อมูล และมุมรับ-ส่งระหว่างเครื่องอ่านและแท็ก ในงานวิจัยนี้นำเสนอการออกแบบสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลที่มีจุดป้อนสัญญาณเดี่ยว และมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นสองทิศทางโดยมีโพลาริซเป็นวงกลม สายอากาศประกอบด้วยร่องรูปตัวเอสเป็นโครงสร้างหลัก เพื่อใช้งานในช่วงความถี่ 840-960 MHz สำหรับระบบอาร์เอฟไอดีย่านความถี่ยูเอชเอฟสากล ตามมาตรฐาน FCC [2] แต่ในมาตรฐาน FCC ยังไม่ได้ระบุความถี่ใช้งานอาร์เอฟไอดีของประเทศจีนไว้ในมาตรฐาน ที่ใช้ความถี่ 840.5-844.5 MHz ซึ่งมีความสำคัญในการนำไปใช้งานเพื่อที่จะครอบคลุมทั่วโลก จึงใช้ความถี่ 840-960 MHz ในการออกแบบสายอากาศสร้างบนวัสดุฐานรองชนิด FR-4 [3] โดยมีเพียงร่องรูปตัวเอสเป็นโครงสร้างหลัก ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่มีมาก่อนหน้านี้ [4]-[8] จะพบว่าสายอากาศที่นำเสนอมีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อน สร้างง่าย แต่มีคุณสมบัติใกล้เคียงหรือดีกว่างานวิจัยที่มีมาก่อน

สายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลที่มีจุดป้อนสัญญาณเดี่ยว มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นสองทิศทางด้วยโพลาริซวงกลมซึ่งได้ทำการศึกษาและออกแบบด้วยโปรแกรมจำลอง ได้ถูกสร้างเป็นสายอากาศต้นแบบและทำการทดสอบคุณลักษณะของสายอากาศ ในห้องปฏิบัติการวิจัยสายอากาศและการประยุกต์แม่เหล็กไฟฟ้าได้แก่ค่าการสูญเสียเนื่องจากการสะท้อนกลับในรูปแบบ $|S_{11}|$ แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น อัตราขยาย และอัตราส่วนแกนของสายอากาศ ซึ่งรายละเอียดจะได้กล่าวในหัวข้อถัดไป

2. การออกแบบสายอากาศ

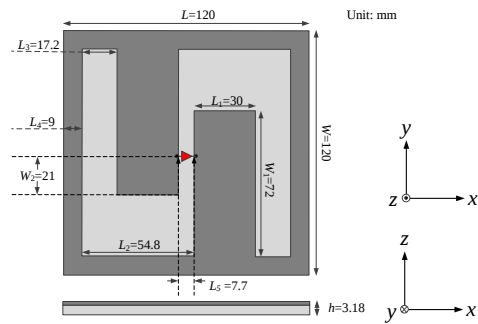
งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการออกแบบสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดีที่มีช่วงความถี่ใช้งานครอบคลุมย่าน

ยูเอชเอฟสากล (840 MHz ถึง 960 MHz) โดยโครงสร้างของสายอากาศมีการป้อนสัญญาณเพียงตำแหน่งเดียวด้วยสายป้อนสัญญาณผ่าน โคอแอกเชียลโพรบ ระหว่างแพทช์ตรงกลางร่องรูปตัวเอส ซึ่งสร้างบนแผ่นวัสดุฐานรองชนิด FR-4 ที่มีค่าคงตัวไดอิเล็กตริก ϵ_r เท่ากับ 4.3 ความหนาวัสดุฐานรอง 3.18 mm ค่าแทนเจนต์การสูญเสีย 0.0025 ที่ความถี่ 1 GHz ซึ่งค่าคงตัวไดอิเล็กตริกและความหนาของวัสดุฐานรองมีผลในการช่วยลดขนาดของสายอากาศเนื่องจากความยาวคลื่นที่เดินทางบนวัสดุฐานรองที่มีค่าคงตัวไดอิเล็กตริกเท่ากับ 4.3 จะมีความยาวคลื่นสั้นกว่าคลื่นที่เดินทางในสภาวะอวกาศว่าง ในการออกแบบโครงสร้างของสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลได้กำหนดให้ความยาวเริ่มต้นของแพทช์สี่เหลี่ยมมีความยาวเป็น $\lambda_g / 2$ (λ_g คือความยาวคลื่นที่เดินทางบนวัสดุฐานรอง) พิจารณาที่ความถี่ 900 MHz (เป็นความถี่กลางของย่านความถี่ในระบบอาร์เอฟไอดียูเอชเอฟสากล) ซึ่งเป็นโครงสร้างหลักในการแพร่กระจายคลื่น โดยระยะห่างของแพทช์สี่เหลี่ยมทั้งสองมีระยะห่าง 7.7 mm และเยื้องกันในระยะ $\lambda_g / 4$ ดังแสดงในรูปที่ 1(ก)

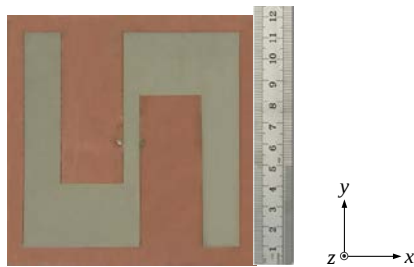


รูปที่ 1 โครงสร้างสายอากาศ (ก) โครงสร้างสายอากาศเริ่มต้น Antenna#1 (ข) โครงสร้างสายอากาศที่เพิ่มบ่วงสี่เหลี่ยม Antenna#2

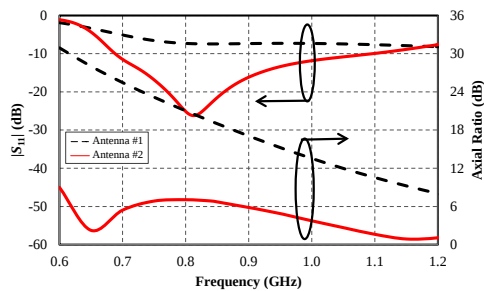
ในบทความนี้มุ่งเน้นคุณลักษณะของสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลให้สามารถแพร่กระจายคลื่นที่มีโพลาริซวงกลม จึงได้ทำการเพิ่มบ่วงสี่เหลี่ยมที่มีลักษณะสมมาตรให้กับโครงสร้างสายอากาศดังแสดงในรูปที่ 1(ข) ทำให้เกิดเป็นโครงสร้างร่องรูปตัวเอสขึ้นมารูปที่ 2 แสดงโครงสร้างสายอากาศที่ออกแบบพร้อมขนาดและพารามิเตอร์และรูปที่ 3 แสดงสายอากาศต้นแบบที่สร้างขึ้นเพื่อทำการทดสอบคุณลักษณะของสายอากาศ



รูปที่ 2 โครงสร้างสายอากาศต้นแบบพร้อมขนาดและพารามิเตอร์



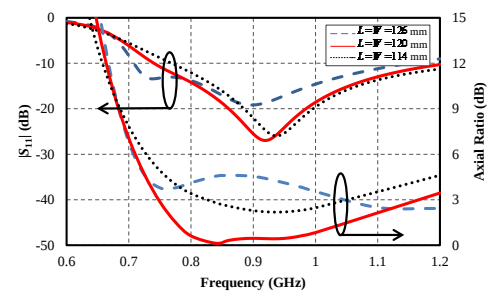
รูปที่ 3 รูปถ่ายสายอากาศต้นแบบ



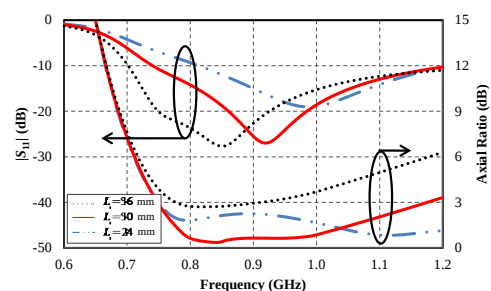
รูปที่ 4 การเปรียบเทียบผลจำลอง $|S_{11}|$ และอัตราส่วนแกนที่เป็นฟังก์ชันของความถี่เมื่อโครงสร้างสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลมีลักษณะที่แตกต่างกัน

จากกราฟในรูปที่ 4 ได้มีการศึกษาโครงสร้างอยู่สองเงื่อนไขด้วยกันคือ 1) โครงสร้างสายอากาศเริ่มต้น (Antenna#1) และ โครงสร้างของสายอากาศที่เพิ่มบ่วงสี่เหลี่ยม (Antenna#2) จากกราฟผลจำลอง $|S_{11}|$ ในเงื่อนไขที่ 1 (เส้นประ) สายอากาศเริ่มต้นที่ออกแบบมีช่วงอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์กว้างแต่ยังคงมีค่า $|S_{11}|$ สูงกว่า -10 dB และอัตราส่วนแกนยังมีค่าที่สูงกว่า 3 dB ซึ่งยังไม่ตรงตามเป้าหมายของการออกแบบ จึงต้องทำการเพิ่มโครงสร้างบ่วงสี่เหลี่ยมเข้าไปเพื่อให้คุณลักษณะสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลทำงานครอบคลุมความถี่ใช้งาน แสดงในเงื่อนไขที่ 2 (เส้นทึบ) จะเห็นได้ว่าค่า $|S_{11}|$ มีค่าต่ำกว่า -10 dB

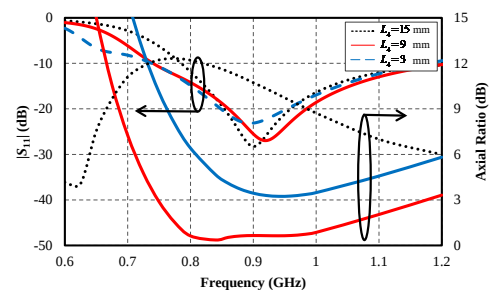
ตั้งแต่ช่วงความถี่ 688 MHz ถึง 1090 MHz ซึ่งครอบคลุมความถี่ใช้งานระบบอาร์เอฟไอเดียเอชเอฟสากล และเมื่อพิจารณาค่าอัตราส่วนแกนจะเห็นว่าค่าอัตราส่วนแกนยังคงมีค่าสูงกว่า 3 dB แต่ยังมีแนวโน้มที่จะสามารถแพร่กระจายคลื่นด้วยโพลาไรซ์วงกลม ในขั้นตอนถัดไปจะทำการศึกษาและปรับค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลเพื่อให้มีคุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นด้วยโพลาไรซ์วงกลมที่ครอบคลุมความถี่ใช้งานอาร์เอฟไอเดียเอชเอฟสากล



รูปที่ 5 ผลจำลอง $|S_{11}|$ และอัตราส่วนแกนเมื่อปรับขนาดพารามิเตอร์ L และ W



รูปที่ 6 ผลจำลอง $|S_{11}|$ และอัตราส่วนแกนเมื่อปรับขนาดพารามิเตอร์ L_1

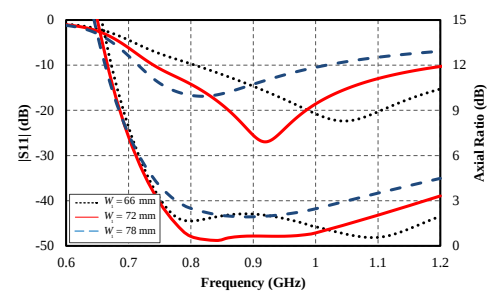


รูปที่ 7 ผลจำลอง $|S_{11}|$ และอัตราส่วนแกนเมื่อปรับขนาดพารามิเตอร์ L_4

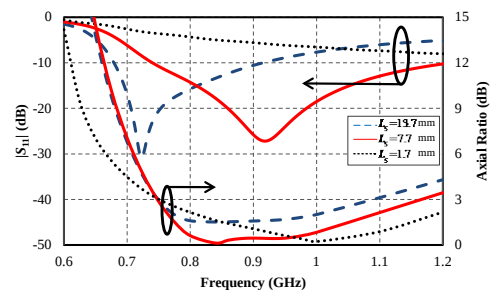
จากรูปที่ 5 ทำการปรับขนาดพารามิเตอร์ L และ W โดยขนาดพารามิเตอร์อื่นๆ คงที่สังเกตได้ว่า เมื่อขนาดความกว้างและความยาวของบ่วงสี่เหลี่ยมเพิ่มมากขึ้น โดยกำหนดให้ขนาดของพารามิเตอร์ L และ W เท่ากันเสมอ เพื่อความสมมาตรของโครงสร้างซึ่งทำให้กระแสเดินทางบนพื้นผิวมีขนาด (Magnitude) ที่เท่ากัน โดยการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ W และ L จะมีผลต่อค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไม่มากนัก ในส่วนค่าอัตราส่วนแกนจะมีผลกระทบที่มากกว่า เนื่องจากเกิดการเปลี่ยนแปลงทั้งขนาดและเฟสขององค์ประกอบที่ทำให้เกิดโพลาริซวงกลม เมื่อสังเกตจากกราฟจะพบว่า $|S_{11}|$ ของสายอากาศเปลี่ยนความถี่ไปทางช่วงความถี่ต่ำ เนื่องจากความยาวทางไฟฟ้าที่เดินทางบนพื้นผิวสายอากาศเพิ่มมากขึ้นทำให้ตอบสนองในช่วงความถี่ต่ำ ซึ่งขนาดที่เหมาะสมของสายอากาศเท่ากับ 120 mm โดยพิจารณาจากค่า $|S_{11}|$ ที่ต่ำกว่า -10 dB สามารถครอบคลุมช่วงความถี่ใช้งานตั้งแต่ 743 MHz ถึง 1215 MHz ในส่วนอัตราส่วนแกน AR น้อยกว่าหรือเท่ากับ 3 dB จะครอบคลุมช่วงความถี่ใช้งานตั้งแต่ 750 MHz ถึง 1100 MHz ซึ่งจะทำให้สายอากาศมีการแพร่กระจายคลื่นด้วยโพลาริซวงกลม ในรูปที่ 6 เมื่อเพิ่มความกว้างแพทช์ป้อนสัญญาณสี่เหลี่ยม (L_1) จะสังเกตได้ว่าช่วงความถี่ใช้งานของสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลมีแนวโน้มลดลงไปทางด้านความถี่ต่ำ อันเนื่องมาจากระยะความกว้างแพทช์ป้อนสัญญาณสี่เหลี่ยมเพิ่มมากขึ้นเป็นผลให้ความถี่ตอบสนองลดต่ำลง ซึ่งยังส่งผลต่อค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศอีกด้วย โดยขนาดความกว้างแพทช์ป้อนสัญญาณที่เหมาะสมคือ 30 mm จากกราฟจะเห็นว่าค่า $|S_{11}|$ มีช่วงความถี่ใช้งานตั้งแต่ 744 MHz ถึง 1212 MHz และค่าอัตราส่วนแกนต่ำกว่า 3 dB ครอบคลุมช่วงความถี่ใช้งานตั้งแต่ 750 MHz ถึง 1150 MHz

ในรูปที่ 7 ทำการปรับค่าพารามิเตอร์ L_4 ซึ่งเป็นความกว้างของเส้นบ่วงสี่เหลี่ยม โดยพารามิเตอร์ L_2 และ L_3 จะเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย จะเห็นได้ว่าช่วงความถี่ใช้งานสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลมีแนวโน้มลดลงไปทางด้านความถี่ต่ำไม่มาก แต่เมื่อพิจารณาค่าอัตราส่วนแกนจะเห็นได้ชัดว่ามีการเปลี่ยนแปลง ส่งผลต่อคุณลักษณะการ

แพร่กระจายคลื่นด้วยโพลาริซวงกลมของสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลที่โพลาริซวงกลม แสดงว่าพารามิเตอร์ L_4 มีผลต่อการแมตช์อิมพีแดนซ์ไม่มากนักแต่จะมีผลต่อค่าอัตราส่วนแกนมากกว่า นั่นเป็นเพราะว่าพื้นผิวที่ให้กระแสไหลมีขนาดหรือระยะทางการเดินของกระแสไม่เหมาะสมกับองค์ประกอบที่จะเป็นตัวทำให้เกิดโพลาริซวงกลม โดยที่ขนาดความกว้างของเส้นบ่วงสี่เหลี่ยมที่เหมาะสมคือ 9 mm ค่า $|S_{11}|$ ครอบคลุมช่วงความถี่ใช้งานตั้งแต่ 744 MHz ถึง 1212 MHz อัตราส่วนแกนต่ำกว่า 3 dB ครอบคลุมช่วงความถี่ใช้งานตั้งแต่ 750 MHz ถึง 1150 MHz



รูปที่ 8 ผลจำลอง $|S_{11}|$ และอัตราส่วนแกน เมื่อปรับขนาดพารามิเตอร์ W_1



รูปที่ 9 ผลจำลอง $|S_{11}|$ และอัตราส่วนแกน เมื่อปรับขนาดพารามิเตอร์ L_5

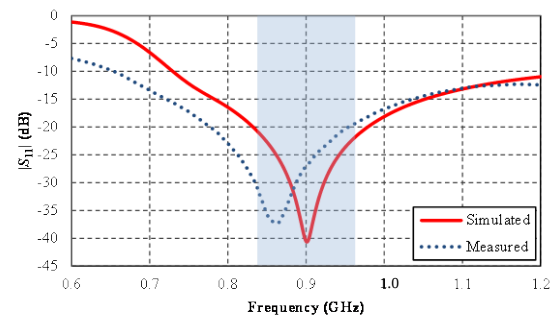
จากรูปที่ 8 เมื่อทำการเพิ่มความยาวของแผ่นสตริปที่ยื่นออกมาทั้งสองข้าง W_1 (โดยพารามิเตอร์ W_2 ก็เปลี่ยนแปลงตามไปด้วย) ซึ่งเป็นโครงสร้างหลักในส่วนที่ใช้เทคนิคที่เรียกว่า Open Circuit Strip มีความสำคัญต่อการแมตช์อิมพีแดนซ์ของสายอากาศ จะสังเกตได้ว่าช่วงความถี่ใช้งานของสายอากาศมีแนวโน้มที่ลดลง อันเนื่องมาจากค่าความยาวทางไฟฟ้าที่เดินทางในส่วนของขอบแพทช์ป้อนสัญญาณสี่เหลี่ยมมีความยาวเพิ่มขึ้นเป็นผลให้ความถี่ที่ตอบสนองลดต่ำลง เมื่อทำการพิจารณาค่าอิมพีแดนซ์

สายอากาศที่ $W_1 = 78$ mm จะได้ $Z_L = 39.2 + j15.6 \Omega$ ที่ $W_2 = 72$ mm จะได้ $Z_L = 47 + j0.12 \Omega$ ที่ $W_1 = 66$ mm จะได้ $Z_L = 56.5 - j16.8 \Omega$ จากค่า Z_L (Z_L คือ อิมพีแดนซ์ด้านเข้าสายอากาศ) สังเกตได้ว่าพารามิเตอร์ W_1 มีผลต่อการแมตช์อิมพีแดนซ์ของสายอากาศอย่างมากโดยความสูงของแพทช์ ป้อนสัญญาณสี่เหลี่ยมที่เหมาะสมคือ 72 mm และเมื่อพิจารณา $|S_{11}|$ พบว่ามีช่วงความถี่ที่ใช้งานได้ตั้งแต่ 740 MHz ถึง 1214 MHz ส่วนค่าอัตราส่วนแถมมีช่วงความถี่ใช้งานตั้งแต่ 750 MHz ถึง 1150 MHz

จากรูปที่ 9 เมื่อทำการปรับเพิ่มระยะห่างระหว่างจุดป้อนสัญญาณแพทช์สี่เหลี่ยม (L_2) ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่มีผลกับการแมตช์อิมพีแดนซ์ แต่จะมีผลน้อยกับอัตราส่วนแถม เพราะการเกิดกระแสบนพื้นผิว ระยะทางที่กระแสเดินทางและขนาดของพื้นผิวที่กระแสเดินทางยังคงเหมือนเดิม ซึ่งจะเห็นว่าช่วงความถี่ใช้งานของสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลมีแนวโน้มเลื่อนไปทางความถี่ต่ำ และยังทำให้แบนด์วิธของสายอากาศแคบลงด้วย ทำให้ทราบว่าพารามิเตอร์ L_2 สามารถปรับช่วงความถี่แบนด์วิธของสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูล แต่มีผลไม่มากกับอัตราส่วนแถม โดยขนาดความกว้างที่เหมาะสมคือ 7.7 mm โดยค่า $|S_{11}|$ ครอบคลุมช่วงความถี่ใช้งานตั้งแต่ 744 MHz ถึง 1212 MHz และค่าอัตราส่วนแถมต่ำกว่า 3 dB ครอบคลุมช่วงความถี่ใช้งานตั้งแต่ 750 MHz ถึง 1150 MHz

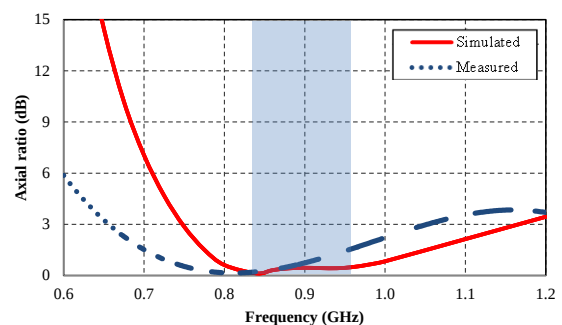
4. ผลการจำลองและการทดสอบสายอากาศ

เพื่อยืนยันความถูกต้องของผลที่ได้จากการออกแบบและการจำลอง ได้ทำการสร้างสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลต้นแบบและทดสอบภายในห้องไร้การสะท้อนในสนามระยะไกล โดยใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Agilent vector network analyzer4) รุ่น HP 8720C ในการทดสอบ

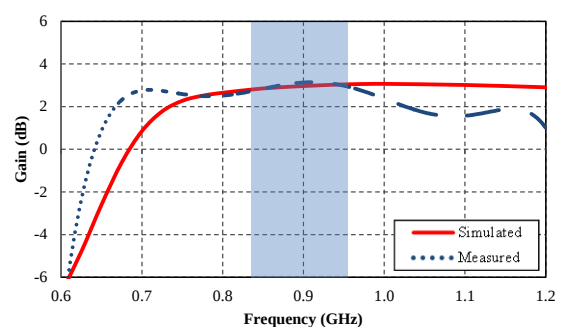


รูปที่ 10 ผลจำลองและทดสอบสัมประสิทธิ์การสะท้อน $|S_{11}|$ ของสายอากาศที่นำเสนอ

รูปที่ 10 แสดงผลจำลองและทดสอบสัมประสิทธิ์การสะท้อน $|S_{11}|$ ของสายอากาศที่นำเสนอ จากผลทดสอบพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนต่ำกว่า -10 dB ครอบคลุมความถี่ระหว่าง 650 MHz ถึง 1200 MHz (แบนด์วิธเท่ากับ 59%)



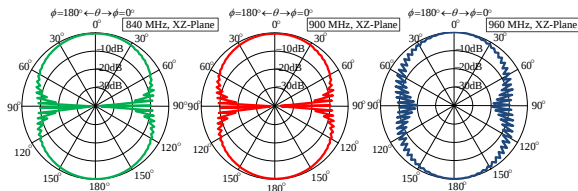
รูปที่ 11 ผลจำลองและทดสอบอัตราส่วนแถมของสายอากาศที่นำเสนอ



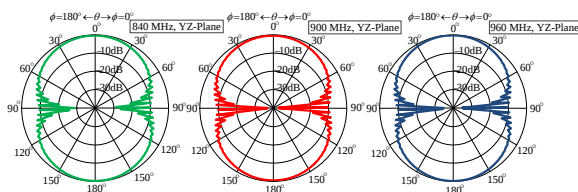
รูปที่ 12 ผลจำลองและทดสอบอัตราขยายของสายอากาศที่นำเสนอ

รูปที่ 11 แสดงผลจำลองและทดสอบอัตราส่วนแถมบริเวณด้านหน้าของสายอากาศ จากผลการทดสอบพบว่าค่าช่วงกว้างอัตราส่วนแถม มีค่าต่ำกว่า 3 dB ครอบคลุมตั้งแต่ 660 MHz ถึง 1050 MHz (แบนด์วิธเท่ากับ 46%)

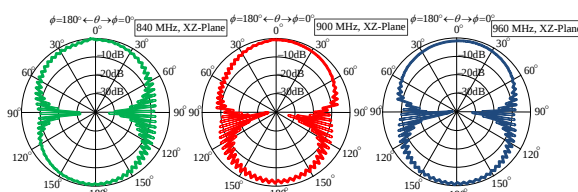
ผลจำลองและทดสอบอัตราขยายในทิศทางด้านหน้าของสายอากาศแสดงในรูปที่ 12 พบว่าอัตราขยายของสายอากาศมีค่ามากกว่า 3.0 dBiC ครอบคลุมย่านความถี่จาก 840 MHz ถึง 960 MHz ซึ่งอัตราขยายสูงสุดคือ 3.28 dBiC ที่ความถี่ 915 MHz จากผลจำลองและทดสอบสัมประสิทธิ์การสะท้อน อัตราส่วนแกน และอัตราขยายพบว่าผลลัพธ์สอดคล้องกัน



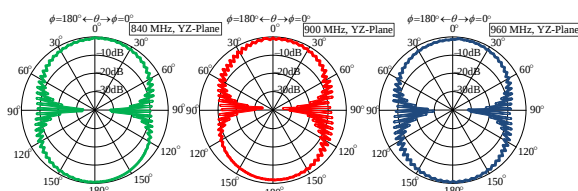
รูปที่ 13 ผลจำลองแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นในระนาบ xz ที่ความถี่ 840 MHz 900 MHz 960 MHz



รูปที่ 14 ผลจำลองแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นในระนาบ yz ที่ความถี่ 840 MHz 900 MHz 960 MHz



รูปที่ 15 ผลทดสอบแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นในระนาบ xz ที่ความถี่ 840 MHz 900 MHz 960 MHz



รูปที่ 16 ผลทดสอบแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นในระนาบ yz ที่ความถี่ 840 MHz 900 MHz 960 MHz

รูปที่ 13 และ 14 แสดงผลจำลองแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศ ที่ความถี่ 840 MHz 900 MHz และ 960 MHz ในระนาบ xz และ yz ตามลำดับ ทั้ง

สองระนาบมีแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นที่สมมาตรและมีมุมอัตราส่วนแกนที่กว้าง เมื่อทำการเปรียบเทียบผลการทดสอบในรูปที่ 15 และ 16 จะเห็นว่าสอดคล้องกับผลจำลองในรูปที่ 13 และ 14 ความกว้างลำคลื่นอัตราส่วนแกนพิจารณาว่าที่ต่ำกว่า 3 dB มีความกว้างลำคลื่นอัตราส่วนแกนมากกว่า 75 องศา ในระนาบ xz และ yz ที่ความถี่ 840 MHz 900 MHz และ 960 MHz ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานสำหรับการประยุกต์ใช้งานกับระบบอาร์เอฟไอดี ข้อดีของงานวิจัยนี้คือรูปร่างตัวเอส ซึ่งเป็นส่วนที่ทำหน้าที่แผ่กระจายคลื่นมีโครงสร้างที่สมมาตรและแก้ปัญหาการเกิดโพลาไรซ์ไขว้ที่ไม่พึงประสงค์ ดังนั้นคุณลักษณะสายอากาศที่ออกแบบเป็นไปตามเป้าหมายการออกแบบที่ได้ตั้งไว้ ความกว้างลำคลื่นอัตราส่วนแกนของสายอากาศต้นแบบที่ความถี่ 840 MHz 900 MHz และ 960 MHz แสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ความกว้างลำคลื่นอัตราส่วนแกน (3-dB) ของสายอากาศที่นำเสนอ

f(MHz)	840		900		960	
	LHCP	RHCP	LHCP	RHCP	LHCP	RHCP
ผลจำลอง (ระนาบ xz)	135°	145°	135°	135°	145°	145°
ผลจำลอง (ระนาบ yz)	135°	135°	135°	145°	140°	145°
ผลทดสอบ (ระนาบ xz)	102°	113°	160°	75°	145°	110°
ผลทดสอบ (ระนาบ yz)	135°	135°	100°	118°	125°	105°

5. สรุป

งานวิจัยนี้นำเสนอสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลที่มีแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นสองทิศทางและโพลาไรซ์วงกลมสำหรับระบบอาร์เอฟไอดียูเอชเอฟสภาค ซึ่งได้ทำการออกแบบโดยการจำลองผล และสร้างสายอากาศต้นแบบขึ้นมา เพื่อทำการทดสอบคุณลักษณะของสายอากาศสายอากาศประกอบไปด้วยแผ่นแผ่กระจายคลื่นที่เจาะร่องเป็นรูปตัวเอส โดยตัวป้อนสัญญาณอยู่ตรงกลางร่องรูปตัวเอส สายอากาศที่นำเสนอมีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อน มีขนาดเล็กสามารถกำเนิดโพลาไรซ์วงกลมและมีแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นสองทิศทาง โดยสายอากาศที่

นำเสนอสามารถครอบคลุมย่านความถี่อาร์เอฟไอดี ยูเอชเอฟสากลตั้งแต่ 750 MHz ถึง 1150 MHz การทดสอบคุณลักษณะสายอากาศต้นแบบ ได้แก่ สัมประสิทธิ์การสะท้อน แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น อัตราขยายและอัตราส่วนแบนเปรียบเทียบกับผลการจำลองพบว่าผลที่ได้มีความสอดคล้องกัน ค่าอัตราส่วนแบนในทิศทางด้านหน้าของสายอากาศเท่ากับ 1.03 dB ที่ความถี่ 900 MHz และมีอัตราส่วนแบนแบนด์วิดท์ 3 dB ครอบคลุมความถี่จาก 660 MHz ถึง 1050 MHz รูปร่างตัวเอชของสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลสามารถแพร่กระจายคลื่นสองทิศทาง โดยมีอัตราขยาย 3.23 dBic ที่ความถี่ 900 MHz ผลทดสอบแสดงว่าสายอากาศที่นำเสนอสามารถใช้งานสำหรับเครื่องอ่านข้อมูลสำหรับระบบอาร์เอฟไอดียูเอชเอฟสากล

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] Klaus Finkenzeller, RFID Handbook, John Wiley& Sons, 2003.
- [2] Federal Communications Commission (FCC) : Revision of Part 15 of the communication's rules regarding ultra-wide band transmission systems. First report and order, ETDocket 98-153, FCC02-48; Adopted : 14 February 2002; Released: 22 April 2002.
- [3] Taconic RF & Microwave Laminates, [online] Available <http://www.taconic-add.com/enproducts-material-view.php>
- [4] Nasimuddin, Z. N. Chen, and X. Qing, "A Compact Circularly Polarized Slotted-Slit-Microstrip Patch Antenna," Proceedings of the Asia-Pacific Microwave Conference, pp. 582-585, Dec, 2011.
- [5] C. Y. D. Sim and C. J. Chi, "A Slot Loaded Circularly Polarized Patch Antenna for UHF RFID Reader," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol.60, No.10, pp. 4516-4521, Oct., 2012.
- [6] T. N. Chang and J.M. Lin, "Circularly Polarized Ring-Patch Antenna," IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, Vol.11, pp. 26-29, Dec, 2012.
- [7] X. Chen et al., "Circularly Polarized Stacked Annular-Ring Microstrip Antenna with Integrated Feeding Network for UHF RFID Readers," IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, Vol.9, pp. 542-545, Jun, 2010.
- [8] Y. F. Cao, S. W. Cheung, and T. I. Yuk, "A Multiband Slot Antenna for GPS/WiMAX/WLAN Systems," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol.63, No.3, pp. 952-958, Mar, 2015.
- [9] M. H. Hoang et al., "Cavity-Backed Circular-Polarized Compact Slot Antenna for Handheld UHF RFID Reader," IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, Vol.14, pp. 1439-1442, Mar, 2015.
- [10] Y. Yao, J. Yu, and X. Chen, "Broadband Planar Antenna with Circular Polarization for RFID Readers," IEEE International Wireless Symposium, Apr, 2013, © 2013 IEEE, doi: 978-1-4673-2141-9/13.
- [11] Y. Li et al., "A Circular Polarization Hybrid-Integrated Rectangular Ring Antenna for RFID Reader," in IEEE International Symposium on Antennas and Propagation, Jul, 2012, © 2012 IEEE, doi: 978-1-4673-0462-7/12
- [12] J.-P. Chen, and P. Hsu, "A Spirally Complementary Split-Ring Resonators Antenna for Circular Polarization and RFID Reader Application," in IEEE International Symposium on Antennas and Propagation, Jul, 2012, © 2012 IEEE, doi: 10.1109/APS.2012.6349199.

เครื่องคัดแยกโลหะโดยใช้คลื่นอัลตราโซนิก

Metal Classifying Machine Using Ultrasonic Testing Method

อัญญาช น้อยผล นพดล มณีรัตน์

ภาควิชาวิศวกรรมการวัดและความคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

บทความฉบับนี้ได้นำเสนอการออกแบบเครื่องคัดแยกโลหะโดยใช้คลื่นอัลตราโซนิก ซึ่งประกอบไปด้วยเครื่องกำเนิดความถี่ เป็นวงจรโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ควบคุมการทำงานและสร้างคลื่นอัลตราโซนิกขนาด 40 กิโลเฮิร์ตซ์ส่งให้กับอัลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์ ที่ทำหน้าที่เป็นตัวส่งคลื่นความถี่ไปยังวัตถุ และเป็นตัวรับคลื่นความถี่ที่สะท้อนกลับออกมาจากวัตถุเป้าหมาย ในการประมวลผลคือการนำคลื่นความถี่อัลตราโซนิกที่สะท้อนกลับออกมาแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้า โดยอาศัยหลักการใช้การจับความแรงของสัญญาณเสียงที่สะท้อนกลับในคาบเวลานั้น เป็นตัวแยกความถี่ของวัตถุ ซึ่งวัตถุแต่ละชนิดมีความหนาแน่นและโครงสร้างแตกต่างกัน ดังนั้นความแรงของสัญญาณเสียงที่สะท้อนกลับ จึงไม่เท่ากันด้วย การทดสอบสามารถแบ่งแยกโลหะ 8 ชนิดได้แก่ เหล็ก ทองแดง ทองเหลือง อะลูมิเนียม เหล็กชุบพลาส สแตนเลส เหล็กชุบกัลวาไนส์ อะลูมิเนียมชุบเงิน ที่นำมาใช้ในการทดสอบได้อย่างแม่นยำ แสดงความแตกต่างได้อย่างชัดเจน ใช้เวลาในการประมวลผลรวดเร็ว ด้วยขนาดของเครื่องที่เล็กและพกพาสะดวก ราคาต้นทุนต่ำจึงสามารถนำไปใช้ในภาคปฏิบัติการอุตสาหกรรมได้เป็นอย่างดี

คำสำคัญ : อัลตราโซนิก, ไมโครคอนโทรลเลอร์, โลหะ, การคัดแยก

Abstract

This paper presents the design and development of a metal classifying machine that uses ultrasonic wave. The machine consists of a frequency generator which uses a microcontroller to control the processes and create an ultrasonic wave of 40 kHz then sends it to the ultrasonic transducer. The transducer has a function that transfers the frequency to the object and receives the reflected wave from that particular object. For result evaluation, the reflected ultrasonic wave is transformed into an electrical wave and measures the intensity of the reflected sound wave at a specific time. Using this technique the machine can distinguish and differentiate metal types. Each type of objects has different density and structure. Therefore, The reflected intensity are also different. By testing these variables, The machine can classify eight different types of metal, Which are Steel, Copper, Brass ,Aluminum, Steel sheet pile, Stainless steel, Galvanized steel, And Polished aluminum ,Show differences clearly accuracy and high evaluation speed. Due to the small size and low cost price of the machine, it can be used in the industry efficiently.

Keywords : Ultrasonic, Microcontroller, Metal, Classification

1. บทนำ

ในปัจจุบันการเจริญเติบโตในภาคอุตสาหกรรมนั้นเป็นไปอย่างต่อเนื่อง ความเจริญก้าวหน้าทางเทคโนโลยี อุตสาหกรรมต่างๆที่เติบโตขึ้นเพื่อให้เพียงพอต่อความต้องการของผู้บริโภค การพัฒนาอุตสาหกรรมก็ยังคงมีต่อไปเรื่อยๆ เพื่อให้เกิดผลผลิตของอุตสาหกรรมตนเองที่ดียิ่งขึ้น การพัฒนาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ การลดต้นทุนการผลิต การมุ่งหวังผลกำไรนั้นย่อมเป็นส่วนสำคัญส่วนหนึ่งของอุตสาหกรรมนั้นๆ เนื่องจากงานวิจัยนี้ได้ทำร่วมกับทางบริษัท เอ.ไอ. เทคโนโลยี อินดัสทรี จำกัด ซึ่งเป็นโรงงานหล่อเหล็ก หลังจากที่มีการหล่อเหล็กแล้วนั้น ก็จะต้องมีการคัดแยก[1-2]และการทดสอบคุณภาพของเหล็กให้ได้มาตรฐานหรือไม่ โดยก่อนหน้านี้นี้ทางโรงงานได้ใช้คนในการตรวจเช็คคัดแยกของเหล็กหล่อด้วยการเคาะและฟังเสียง[3] จะใช้แรงงานมนุษย์เป็นหลัก ซึ่งมีความยุ่งยากในการฝึกฝน ใช้เวลานาน อีกทั้งยังมีประสิทธิภาพในการตรวจสอบไม่คงที่ขึ้นอยู่กับความชำนาญของแต่ละบุคคล ทำให้ความไม่แน่นอนในการเช็คคุณภาพของเหล็กหล่อ

จากปัญหาที่เกิดขึ้นและได้กล่าวมาข้างต้น จึงเกิดงานวิจัยที่ได้รับความร่วมมือจากทางบริษัทเริ่มต้นพัฒนาเครื่องคัดแยกโลหะโดยใช้คลื่นอัลตราโซนิก[4] ซึ่งการทดสอบด้วยคลื่นอัลตราโซนิกนั้นเป็นส่วนหนึ่งของการทดสอบแบบไม่ทำลาย (Non-destructive Testing) [5] เป็นการทดสอบที่ไม่มีผลกระทบหรือเกิดความเสียหายแก่วัตถุและให้ผลที่แม่นยำถูกต้องกว่าการใช้แรงงานคน ยังเป็นการลดต้นทุนการผลิตในเชิงอุตสาหกรรมลดค่าจ้างจากแรงงานมนุษย์ และป้องกันอันตรายทางอ้อมที่อาจจะเกิดขึ้นกับแรงงานมนุษย์โดยการใช้เครื่องมือแทน เครื่องคัดแยกโลหะโดยใช้คลื่น

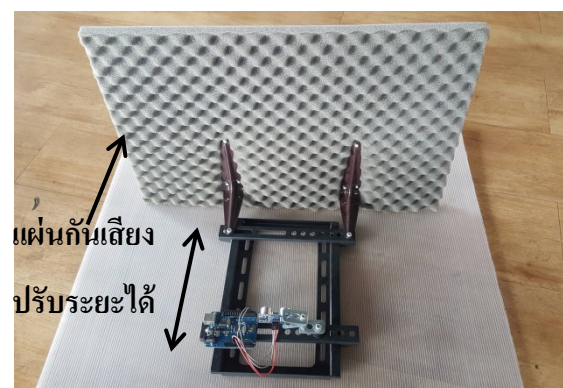
อัลตราโซนิกนี้มีขนาดเล็กมีน้ำหนักเบา ง่ายต่อการใช้งานและให้ผลที่แม่นยำใช้เวลาน้อยในการประมวลผล

2. โครงสร้างของระบบ

หลักการทำงานของเครื่องคัดแยกโลหะโดยใช้คลื่นอัลตราโซนิก ประกอบไปด้วยบอร์ด Arduino UNO R3 เป็นบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR ที่ใช้การเขียนโปรแกรมควบคุมและกำเนิดความถี่ เชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ได้โดยตรงผ่าน USB สามารถเขียนและโปรแกรมด้วยบอร์ดด้วย Arduino IDE ตัวบอร์ดใช้ชิพประมวลผลเป็น MCU เบอร์ Atmega328P ซึ่งมีความในการประมวลผล 20 ล้านคำสั่งต่อวินาที 20MIP (million instructions per second) ที่สามารถประมวลผลได้อย่างรวดเร็ว และในการสร้างความถี่นั้นสร้างโดยวงจรผลิตความถี่ขนาด 40 kHz ด้วย Ultrasonic Sensor Module HC-SR04 เป็นเซนเซอร์โมดูลสำหรับตรวจจับวัตถุและวัดระยะทางแบบไม่สัมผัส

2.1 การออกแบบตัวเครื่อง

ตัวเครื่องถูกออกแบบให้สามารถปรับระยะทางได้สูงสุดที่ 30 cm เป็นลักษณะโครงตั้งฉากกับพื้นระนาบ ติดแผ่นกันเสียงสะท้อนที่ฉากด้านหลังกว้าง 30 cm ยาว 50 cm



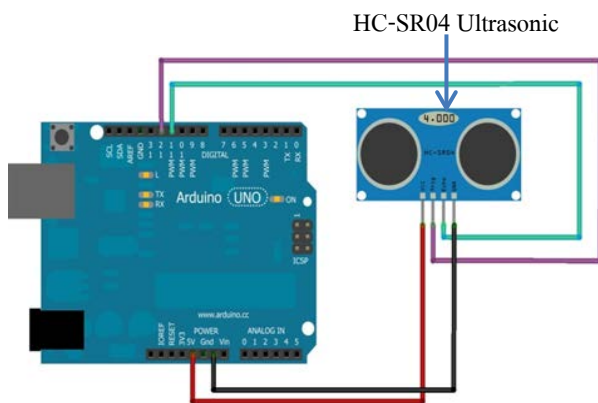
รูปที่ 1 แสดงการออกแบบตัวโครงเครื่อง

2.1 การออกแบบชุดกำเนิดความถี่

ลักษณะการทำงานของวงจรเครื่องคัดแยกโลหะโดยใช้คลื่นอัลตราโซนิกที่มีความถี่ที่ 40 kHz โดย มี Ultrasonic Sensor Module HC-SR04 ที่ทำหน้าที่ส่งคลื่นความถี่อัลตราโซนิก และรับคลื่นความถี่ที่สะท้อนกลับออกมาจากวัตถุ โดยการใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์และเซนเซอร์อัลตราโซนิก HC-SR04 เป็นเซนเซอร์ไมโครสำหรับตรวจจับวัตถุและวัดระยะทางแบบไม่สัมผัส ซึ่งเป็นคลื่นเสียงความถี่สูงเกินกว่าการได้ยินของมนุษย์ วัดระยะได้ตั้งแต่ 2 – 400 เซนติเมตรสามารถต่อใช้งานกับไมโครคอนโทรลเลอร์



รูปที่ 2 โมดูลอัลตราโซนิก HC-SR04



รูปที่ 3 ชุดกำเนิดความถี่

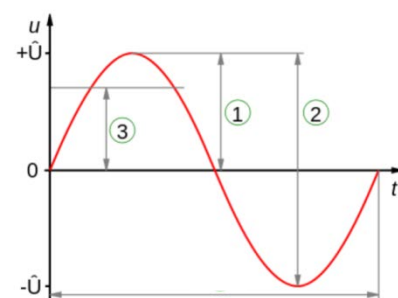
2.2 หลักการทำงานของอัลตราโซนิกเซนเซอร์

โดยตัวเซนเซอร์จะทำงานโดย ตัวส่งสัญญาณจะส่งสัญญาณนาฬิกาไปที่ตัวคอนโทรลเลอร์ เพื่อควบคุมการแปลงสัญญาณ แล้วส่งไปที่ตัวอัลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์[6]ซึ่งแบ่งเป็นสองส่วนคือ ตัวส่งและ

ตัวรับ ตัวส่งจะสร้างคลื่นเสียงอัลตราโซนิก จากสัญญาณไฟฟ้าแล้วส่งคลื่นเสียงความถี่สูงหรืออัลตราโซนิกออกไปเป็นแนวตรง และเมื่อคลื่นเสียงอัลตราโซนิกไปกระทบกับวัตถุใดๆ ตามหลักการของคลื่นเสียง คือ มุมตกกระทบเท่ากับมุมสะท้อนเมื่อเสียงเดินทางผ่านตัวกลางที่มีความหนาแน่นน้อยไปยังวัตถุที่มีความหนาแน่นมากกว่า คลื่นเสียงจะถูกสะท้อนกลับมาที่มุมเท่าเดิมที่ตัวรับคลื่นเสียงอัลตราโซนิก เมื่อตัวรับได้รับคลื่นเสียงที่ถูกสะท้อนกลับมาแล้ว ตัวรับจะแปลงคลื่นเสียงอัลตราโซนิกนั้นเป็นสัญญาณไฟฟ้าแล้วส่งต่อ ให้ตัวประมวลผล

2.3 วิธีการและทฤษฎี

คลื่นเสียงเป็นคลื่นกลที่เกิดจากการสั่นสะเทือนของวัตถุ เมื่อวัตถุเกิดการสั่นสะเทือนก็จะทำให้เกิดการอัดและขยายตัวของคลื่นเสียง และการวัดค่าของแอมพลิจูดของคลื่นเสียงที่ผ่านตัวกลาง แสดงถึงความแรงของคลื่นสามารถบ่งบอกได้ถึงความดังของเสียง (Loudness) ยิ่งแอมพลิจูดมีค่ามาก ความดังของเสียงก็มาก การวัดค่าความแรงของคลื่นเสียงที่สะท้อนกลับมาผ่านตัวกลางด้วย Digital Storage Oscilloscope[7] แสดงเป็นรูปคลื่นแอมพลิจูด



กราฟชาชน

1 = Peak amplitude ($\hat{U}$),

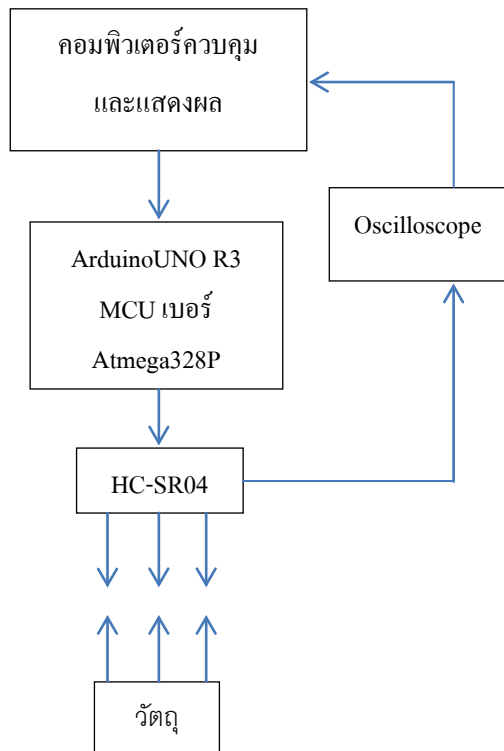
2 = Peak-to-peak amplitude ($2\hat{U}$),

3 = RMS amplitude ($\hat{U}/\sqrt{2}$),

รูปที่ 4 แสดงรูปแอมพลิจูด

3. ขั้นตอนและผลการทดลอง

การทดลองคือการยิงคลื่นความถี่อัลตราโซนิกที่ได้ขนาด 40 kHz ที่ระยะ 15 cm ไปยังโลหะ 8 ชนิด ได้แก่ เหล็ก ทองแดง ทองเหลือง อะลูมิเนียม เหล็กชิทไฟล์ สเตนเลส เหล็กชุบกัลวาไนส์ อะลูมิเนียมขัดเงา จากนั้นวัดค่าความแรงของสัญญาณเสียงที่สะท้อนกลับ



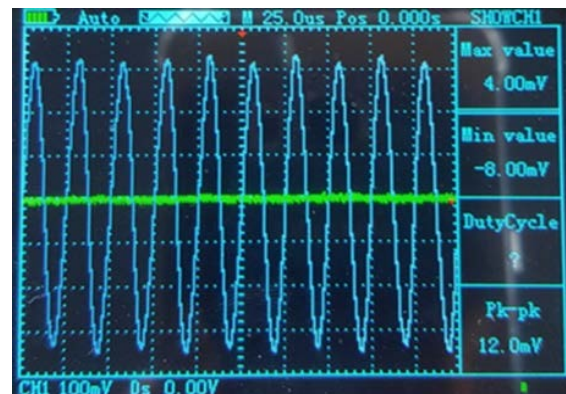
รูปที่ 5 บล็อกไดอะแกรม (Block Diagram) ของระบบ



รูปที่ 6 แผ่นโลหะ 8 ชนิดที่นำมาใช้ในการทดสอบได้แก่ ทองแดง ทองเหลือง อะลูมิเนียม เหล็กชุบกัลวาไนส์ อะลูมิเนียมขัดเงา สเตนเลส เหล็กชิทไฟล์และเหล็ก



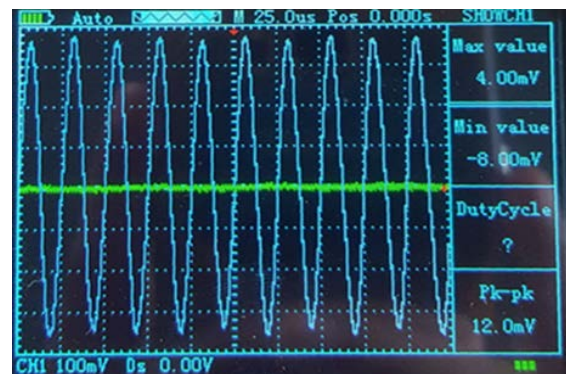
รูปที่ 7 คลื่นความถี่สะท้อนที่ได้ของอะลูมิเนียมขัดเงา



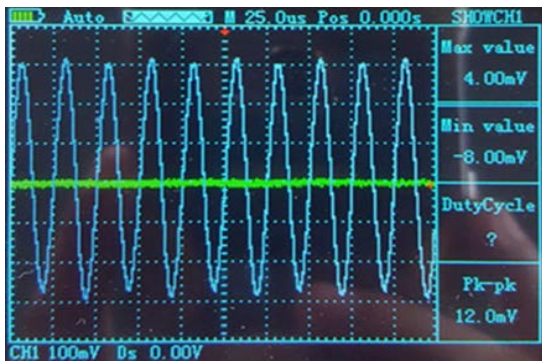
รูปที่ 8 คลื่นความถี่สะท้อนที่ได้ของเหล็กชุบกัลวาไนส์



รูปที่ 9 คลื่นความถี่สะท้อนที่ได้ของสเตนเลส



รูปที่ 10 คลื่นความถี่สะท้อนที่ได้ของทองแดง



รูปที่ 11 คลื่นความถี่สะท้อนที่ได้ของเหล็ก



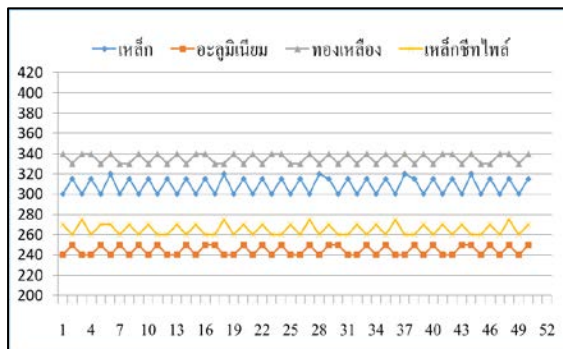
รูปที่ 13 คลื่นความถี่สะท้อนที่ได้ของอะลูมิเนียม



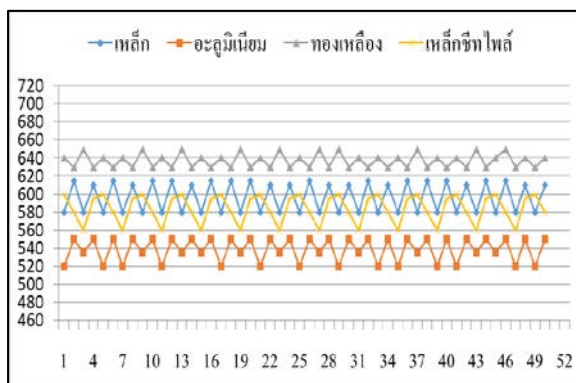
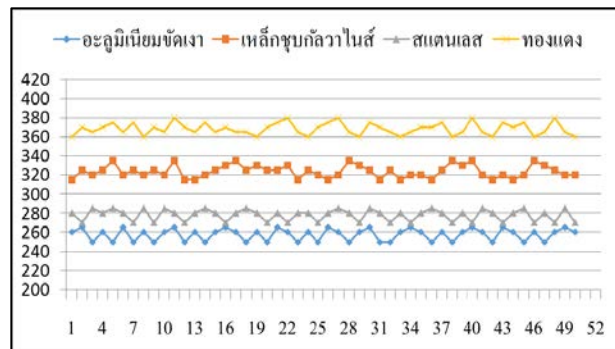
รูปที่ 12 คลื่นความถี่สะท้อนที่ได้ของทองเหลือง



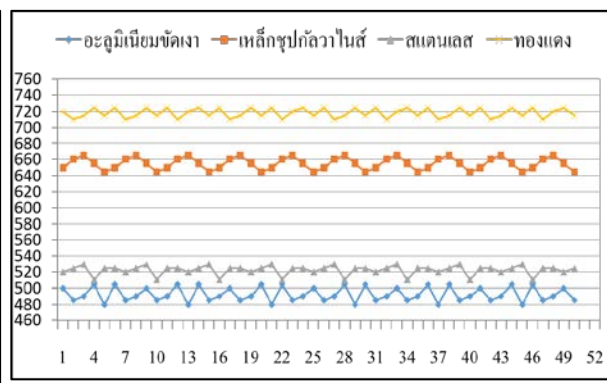
รูปที่ 14 คลื่นความถี่สะท้อนที่ได้ของเหล็กชุบไทล์

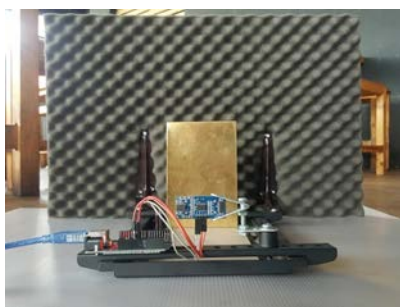


รูปที่ 15 กราฟแสดงแอมพลิจูดที่ได้ (amplitude) แกน x แสดงค่าแอมพลิจูด(mV) แกน y แสดงครั้งที่วัด



รูปที่ 16 กราฟแสดงแอมพลิจูดแบบพีคทูพีคที่ได้ (Peak-to-peak amplitude) แกน x แสดงค่าแอมพลิจูด(mV) แกน y แสดงครั้งที่วัด





รูปที่ 17 แสดงการทดลอง

จากการทดลองทดสอบด้วยโลหะ 8 ชนิดที่มีขนาดเท่ากันคือ กว้าง 10 cm ยาว 15 cm ความหนาที่ 2 mm โดยอาศัยกฎของการสะท้อนของคลื่นเสียงคือ คลื่นเสียงซึ่งเคลื่อนที่จากตัวกลางที่มีความหนาแน่นน้อยคืออากาศไปสู่ตัวกลางที่มีความหนาแน่นมากคือโลหะ จะเกิดการสะท้อนโดยคลื่นสะท้อนจะมีเฟสเปลี่ยนไป 180° ที่ระยะทางและเวลาเท่าเดิม จากนั้นทำการวัดค่าความแรงของคลื่นที่สะท้อนกลับผ่านโลหะที่มีความหนาแน่นและโครงสร้างที่ต่างกัน โดยผลที่ได้คือ 1.ทองแดง 2.ทองเหลือง 3.เหล็กชุบกัลวาไนส์ 4.เหล็ก 5.สแตนเลส 6.เหล็กซีทีพี 7.อะลูมิเนียมขัดเงา 8.อะลูมิเนียม ที่มีความแรงของคลื่นสะท้อนกลับแอมพลิจูดเฉลี่ยที่ 368.4, 335.2, 323.6, 308.6, 277.8, 265.1, 257.5, 244.6 mV ตามลำดับ

ชนิดของโลหะ	แอมพลิจูด (amplitude)		แอมพลิจูดแบบพีคทูพีค (Peak-to-peak amplitude)	
	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย
1.เหล็ก	320	308.3	615	596.4
2.อะลูมิเนียม	250	244.6	550	538.3
3.ทองเหลือง	340	335.2	650	637.2
4.เหล็กซีทีพี	275	265.1	600	584
5.อะลูมิเนียมขัดเงา	265	257.5	505	492.5
6.เหล็กชุบกัลวาไนส์	335	323.6	665	655
7.สแตนเลส	285	277.8	530	522.5
8.ทองแดง	380	368.4	725	718.3

รูปที่ 18 แสดงผลการวัดค่าแอมพลิจูดและค่าเฉลี่ย ของโลหะ 8 ชนิดที่ได้จากการทดลอง

แสดงได้ว่าค่าของแอมพลิจูดมากเท่าไร ความแรงของคลื่นเสียงที่สะท้อนกลับออกมาผ่านวัตถุนั้นยิ่งมากด้วย และเมื่อนำค่าผลการทดลองที่ได้ไปเปรียบเทียบกับค่าความหนาแน่นของโลหะสสารชนิดต่างๆคือ ทองแดง ทองเหลือง เหล็ก อะลูมิเนียม มีความหนาแน่น 8.9×10^3 , 8.6×10^3 , 7.86×10^3 , 2.70×10^3 kg/m³ ตามลำดับทำให้สามารถสรุปได้ว่าค่าความแรงของคลื่นสะท้อนแปรผันตามกับความหนาแน่นของโลหะนั้นด้วย

4. สรุปผลการทดลอง

บทความนี้ได้นำเสนองานวิจัยที่สามารถออกแบบเครื่องคัดแยกโลหะโดยใช้คลื่นอัลตราโซนิคพบว่าสามารถคัดแยกโลหะต่างชนิดกันได้ จากการทดลองโลหะทั้งหมด 8 ชนิดโดยใช้วิธีการหาค่าจากความแรงของคลื่นสะท้อนกลับที่ผ่านตัวกลางโลหะนั้น ความแรงของสัญญาณยิ่งมาก แอมพลิจูดยิ่งสูง และเมื่อนำค่าไปเปรียบเทียบกับค่าความหนาแน่นเฉพาะของโลหะนั้น ค่าความแรงของคลื่นที่สะท้อนแปรผันตามค่าความหนาแน่นของชนิดของโลหะ และเครื่องคัดแยกโลหะนี้มีขนาดเล็กใช้งานได้สะดวกมีราคาต้นทุนต่ำใช้งานได้จริงในภาคอุตสาหกรรม ซึ่งตรงตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัยที่ได้ร่วมมือกับบริษัทผลิตเหล็กเป็นการทดสอบที่ไม่มีผลกระทบหรือเกิดความเสียหายแก่วัตถุและให้ผลที่แม่นยำถูกต้องกว่าการใช้แรงงานคน ยังเป็นการลดต้นทุนการผลิตในเชิงอุตสาหกรรมลดค่าใช้จ่ายจากแรงงานคน และป้องกันอันตรายทางอ้อมที่อาจจะเกิดขึ้นกับมนุษย์ เครื่องคัดแยกโลหะโดยใช้คลื่นอัลตราโซนิคนี้มีขนาดเล็กมีน้ำหนักเบา ง่ายต่อการใช้งานและให้ผลที่แม่นยำใช้เวลาน้อยในการประมวลผล

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ บริษัท เอ.ไอ. เทคโนโลยี
อินดัสทรี จำกัด และโครงการพัฒนานักวิจัยและงานวิจัย
เพื่ออุตสาหกรรม-พวอ. ที่ให้ความอนุเคราะห์งบประมาณและอุปกรณ์ต่างในการทำงานวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] J. Zhao, K.Wang and Y. Guo, "Acoustic emission signals classification based on support vector machine," 2nd International Conference on Computer Engineering and Technology, Vol.6, pp.300-304, 2010.
- [2] M.Barbu, E.Kaminsky and R.E.Trahan, "Acoustic Seabed Classification using Fractional Fourier Transform and Time-frequency Transform Techniques," OCEANS 2006, pp.1-6, 2006.
- [3] K.Lee, "Effective Approaches to Extract Features and Classify Echoes in long Ultrasound Signals from Metal Shafts," International Workshop on Education Technology and Training & 2008 International Workshop on Geoscience and Remote Sensing, Vol.1, pp.728-733, 2008.
- [4] V.Sankaran, "Acoustic Resonance Testing Using Transfrom Decomposition and Support Vector Machines for efficient and accurate Detection of Defect in Forged Components," 18th World Conference on Nondestructive Testing, April 16-20, 2012.
- [5] E.Coffey, "Acoustic Resonance Testing," 2012 Future of Instrumentation International Workshop Proceedings, pp.1-2, 2012.
- [6] Y.Zhang and Q.Wang, "Statistical analysis of resonance frequency error for ultrasonic welding machine transducer," International Technology and Innovation Conference, pp.50-55, 2006.

- [7] Y.Musha, M.Hara, H.Asano and H. Kuwano, "Oscillator based surface acoustic wave gyroscopes," IEEE 11th Annual International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems , pp.557-560, 2016.

การศึกษารูปแบบ และขนาดทางออกของเตาเผาแบบไซโคลน

โดยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

The Study of Characteristic and Outlet Dimension of Cyclone Combustion Chamber Using Computational Fluid Dynamics

มานิตา ผสมประโยชน์ เกียรติฟ้า ตั้งใจจิต

ศูนย์วิจัยและพัฒนาพลังงานทดแทน ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นการศึกษารูปแบบ และขนาดทางออกของเตาเผาแบบไซโคลนสำหรับเผาไหม้เชื้อเพลิงกากส่าเหล้าในห้องปฏิบัติการ เพื่อหารูปแบบเตาเผาแบบไซโคลนที่มีซี่เกาปัดน้อยที่สุด โดยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD) ด้วยโปรแกรม ANSYS Fluent version 15.0 แบบจำลองเตาเผาแบบไซโคลนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 เซนติเมตร ความกว้างของห้องเผาไหม้ 100 เซนติเมตร พบว่าแบบจำลองเตาเผาแบบไซโคลนที่มีทรงกระบอกกลวงสำหรับดักซี่เกาปัดมีอุณหภูมิเฉลี่ยภายในห้องเผาไหม้สูงกว่า แต่จำนวนซี่เกาปัดที่หลุดออกจากเตาเผามากกว่าแบบจำลองเตาเผาแบบไซโคลนที่มีกรวยตัดสำหรับดักซี่เกาปัด ดังนั้นเตาเผาแบบไซโคลนที่เหมาะสมสำหรับเผาไหม้เชื้อเพลิงกากส่าเหล้าที่สุดคือเตาเผาแบบไซโคลนที่มีกรวยตัดสำหรับดักซี่เกาปัดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกรวยตัด 8-12 เซนติเมตร และยื่นเข้าสู่ห้องเผาไหม้ 5-10 เซนติเมตร

คำสำคัญ : เตาเผาแบบไซโคลน, เชื้อเพลิงกากส่าเหล้า, วิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

Abstract

This article studies characteristic and appropriate outlet diameter of cyclone combustion chamber for the slop fuel in the laboratory to find cyclone combustion model with the least fly ash, using CFD of the ANSYS Fluent v.15.0. Cyclone combustion model is 30 cm in diameter and 100 cm in width of combustion chamber. The results showed that average temperature in combustion chamber and the amount of fly ash in cyclone chamber model with hollow cylinder for trap fly ash is higher than cyclone chamber model with cone cut for trap fly ash. Therefore, the cyclone chamber model with cone cut for trap fly ash suitable for burning slop fuel is diameter 8-12 cm and extends into cyclone chamber 5-10 cm.

Keywords : Cyclone combustion chamber, Slop fuel, Computational Fluid Dynamics (CFD)

1. บทนำ

ปัจจุบันประเทศไทยมีการเจริญทางอุตสาหกรรมในอัตราสูง ก่อให้เกิดแนวโน้มปริมาณของเสียที่เกิดจากโรงงานอุตสาหกรรมในแต่ละปีมากขึ้น โดยเฉพาะอุตสาหกรรมเครื่องดัดแอลกอฮอล์ที่มีการใช้กากน้ำตาลเป็นวัตถุดิบ มีน้ำเสียหลักจากกระบวนการผลิตคือน้ำกากส่าเหล้า ซึ่งไม่สามารถปล่อยทิ้งสู่แหล่งน้ำโดยตรง ต้องได้รับการบำบัดก่อน เช่นระบบบ่อบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจน, ระบบเตาเผา ปัจจุบันการบำบัดน้ำกากส่าเหล้า ระบบเตาเผาจะใช้เตาเผาแบบโดยตรง ซึ่งหลังจากการเผาไหม้จะเกิดขี้เถ้าปลิวจำนวนมากเป็นภาระค่าใช้จ่ายในการจัดการ เพื่อลดของเสียจากกระบวนการผลิต และเพิ่มความสามารถในการนำไปใช้ประโยชน์ จึงทำการศึกษา นำกากส่าเหล้ามาพัฒนาเป็นเชื้อเพลิงทดแทนหรือลดปริมาณเชื้อเพลิงหลักในหม้อไอน้ำ และลดปริมาณขี้เถ้าปลิว

จากการศึกษาพบว่าควรเลือกเตาเผาแบบไซโคลนสำหรับเผาไหม้เชื้อเพลิงกากส่าเหล้า เนื่องจากอากาศจะเข้าสู่เตาเผาในแนวสัมผัสกับผนังของห้องเผาไหม้ ทำให้เชื้อเพลิงเกิดการเคลื่อนที่แบบปั่นป่วนในห้องเผาไหม้ เพิ่มเวลาของเชื้อเพลิงและอากาศให้อยู่ในเตาได้มากขึ้น [1] ห้องเผาไหม้แบบไซโคลนสามารถทำอุณหภูมิภายในเตาเผาสูงถึง 1650°C ทำให้ขี้เถ้าหลอมละลายกลายเป็นขี้เถ้าเหลว 30-50% และเหลือขี้เถ้าปนออกมากับแก๊สร้อนหรือขี้เถ้าปลิว เพียง 70-50% ขี้เถ้าเหลวสามารถปล่อยออกทางด้านล่างของเตาเผาได้ [2] การเพิ่มอากาศในการเผาไหม้จะทำให้อุณหภูมิการเผาไหม้ภายในเตาเผาลดลง เมื่อเทียบกับค่าใช้จ่ายในการเพิ่มปริมาณอากาศในการเผาไหม้ ควรเพิ่มอากาศเป็น 130-140% ของอากาศตามทฤษฎี [3]-[4] การผสมของเชื้อเพลิงที่เหมาะสมและระยะเวลาการเผาไหม้ที่เพียงพอสามารถทำให้เกิดการเผาไหม้ที่มีประสิทธิภาพ ปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนในขี้เถ้าและขี้เถ้าปลิวน้อย [5]

2. วัตถุประสงค์การวิจัย

ศึกษารูปแบบ และขนาดทางออกของเตาเผาแบบไซโคลนสำหรับเผาไหม้เชื้อเพลิงกากส่าเหล้า เพื่อหารูปแบบทางออกของเตาเผาแบบไซโคลนสำหรับเผาไหม้เชื้อเพลิงกากส่าเหล้าที่มีขี้เถ้าปลิวออกจากเตาเผาให้น้อยที่สุด โดยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD)

3. วิธีการวิจัย

3.1 การสร้างแบบจำลองเตาเผาแบบไซโคลน

3.1.1 แบบจำลองเตาเผาแบบไซโคลนที่มี

ทรงกระบอกกลวงสำหรับดักขี้เถ้าปลิว

สร้างแบบจำลองเตาเผาแบบไซโคลนที่มีทรงกระบอกกลวงสำหรับดักขี้เถ้าปลิวดังรูปที่ 1 สำหรับเผาไหม้เชื้อเพลิงกากส่าเหล้า ทำการเปลี่ยนแปลงขนาดทรงกระบอกกลวงสำหรับดักขี้เถ้าปลิวของเตาเผาไซโคลนดังตารางที่ 1

3.1.2 การสร้างแบบจำลองเตาเผาแบบไซโคลนที่มี

กรวยตัดสำหรับดักขี้เถ้าปลิว

สร้างแบบจำลองเตาเผาแบบไซโคลนที่มีกรวยตัดสำหรับดักขี้เถ้าปลิวดังรูปที่ 2 สำหรับเผาไหม้เชื้อเพลิงกากส่าเหล้า ทำการเปลี่ยนแปลงขนาดกรวยตัดสำหรับดักขี้เถ้าปลิวของเตาเผาไซโคลนดังตารางที่ 2

3.2 เงื่อนไขการวิเคราะห์แบบจำลองเตาเผาแบบไซโคลน

แบบจำลองเตาเผาแบบไซโคลนได้ทำการศึกษาจำนวนเอลิเมนต์ที่เหมาะสม ได้แก่ 1.5, 1.8, 2.0, 2.3 ล้านเอลิเมนต์ พบว่า 2.0 ล้านเอลิเมนต์เหมาะสมที่สุด ทำการเผาไหม้แบบไม่มีการถ่ายเทความร้อนสู่สิ่งแวดล้อม โดย

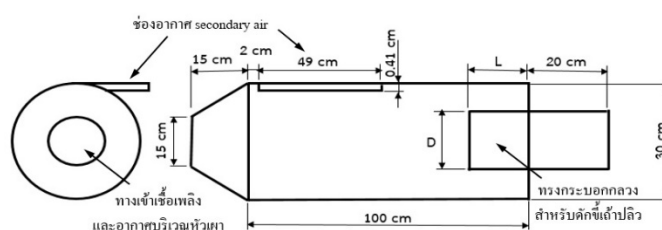
(1) เชื้อเพลิงกากส่าเหล้า 3 กรัม/วินาที รวมกับน้ำมันดีเซล 1 กรัม/วินาที ที่มีส่วนประกอบดังตารางที่ 3 ค่า Air fuel ratio เท่ากับ 5.4

(2) ปริมาณอากาศเข้าสู่ห้องเผาไหม้ 100% ของอากาศตามทฤษฎี อากาศเข้าสู่ห้องเผาไหม้แบ่งเป็น 2 ส่วน

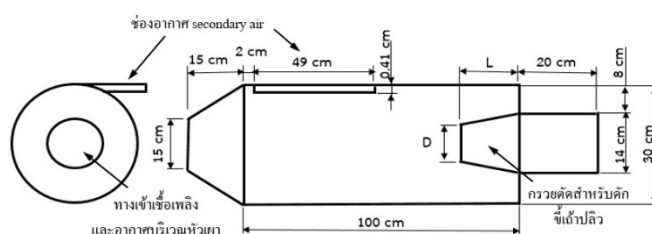
คืออากาศเข้าสู่ห้องเผาไหม้บริเวณหัวเผา 2.32 กรัม/วินาที
และอากาศเข้าสู่ห้องเผาไหม้บริเวณ secondary air 19.28
กรัม/วินาที ความเร็วอากาศ secondary air 8.2 เมตร/วินาที

(3) อุณหภูมิเชื้อเพลิงกากส่าแห้งให้มีอุณหภูมิ 90°C
ก่อนเข้าสู่หัวเผา และอากาศก่อนเข้าห้องเผาไหม้บริเวณ
Secondary Air ให้มีอุณหภูมิ 250°C

(4) ขี้เถ้าในเชื้อเพลิงกากส่าแห้งมีขนาดอนุภาค
คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กที่สุด, ใหญ่ที่สุด และเฉลี่ยที่
2.27, 116.21 และ 29.74 ไมโครเมตร ตามลำดับ



รูปที่ 1 แสดงขนาดแบบจำลองเตาเผาแบบไซโคลนที่มีทรงกระบอกกลางสำหรับดักขี้เถ้าปลิว



รูปที่ 2 แสดงขนาดแบบจำลองเตาเผาแบบไซโคลนที่มีกรวยดักสำหรับดักขี้เถ้าปลิว

ตารางที่ 1 แสดงตัวแปรที่ใช้วิเคราะห์แบบจำลองเตาเผาแบบไซโคลนที่มีทรงกระบอกกลางสำหรับดักขี้เถ้าปลิว

model	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
D (cm)	18	18	18	18	18	18	16	16	16	16	16	16	14	14	14	14	14	14
L (cm)	0	5	10	15	20	25	0	5	10	15	20	25	0	5	10	15	20	25

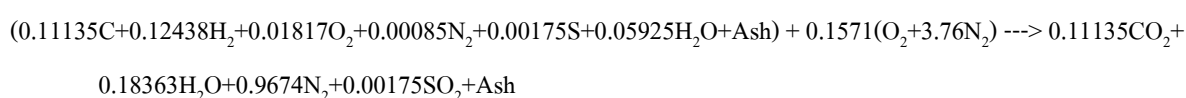
ตารางที่ 2 แสดงตัวแปรที่ใช้วิเคราะห์แบบจำลองเตาเผาแบบไซโคลนที่มีกรวยดักสำหรับดักขี้เถ้าปลิว

model	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15			
D (cm)	12	12	12	12	12	10	10	10	10	10	8	8	8	8	8			
L (cm)	5	10	15	20	25	5	10	15	20	25	5	10	15	20	25			

ตารางที่ 3 แสดงส่วนประกอบของเชื้อเพลิงกากส่าแห้งและน้ำมันดีเซล

		C	H ₂	O ₂	N ₂	S	H ₂ O	Ash
กากของเสียแบบเหลว	% wt	15.874	3.925	19.380	0.7927	1.566	35.550	22.912
น้ำมันดีเซล	% wt	86	13.1	0	0	0.9	0	-

สมการการเผาไหม้เชื้อเพลิงกากส่าแห้ง 3 g/s รวมกับน้ำมันดีเซล 1 g/s



3.3 การวิเคราะห์โดยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิง

คำนวณ (CFD)

การวิเคราะห์โดยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD) โดยโปรแกรม ANSYS Fluent v. 15.0 การทำนายการเผาไหม้จำเป็นต้องใช้สมการพลังงาน, สมการการไหลแบบปั่นป่วน สมการแบบจำลอง k- ϵ , สมการการเผาไหม้ สมการแบบจำลอง non-premixed combustion [6] และสมการ swirl no. [7] เป็นค่าเปรียบเทียบความรุนแรงของการเกิดการไหลหมุนเหวี่ยงแบบไซโคลน การไหลที่มีการหมุนเหวี่ยงแบบไซโคลนค่า swirl no. > 0.5 ดังสมการนี้

$$S = \frac{\int r \omega \vec{v} \cdot d\vec{A}}{\bar{R} \int u \vec{v} \cdot d\vec{A}} \quad (1)$$

$$\bar{R} = \frac{A}{P} \quad (2)$$

S = swirl no., $\bar{R}$ = hydraulic radius (m), A = cross section area of flow (m²), P = wetted perimeter (m)

4. ผลการวิจัย

4.1 การกระจายตัวของอนุภาคน้ำมันในเตาเผา

แบบจำลอง A1-A18 และแบบจำลอง B1-B15 การกระจายตัวของอนุภาคน้ำมันสูงมีลักษณะคล้ายกันทุกแบบจำลอง ดังตัวอย่างแบบจำลอง A9 รูปที่ 3(ก) และ B8 รูปที่ 5(ก) การกระจายตัวของอนุภาคน้ำมันสูงเกิดขึ้นมากบริเวณส่วนท้ายของห้องเผาไหม้ แนวโน้มอนุภาคน้ำมันที่อยู่ในห้องเผาไหม้ของแบบจำลอง A1-A18 จะลดลงตามความยาวของทรงกระบอกกลางที่ขึ้นเข้าสู่ห้องเผาไหม้ และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของทรงกระบอกกลางตามลำดับ เนื่องจากเมื่อเตาเผาแบบไซโคลนมีทรงกระบอกกลางขึ้นเข้าสู่ห้องเผาไหม้มากขึ้น และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของทรงกระบอกกลางและทางออกของห้องเผาไหม้ลดลง ทำให้พื้นที่สำหรับการเผาไหม้ลดลง อนุภาคน้ำมันที่อยู่ในห้องเผาไหม้จึงลดลง ดังรูปที่ 4(ก) ส่วนแบบจำลอง B1-B15 จะลดลงตามความยาวของกรวยตัดที่ขึ้นเข้าสู่ห้องเผาไหม้ตามลำดับ เนื่องจากเมื่อเตาเผา

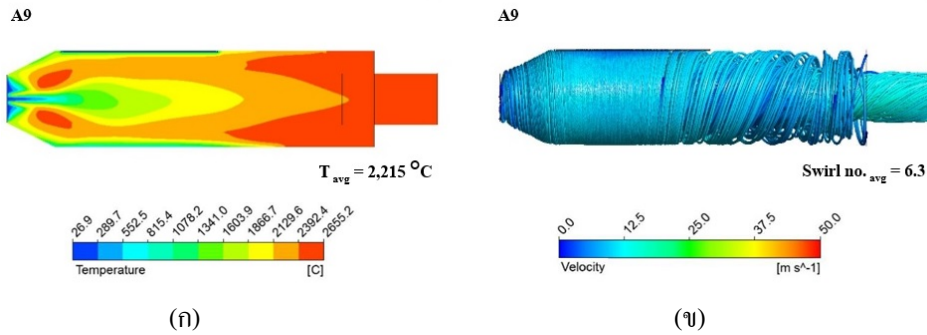
แบบไซโคลนมีกรวยตัดขึ้นเข้าสู่ห้องเผาไหม้มากขึ้น ทำให้พื้นที่สำหรับการเผาไหม้ลดลง อนุภาคน้ำมันที่อยู่ในห้องเผาไหม้จึงลดลง ดังรูปที่ 6(ก)

4.2 ลักษณะการไหลภายในเตาเผา และค่า swirl number

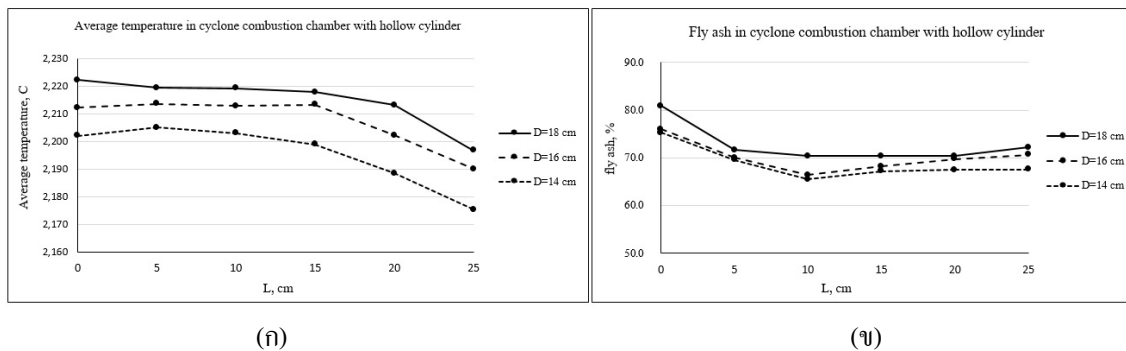
แบบจำลอง A1-A18 และแบบจำลอง B1-B15 ลักษณะการไหลภายในเตาเผาลักษณะคล้ายกันทุกแบบจำลอง ดังตัวอย่างแบบจำลอง A9 รูปที่ 3(ข) และแบบจำลอง B8 รูปที่ 5(ข) มีการไหลหมุนเหวี่ยงแบบไซโคลน แบบจำลอง A1-A18 มีค่า swirl no. เฉลี่ย 5.8-6.8 ส่วนแบบจำลอง B1-B15 มีค่า swirl no. เฉลี่ย 7.4-8.1 แบบจำลองเตาเผาที่มีรูปแบบคล้ายคลึงกับ cyclone separator ซึ่งมีค่า swirl no. ประมาณ 3-7 [8]-[10] แต่แบบจำลอง B1-B15 มีค่า swirl no. มากกว่าเนื่องจากเกิดการไหลหมุนเหวี่ยงแบบไซโคลนรุนแรงมากกว่า

4.3 ผลการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของอนุภาคน้ำมันโดยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD)

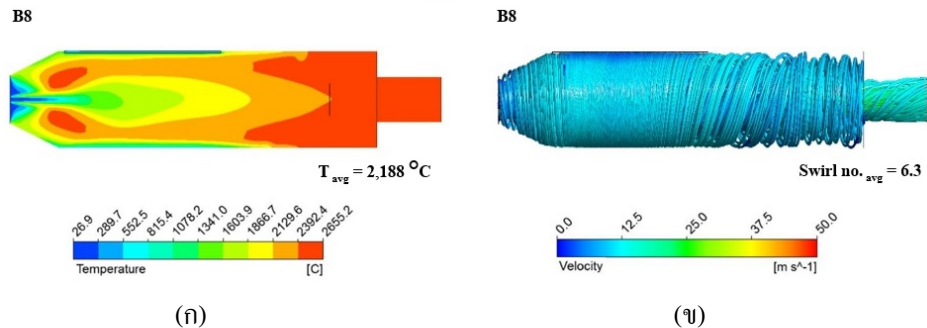
การเคลื่อนที่ของอนุภาคน้ำมันที่อยู่ในเตาเผาของแบบจำลอง A1-A18 และแบบจำลอง B1-B15 มีจำนวนอนุภาคน้ำมันที่หลุดออกจากเตาเผาประมาณ 73% และ 62% ตามลำดับ แนวโน้มจำนวนอนุภาคน้ำมันที่หลุดของแบบจำลอง A1-A18 ลดลงตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของทรงกระบอกกลางตามลำดับ เนื่องจากเมื่อเตาเผาแบบไซโคลนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของทรงกระบอกกลางและทางออกของห้องเผาไหม้ลดลง ทำให้มีพื้นที่สำหรับการหมุนเหวี่ยงอนุภาคน้ำมันให้ถูกสลัดติดกับผนังเตามากขึ้น และที่ความเป็นไปได้ที่จะเกิดการหลอมละลายของไขมันกลายเป็นไขมันเหลวภายในเตาเผา จำนวนอนุภาคน้ำมันที่หลุดจึงลดลงดังรูปที่ 4 (ข) ส่วนแบบจำลอง B1-B15 จะเพิ่มขึ้นตามความยาวของกรวยตัดที่ขึ้นเข้าสู่ห้องเผาไหม้ตามลำดับ เนื่องจากเมื่อเตาเผาแบบไซโคลนมีกรวยตัดที่ขึ้นเข้าสู่ห้องเผาไหม้มากขึ้น ทำให้อนุภาคน้ำมันถูกหมุนเหวี่ยงสลัดติดกับผนังเตาได้ไม่ดี จำนวนอนุภาคน้ำมันที่หลุดจึงเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 6(ข)



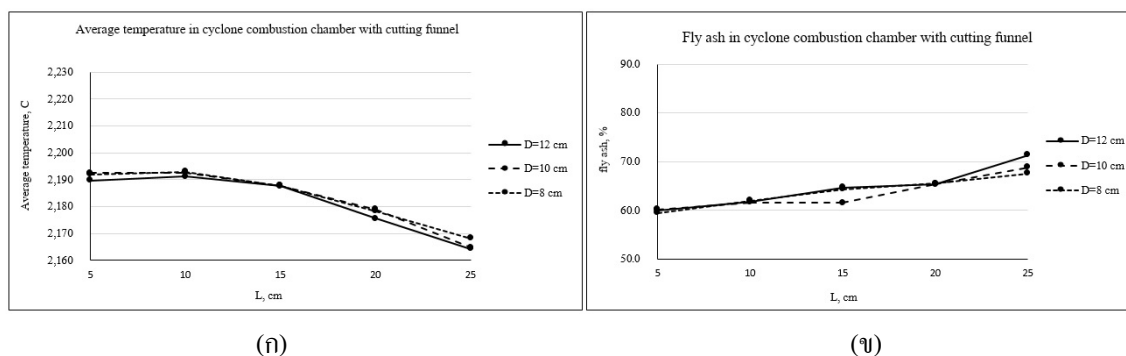
รูปที่ 3 แสดงตัวอย่างแบบจำลอง A9 (ก) การกระจายตัวของอุณหภูมิ (ข) ลักษณะการไหล และค่า swirl no. ของแบบจำลองเตาเผาแบบไซโคลนที่มีทรงกระบอกกลวงสำหรับดักขี้เถ้าปลิว



รูปที่ 4 แสดง (ก) กราฟแสดงอุณหภูมิเฉลี่ยภายในห้องเผาไหม้ (ข) กราฟแสดงจำนวนขี้เถ้าปลิว ของแบบจำลองเตาเผาแบบไซโคลนที่มีทรงกระบอกกลวงสำหรับดักขี้เถ้าปลิว



รูปที่ 5 แสดงตัวอย่างแบบจำลอง B8 (ก) การกระจายตัวของอุณหภูมิ (ข) ลักษณะการไหล และค่า swirl no. ของแบบจำลองเตาเผาแบบไซโคลนที่มีกรวยตัดสำหรับดักขี้เถ้าปลิว



รูปที่ 6 แสดง (ก) กราฟแสดงอุณหภูมิเฉลี่ยภายในห้องเผาไหม้ (ข) กราฟแสดงจำนวนขี้เถ้าปลิว ของแบบจำลองเตาเผาแบบไซโคลนที่มีกรวยตัดสำหรับดักขี้เถ้าปลิว

5. อภิปรายและสรุปผลการวิจัย

จากการสร้างแบบจำลองเตาเผาแบบไซโคลน ทำนายการเผาไหม้เชื้อเพลิงกากส่าเหล้าที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 เซนติเมตร ความกว้างของห้องเผาไหม้ 100 เซนติเมตร พบว่าแบบจำลองเตาเผาแบบไซโคลนที่มีทรงกระบอกกลวงสำหรับดักจี๊ด่าปลิวมีอุณหภูมิเฉลี่ยภายในห้องเผาไหม้สูงกว่า แต่จำนวนจี๊ด่าปลิวที่หลุดออกจากเตาเผา มากกว่าแบบจำลองเตาเผาแบบไซโคลนที่มีกรวยตัดสำหรับดักจี๊ด่าปลิว สำหรับการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงกากส่าเหล้าเน้นในส่วนของการดักจี๊ด่าปลิว จึงสามารถสรุปได้ว่าเตาเผาแบบไซโคลนที่มีกรวยตัดสำหรับดักจี๊ด่าปลิวเหมาะสมสำหรับเผาไหม้เชื้อเพลิงกากส่าเหล้าที่สุด ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกรวยตัด 8-12 เซนติเมตร และยื่นเข้าสู่ห้องเผาไหม้ 5-10 เซนติเมตร เนื่องจากอุณหภูมิเฉลี่ยภายในห้องเผาไหม้สูง และจำนวนจี๊ด่าปลิวที่หลุดออกจากเตาเผาน้อย

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ บริษัท ไทยเบฟเวอเรจ เอ็นเนอร์ยี่ จำกัด ที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัยและกากส่าเหล้า ศูนย์วิจัยและพัฒนาพลังงานทดแทน และภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่ให้ความอนุเคราะห์ห้องปฏิบัติการ และคอมพิวเตอร์ประสิทธิภาพสูง

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] S. Pirker et al., "Application of a hybrid Lattice Boltzmann-Finite Volume turbulence model to cyclone short-cut flow," *Power Technology*, Vol.235, pp.572-580, Feb., 2013.
- [2] Christof Lanzerstorfer, "Cyclone fly ash from a grate-fired biomass combustion plant: Dependence of the concentration of various

components on the particle size," *Fuel Processing Technology*, Vol.131, pp.382-388, Mar., 2015.

- [3] S.Y. Luo* et al., "Experimental study on oxygen-enriched combustion of biomass micro fuel," *Energy*, Vol.34, pp.1880-1884, Nov., 2009.
- [4] Piotr Warzecha and Andrzej Boguslawski, "Simulations of pulverized coal oxy-combustion in swirl burner using RANS and LES methods," *Fuel Processing Technology*, Vol.119, pp.130-135, Mar., 2014.
- [5] Luo Siyi et al., "Experimental study on combustion of biomass micron fuel (BMF) in cyclone furnace," *Energy Conversion and Management*, Vol.51, pp.2098-2102, Nov., 2010.
- [6] Piotr Warzecha and Andrzej Boguslawski, "LES and RANS modeling of pulverized coal combustion in swirl burner for air and oxy-combustion technologies," *Energy*, Vol.66, pp.732-743, Mar., 2014.
- [7] Ansys fluent theory guide, version 15.0, Canonsburg, Reading, PA, 2014.
- [8] David Winfield et al., "Performance comparison of a single and triple tangential gas separation cyclone: A CFD study," *Power Technology*, Vol.235, pp.520-531, Feb., 2012.
- [9] Ferit Ficici, Vedat Ari and Murat Kapsiz, "The effects of vortex finder on the pressure drop in cyclone separators," *International Journal of the Physical Sciences*, Vol.5, pp.804-813, Jul. 2010.
- [10] Ferit Ficici and Vedat Ari, "Optimization of the preheater cyclone separators used in the cement industry," *International Journal of Green Energy*, Vol.10, pp.12-27, Mar., 2013.

การวิเคราะห์ข้อมูลพลังงานลมในเขตพื้นที่จังหวัดหนองคาย

Wind Energy Data Analysis in Nong Khai, Thailand

สุกชัย พลน้ำเที่ยง¹ เกียรติฟ้า ตั้งใจจิต^{2*}

^{1,2}

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

*

ศูนย์วิจัยและพัฒนาพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยขอนแก่น (AERD-KKU)

* Corresponding author e-mail: Kiatfa@kku.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาศักยภาพพลังงานลมเฉพาะพื้นที่ในบริเวณสถานีวัดความเร็วลมภายในมหาวิทยาลัยขอนแก่น วิทยาเขตจังหวัดหนองคาย โดยเสาวัดลมที่มีความสูง 120 เมตรจากระดับพื้นดิน จากนั้นทำการติดตั้งอุปกรณ์วัดความเร็วและทิศทางของลมที่ระดับความสูง 60, 90 และ 120 เมตรและยังมีการติดตั้งอุปกรณ์วัดความชื้น ความดัน และอุณหภูมิที่เสาวัดลมอีกด้วย ข้อมูลลมทุกๆ 10 นาทีจะถูกบันทึกที่กล่องบันทึกข้อมูล (Data Logger) เป็นเวลาติดต่อกัน 4 ปี คือ เริ่มตั้งแต่ เดือนมกราคม 2012 ถึง เดือนธันวาคม 2015 ข้อมูลลมที่ได้จะนำมาวิเคราะห์ในเชิงสถิติเป็น รายปี รายเดือน และรายวัน โดยใช้การกระจายตัวแบบไวบูลล์ (Weibull Distribution Function) ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าความเร็วลมเฉลี่ยทั้งปีที่ระดับความสูง 60, 90 และ 120 เมตรเหนือพื้นดิน คือ 2.84, 3.41 และ 3.96 เมตรต่อวินาที ตามลำดับ ทิศทางลมส่วนใหญ่พัดมาจากทางทิศตะวันออกและตะวันออกเฉียงเหนือ ในช่วงเวลากลางคืนความเร็วลมจะสูงกว่าในช่วงของเวลากลางวัน shape และ scale parameter เฉลี่ยที่ตำแหน่งนี้มีค่าอยู่ในช่วง 1.67 ถึง 1.82 และ 3.19 ถึง 4.43 เมตรต่อวินาที ตามลำดับ กำลังลม (Power Density, W/m^2) มีค่าตั้งแต่ 36, 55 และ 98 วัตต์ต่อตารางเมตรที่ความสูง 60, 90 และ 120 เมตรตามลำดับ ข้อมูลลมที่ได้จากการศึกษาในครั้งนี้ถือว่าเป็นความเร็วที่ค่อนข้างต่ำ ไม่เหมาะสมกับการติดตั้งกังหันลมขนาดใหญ่เพื่อการผลิตกระแสไฟฟ้าในเชิงพาณิชย์ แต่อาจจะนำไปประยุกต์ควบคู่กับการใช้พลังงานจากแสงอาทิตย์เพื่อใช้ในการดำเนินการเกษตร เช่น การทำกังหันลมขนาดเล็กเพื่อการสูบน้ำ เป็นต้น

คำสำคัญ: พลังงานลม, จังหวัดหนองคาย, ไวบูลล์ฟังก์ชัน

Abstract

In this paper, wind energy data of Nong Khai region was analyzed base on 10-min time interval recorded with 4-year data from January 2012 to December 2015, the wind mast station is located on area of Khon Kaen University (KKU) at Nong Khai campus. Wind speed and direction at height of 60, 90 and 120 meter above ground level (agl) were recorded. The result showed that annual mean wind speed of 2.84, 3.41 and 3.96 m/s at 60, 90 and 120 m agl were reported in this study and the majority of wind direction was East (E) and North-East (NE) direction. The annual Weibull shape and scale parameter were showed that 1.67 to 1.82 and 3.19 to 4.43 m/s, respectively. Wind Power Density in this area was 36, 55, 98 W/m^2 at height of 60, 90 and 120 m agl, respectively. The wind speed data from this study is quite low, therefore it is not suitable for grid connection but might be suitable for local application such as water pumping.

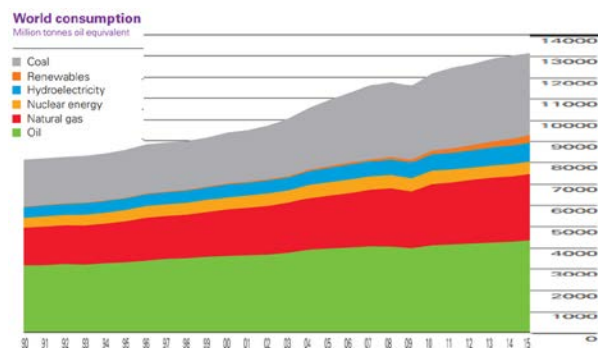
Keywords: Wind Energy, Nong Khai Province, Weibull Function

1. บทนำ

ในปัจจุบันนี้การใช้พลังงานในทุกประเทศทั่วโลกมีแนวโน้มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องดังรูปที่ 1 [1] อันเนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วของประชากรโลก โดยเฉพาะการนำเชื้อเพลิงจากฟอสซิล (Fossil) มาเป็นแหล่งของพลังงานซึ่งจะก่อให้เกิดมลพิษตามมาด้วย จึงทำให้แต่ละประเทศต่างก็พยายามค้นหาพลังงานทางเลือกอื่น เช่น พลังงานจากลม แสงอาทิตย์ และแหล่งพลังงานทางเลือกอื่นๆ เข้ามามีบทบาทเพื่อแทนที่การใช้พลังงานที่มาจากฟอสซิลเพื่อลดมลพิษและการนำเข้าของพลังงาน

พลังงานจากลมเป็นพลังงานสะอาดที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ ไม่มีต้นทุน ไม่มีวันหมด แต่การที่จะนำพลังงานจากลมมาใช้ประโยชน์ต้องใช้ต้นทุนในการผลิตค่อนข้างสูง เพราะฉะนั้นจึงจำเป็นต้องมีการศึกษาถึงความเป็นไปได้และต้องมีการเก็บรวบรวมข้อมูลลมที่ใช้เวลาต่อเนื่องหลายปีเพื่อให้แน่ใจว่าจะเกิดความคุ้มค่าในการลงทุนด้วย

สำหรับในต่างประเทศนั้น ประเทศจีนถือได้ว่าเป็นประเทศที่มีกำลังการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมมากที่สุดในโลก และรองลงมาคือประเทศสหรัฐอเมริกา โดยที่มีกำลังผลิตเท่ากับ 145,362 MW และ 74,471 MW ตามลำดับ เมื่อสิ้นปี 2015 [2]



รูปที่ 1 แนวโน้มการใช้พลังงานจากฟอสซิลของโลก

ในประเทศฮ่องกง Z.R. Shu และคณะ [3] ได้ทำการเก็บรวบรวมข้อมูลสถิติลมเป็นเวลา 6 ปี โดยใช้ฟังก์ชันไวบูลล์ (Weibull Function) จากสถานีวัดลมทั้งหมดจำนวน 4 สถานี ผลที่ได้คือ Scale parameter และ Shape parameter จะมีค่าอยู่ในช่วง 2.85 ถึง 10.19 และ 1.65 ถึง 1.99 ตามลำดับ ประเทศเกาหลีใต้ถือได้ว่าเป็นประเทศที่มีการศึกษาถึงเรื่องพลังงานลมด้วยเช่นกัน ความเร็วลมที่ Youngwang [4] เฉลี่ยอยู่ที่ 7.122 เมตรต่อวินาที ในประเทศบราซิล Laerte de Araujo Lima และคณะ [5] ได้มีการวัดความเร็วลมและพบว่ามีความเร็วลมรายปี 4.74 และ 5.38 เมตรต่อวินาที ที่ Paraiba ตามลำดับ

สำหรับในประเทศไทย การพัฒนาพลังงานลมได้เริ่มต้นจากการที่การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ) ได้ทำการติดตั้งกังหันลมขนาดใหญ่ตัวแรก ขนาด 150 kW ที่แหลมพรหมเทพ จังหวัดภูเก็ตในปี 1996 ซึ่งมีความเร็วลมเฉลี่ยรายปีประมาณ 5 เมตรต่อวินาที [6] ส่วนการติดตั้งกังหันลมในเชิงพาณิชย์แห่งแรกอยู่ที่ยอดเขาเขายะเอย่งเหนือเขื่อนลำนะทอง จังหวัดนครราชสีมา โดยการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ) ในปี 2009 ได้ทำการติดตั้งกังหันลมจำนวน 2 ตัว ขนาดตัวละ 1250 kW ซึ่งบริเวณนั้นมีความเร็วลมเฉลี่ยที่ 6.7 เมตรต่อวินาที [7]

ปัจจุบันกำลังการผลิตรวมของกระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้จากพลังงานลมของประเทศไทยอยู่ที่ 224.5 MW ในปี 2014 [8] และรัฐบาลได้ทำการตั้งเป้าหมายให้ได้ 3,002 MW ในปี พ.ศ. 2036 [9] ตามแผนนโยบายและพัฒนากำลังการผลิตของประเทศไทย

พื้นที่ในเขตภาคตะวันออกเฉียงเหนือตอนบนของประเทศไทยซึ่งเป็นพื้นที่ราบสูงและมีความเป็นไปได้ในการศึกษาวิจัยแหล่งพลังงานลมเฉพาะแหล่ง (Micro Sitting) เพื่อค้นหาพื้นที่ที่มีแหล่งลมดี และตอบสนองเป้าหมายทางด้านความมั่นคงทางด้านพลังงานของทางรัฐบาล ทางคณะวิจัยจึงได้ทำการคัดเลือกพื้นที่ในเขตมหาวิทยาลัยขอนแก่น วิทยาเขตจังหวัดหนองคายในการศึกษาครั้งนี้

2. ระเบียบวิธีในการวิจัย

2.1) สถานีวัดความเร็วลม

การคัดเลือกสถานที่มีขั้นตอนคือ การทบทวนความเร็วลมจากแผนที่ลมและข้อมูลที่ได้จากกรมอุตุนิยมวิทยา คณะทำงานได้ทำการลงพื้นที่จริงเพื่อวัดลมที่ระดับ 10 เมตรและเมื่อพิจารณาจากปัจจัยอื่นๆ เช่น ขนาดของพื้นที่ สิ่งอำนวยความสะดวกและการได้รับความยินยอมจากเจ้าของพื้นที่ คณะทำงานจึงได้ทำการเลือกพื้นที่ภายในบริเวณมหาวิทยาลัยขอนแก่น วิทยาเขตตำบลหนองกอมเกาะ อำเภอเมืองจังหวัดหนองคาย ดังแสดงพิกัดในรูปที่ 2 เสาวัดลมตั้งอยู่ที่พิกัด 17°48.276"N, 102°44.649"E ที่ระดับความสูงเหนือระดับน้ำทะเล 178.15 เมตร ระยะห่างจากแม่น้ำโขงและตัวเมืองหนองคายลงมาทางทิศใต้ประมาณ 9 กิโลเมตร ซึ่งตำแหน่งนี้เป็นที่โล่งไม่มีสิ่งกีดขวางที่กั้นการไหลกระแสลมอยู่บริเวณใกล้เคียง ดังแสดงในรูป 3(A)

2.2) รายละเอียดของเสาและอุปกรณ์วัดความเร็วลม

เสาวัดความเร็วลมที่นิยมกันโดยทั่วไปมีอยู่ 2 แบบคือ 1. แบบเสาท่อนกลมเดี่ยววัดด้วยลวดสลิง

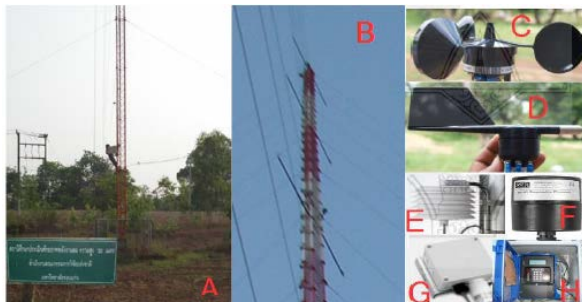
(Guyed Monopole Mast) ซึ่งมีข้อดีคือ ติดตั้งง่าย ใช้งบประมาณและพื้นที่ในการติดตั้งน้อย แต่มีข้อเสียคือไม่เหมาะสมกับความสูงที่มากนัก และ 2. แบบโครงถักสามเหลี่ยมยึดด้วยลวดสลิง (Guyed Lattice Mast) เสาแบบนี้นิยมใช้ในระดับความสูง 100-150 เมตร แต่ก็มีข้อเสียคือใช้งบประมาณและพื้นที่ในการติดตั้งค่อนข้างมาก อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้เลือกใช้เสาวัดลมแบบโครงถักสามเหลี่ยมความสูง 120 เมตร ดังแสดงในรูป 3(A-B)

ในการติดตั้งเสาวัดความเร็วลมจะทำการว่าจ้างบริษัทผู้รับเหมาที่มีประสบการณ์ในด้านนี้โดยตรง เนื่องจากเสาวัดลมมีความสูงมากอีกทั้งใช้เวลาในการเก็บข้อมูลเป็นเวลาหลายปีและต้องเป็นไปตามมาตรฐานการตรวจวัดลม IEC

อุปกรณ์วัดความเร็วแบบถ้วย (3-cup Anemometer) รูปที่ 3(C) และทิศทางของลม (Wind Vane) รูปที่ 3(D) จะถูกติดตั้งบนเสาวัดลมที่ระดับความสูงต่างกันคือ 120, 90 และ 60 เมตรเหนือระดับพื้นดิน ดังรูปที่ 3(B) รายละเอียดดังตารางที่ 1 นอกจากนี้ยังมีการติดตั้งอุปกรณ์วัดอุณหภูมิ ความชื้น และความดันของอากาศด้วย (E-G) ข้อมูลลมทุกๆ 10 นาทีจะถูกส่งมาบันทึกในกล่องบันทึกข้อมูล (Data Logger, H) เป็นเวลา 4 ปี ติดต่อกันระหว่างช่วงตั้งแต่เดือน มกราคม 2012 ถึง เดือน ธันวาคม 2015



รูปที่ 2 ที่ตั้งของสถานีวัดลม



รูปที่ 3 การติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ บนเสาวัดลม

ตารางที่ 1 อุปกรณ์ที่ติดตั้งบนเสาวัดลม[10]

รุ่น	ผู้ผลิต	รายละเอียด
Anemometer NRG #40C	NRG System	- ชนิด 3 ถ้วย - ช่วงความเร็วลมทำงาน 1-96 m/s - ความถี่ (Hz)แปรผันกับความเร็วลม - TF (m/s)=(Hz*0.765)+0.35
Wind Vane NRG #200P	NRG System	- Measuring Rang 0-360 ° - ช่วงทำงาน -55 ถึง 60 °C - ช่วงทำงาน 0 ถึง 100% RH - อายุใช้งาน 2 ถึง 6 ปี
Pressure Sensor NGR BP#20	NRG System	- ช่วงอุณหภูมิอากาศ 10 ถึง 50 °C - ช่วงความดัน 15 ถึง 115 kPa
Thermometer NGR #110S	NRG System	- ช่วงอุณหภูมิอากาศ -40 ถึง 53 °C
RH Sensor NGR #RH-5X	NRG System	- ช่วงทำงาน Max 100%RH

2.3) การจัดเก็บข้อมูลลม

ข้อมูลลมทั้งหมด 4 ปีติดต่อกันจะถูกบันทึกลงในกล่องบันทึกข้อมูลทุก 10 นาที ข้อมูลเหล่านี้จะถูกนำมาวิเคราะห์ในทางสถิติ ค่าเฉลี่ย รายปี รายเดือน และรายวัน รวมทั้งการกระจายตัวของข้อมูลแบบไวบูลล์ เพื่อหาค่า Shape และ Scale Parameter ในแต่ละระดับความสูงที่ต่างกันเหนือพื้นดิน

ในการจัดเก็บข้อมูลลมทางคณะทำงานจะทำการจัดเก็บโดยตรงที่สถานีวัดลม จากการนำการบันทึกข้อมูลของกล่อง Data Logger เพื่อบันทึกข้อมูลคอมพิวเตอร์ ข้อมูลที่ได้จากกล่อง Data Logger จะเป็นนามสกุล .RWD ด้วยความถี่ 1 วันต่อ 1 ไฟล์ และจากนั้นจะถูกนำเข้าสู่กระบวนการแปลงไฟล์เป็นไฟล์นามสกุล .TXT จากนั้นจะนำไปจัดเรียงในโปรแกรม Microsoft Excel และทำการวิเคราะห์ต่อไป ดังแสดงในรูปที่ 4

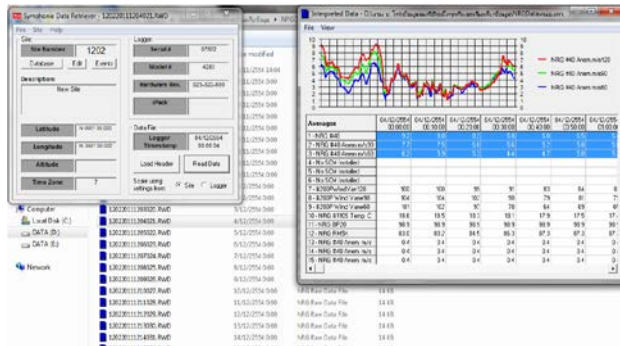
2.4) ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ความเร็วลมเฉลี่ย (Mean Wind Speed) และ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation, σ) หาได้จากสมการ (1) และ (2)

$$V_m = \frac{1}{n} \left[\sum_{i=1}^n V_i \right] \quad (1)$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (V_i - V_m)^2 \quad (2)$$

เมื่อ V_m คือ ความเร็วลมเฉลี่ย n คือจำนวนข้อมูลทั้งหมด และ σ คือ ค่าของ Standard Deviation (SD)

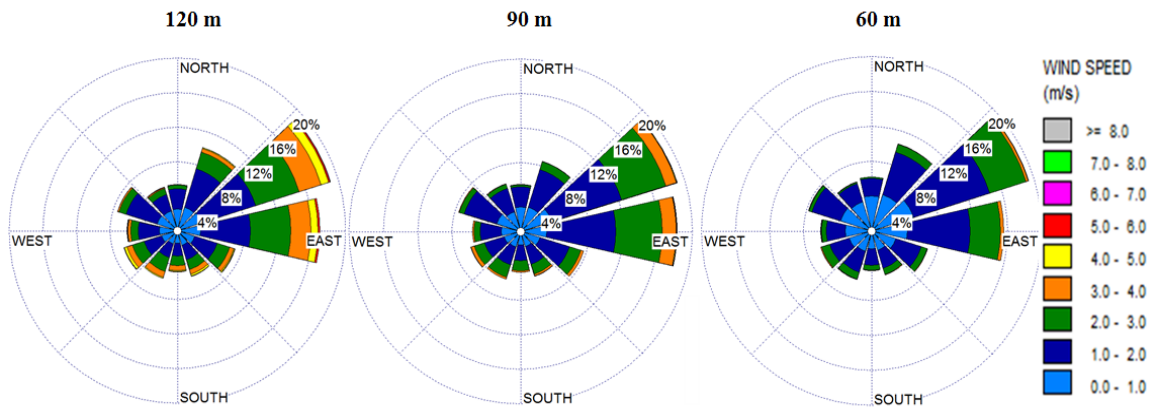


รูปที่ 4 แสดงการจัดการข้อมูลลม

สัมประสิทธิ์แรงเฉือนของลม (Wind Shear Coefficient (WSC), α) หาได้จากความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของตำแหน่งวัดลมและความเร็วลมที่วัดได้ซึ่งในแต่ละพื้นที่ก็จะมีค่าแตกต่างกันออกไป การคำนวณจากสมการที่ (3)

$$\frac{V_2}{V_1} = \left(\frac{h_2}{h_1} \right)^\alpha \quad (3)$$

เมื่อ h คือระดับความสูง WSC จะมีประโยชน์ในการคำนวณความเร็วลมนอกช่วงที่ทำการ



รูปที่ 5 ทิศทางลมเฉลี่ยทั้งปีทั้งห้วงหนองคายของทุกระดับความสูง

วัดจริง (Extrapolation Method [11]) ดังตัวอย่างเช่นในงานวิจัยนี้ได้ทำการวัดความเร็วลมที่ระดับ 60, 90 และ 120 เมตรเหนือพื้นดินและจากค่าของ WSC ที่ได้สามารถคำนวณหาความเร็วลมที่ความสูง 150 เมตรเหนือพื้นดินได้ด้วย

การกระจายตัวของความเร็วลมโดยทั่วไปจะมีลักษณะเป็นแบบเบ้ไปข้างใดข้างหนึ่ง (Skew Function) ซึ่งไม่ใช้การกระจายตัวแบบสมมาตร (Normal Distribution) ฟังก์ชันที่นิยมเพื่อนำมาแสดงอย่างแพร่หลายคือ ไวบูลล์ฟังก์ชัน (Weibull Function) [3, 4, 5, 11, 16, 17] และเรย์เลย์ฟังก์ชัน (Rayleigh Function) ไวบูลล์ฟังก์ชันจะประกอบไปด้วยพารามิเตอร์ที่สำคัญ 2 ตัว คือ Shape Parameter (k) และ Scale Parameter (C) การหาค่า k, C และการแจกแจงความถี่สะสม (Cumulative distribution, $F(v)$) สามารถหาได้จากสมการ (4-8) เมื่อ Γ คือ Gamma Function [3]

เรย์เลย์ฟังก์ชัน (Rayleigh Function) ถือเป็นกรณีพิเศษของไวบูลล์ฟังก์ชัน ซึ่งคงที่ค่าตัวประกอบรูปร่าง shape parameter (k) ไว้เท่ากับ 2 ผลที่ได้จากการเปรียบเทียบระหว่างฟังก์ชันไวบูลล์และเรย์เลย์ฟังก์ชันคือไวบูลล์จะให้ความแม่นยำกว่า [12] เนื่องจากค่า k ของไวบูลล์ เป็นตัวแปรที่เหมาะสมของลมในแต่ละพื้นที่

$$f(V) = \left(\frac{k}{c} \right) \left(\frac{V}{c} \right)^{k-1} \exp \left[- \left(\frac{V}{c} \right)^k \right] \quad (4)$$

$$k = \left(\frac{\sigma}{V_m} \right)^{-1.086} \quad (5)$$

$$c = \frac{V_m}{\Gamma(1+1/k)} \quad (6)$$

$$\Gamma(x) = \int_0^\infty t^{x-1} \exp(-t) dt \quad (7)$$

$$F(v) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{v}{c} \right)^k \right] \quad (8)$$

ความหนาแน่นของกำลังลม (Wind Power Density (WPD), W/m^2) หาได้จากสมการที่ (9) ซึ่งเป็นปริมาณต่อพื้นที่หน้าตัด กำลังลมจะแปรผันกำลังสามกับความเร็วม สิ่งที่มีผลต่อกำลังลมคือ ความเร็วลม (V) และความหนาแน่นของอากาศ (ρ_{Air}) ดังสมการที่ (9)

$$WPD = \frac{1}{2} \rho_{Air} V^3 \quad (9)$$

3. ผลการวิจัย

3.1) ข้อมูลลมเฉลี่ยรายปี (Annual Mean Wind Speed)

ตารางที่ 2 เป็นการแสดงถึงความเร็วลมเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของลมทั้ง 4 ปี ที่ระดับความสูง 60, 90 และ 120 เมตรเหนือพื้นดิน

ตารางที่ 2 ความเร็วลมเฉลี่ยรายปีที่จังหวัดหนองคาย

ความสูง (m)	ความเร็วลม (m/s)	SD (m/s)
120	3.96	2.46
90	3.41	1.86
60	2.84	1.63

ผลจากงานวิจัยนี้พบว่า ที่ระดับความสูง 120 เมตรจะมีความเร็วลมสูงสุดและลดลงตามระดับความสูงที่ 90 เมตร และที่ระดับความสูง 60 เมตร ตามลำดับการกระจายตัวของทิศทางลมที่ระดับความสูงทั้ง 3 ระดับ ดังแสดงในรูปที่ 5 ทิศทางลมถูกแจกแจงโดยใช้โปรแกรม WIND PLOT [13] ลมส่วนใหญ่จะพัดมาจากทางทิศตะวันออกเฉียงเหนือซึ่งเป็นลมมรสุมประจำฤดูฝนของประเทศไทย ความเร็วลมเฉลี่ยที่ได้จัดว่าเป็นความเร็วลม Class 1 [14] ซึ่งเป็นความเร็วลมที่ค่อนข้างจะต่ำ

3.2) ข้อมูลลมเฉลี่ยรายเดือน (Monthly Wind Speed Variation)

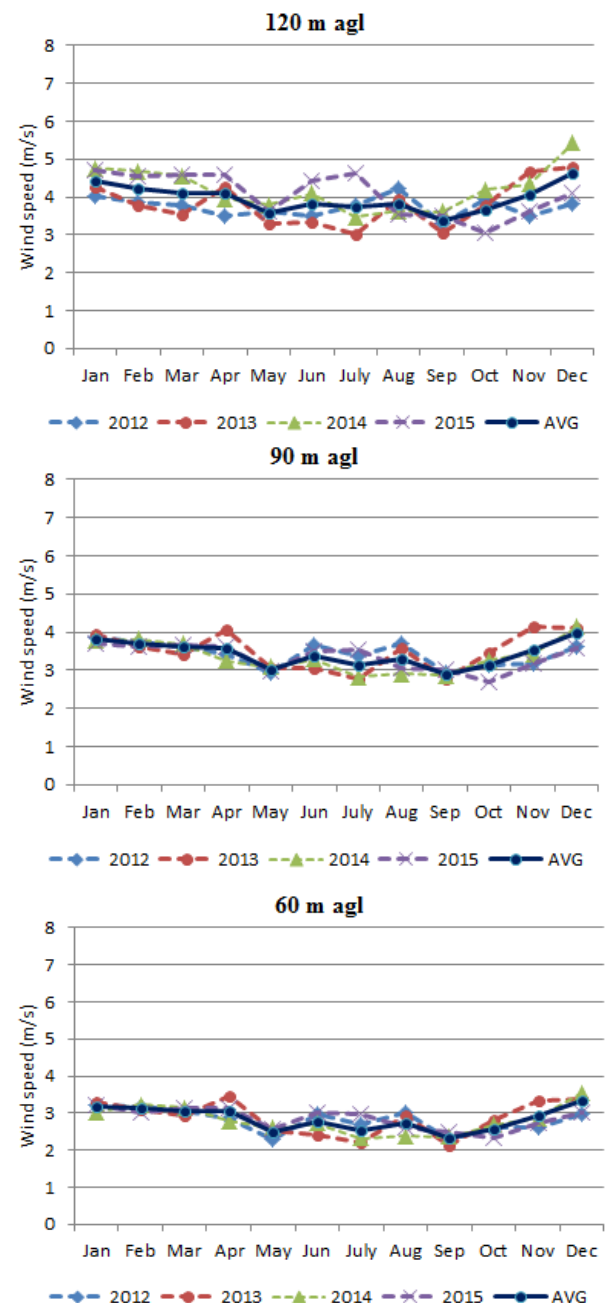
ความเร็วลมเฉลี่ยในแต่ละปี ดังแสดงในรูปที่ 6 ความเร็วลมเฉลี่ยจะมีความเร็วสูงสุดในช่วงฤดูหนาวที่เริ่มตั้งแต่เดือนพฤศจิกายนถึงเดือนมกราคม จะมีแนวโน้มลดลงในช่วงฤดูร้อนและฤดูฝนตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ความเร็วลมเฉลี่ยในแต่ละฤดูกาล

ฤดูกาล	ความเร็วลมเฉลี่ย (m/s)		
	120 m	90 m	60 m
ฤดูหนาว (พ.ย. – ม.ค.)	4.33	3.72	3.10
ฤดูร้อน (ก.พ. – พ.ค.)	4.00	3.48	2.94
ฤดูฝน (มิ.ย. – ต.ค.)	3.70	3.17	2.60

3.3) ข้อมูลความเร็วลมเฉลี่ยรายวัน (Daily Wind Speed)

ลมจะมีความเร็วในช่วงเวลากลางคืนมากกว่าช่วงเวลากลางวันในทุกระดับความสูงเหนือพื้นดิน ดังแสดงในกราฟรูปที่ 7 และตารางที่ 4 ซึ่งเปรียบเทียบความเร็วลมในช่วงเวลากลางวันและกลางคืนในแต่ละระดับความสูง



รูปที่ 6 ความเร็วลมเฉลี่ยรายเดือนในแต่ละปี

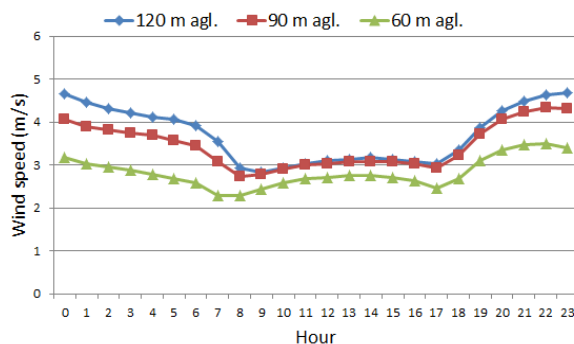
3.4) แรงเฉือนลม (Wind Shear Coefficient (WSC))

ในรูปที่ 8 แรงเฉือนลมจะมีความสอดคล้องกันกับความเร็วลมในรูปที่ 7 แสดงให้เห็นว่า WSC เฉลี่ย

ของบริเวณสถานีวัดความเร็วลม ระหว่าง 60-90 m คือ 0.48 WSC ระหว่าง 90-120m คือ 0.23 และ WSC ระหว่าง 60-120m คือ 0.38 ส่วนสาเหตุที่ WSC ระหว่าง 60-90m มีค่ามากเนื่องมาจากการได้รับอิทธิพลของความขรุขระของพื้นผิว (Surface Roughness) ในขณะเดียวกันความเร็วลมนอกช่วงที่ความสูง 150 เมตรเหนือพื้นดินก็สามารถใช้สมการที่ (3) ซึ่งได้เท่ากับ 4.17 เมตรต่อวินาทีเมื่อใช้ค่า WSC เท่ากับ 0.23

3.5) การแจกแจงการกระจายตัวของข้อมูลลมเฉลี่ย

ได้จากการการใช้ไวบูลล์ฟังก์ชันที่ระดับความสูง 60, 90 และ 120 เมตรเหนือพื้นดิน ดังแสดงในรูปที่ 9 โดยมี Shape และ Scale พารามิเตอร์เฉลี่ยและแยกตามรายปี ตามตารางที่ 5 และความถี่สะสม (Cumulative Weibull Distribution) ดังรูปที่ 10



รูปที่ 7 แสดงความเร็วลมรายชั่วโมง

ตารางที่ 4 แสดงความเร็วลมเฉลี่ยเปรียบเทียบในเวลากลางวันและกลางคืน

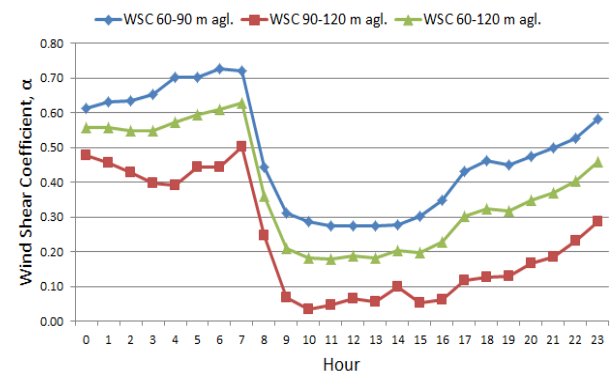
ช่วงเวลา	ความเร็วลมเฉลี่ย (m/s)		
	120 m	90 m	60 m
กลางวัน (07.00-18.00 น.)	3.08	2.98	2.58
กลางคืน (18.00-07.00 น.)	4.23	3.86	3.04

กังหันลมเป็นอุปกรณ์ที่ใช้เพื่อเปลี่ยนพลังงานจลน์จากลมเป็นพลังงานไฟฟ้า กังหันลมทั่วไปจะมีความเร็วลมที่เริ่มต้นทำงาน (Cut in speed) ที่ประมาณ 3-5 m/s และจุดที่หยุดการทำงานเพื่อป้องกันความเสียหาย (Cut out speed) ที่ 25 m/s จากรูปที่ 9 และ 10 เมื่อนำข้อมูลทั้งหมดมาเปรียบเทียบกับกังหันลมที่มี cut in speed ที่ 3, 4 และ 5 m/s จะได้สัดส่วนความน่าจะเป็นของความเร็วลมที่มีค่ามากกว่า Cut in speed ดังแสดงในตารางที่ 7 เมื่อพิจารณาจำนวนข้อมูลที่มีค่ามากกว่า 3 m/s จะมีสัดส่วนแค่ 58.7%, 53.4% และ 41% ที่ความสูง 120 m, 90 m และ 60 m ตามลำดับ และจะสอดคล้องกันที่

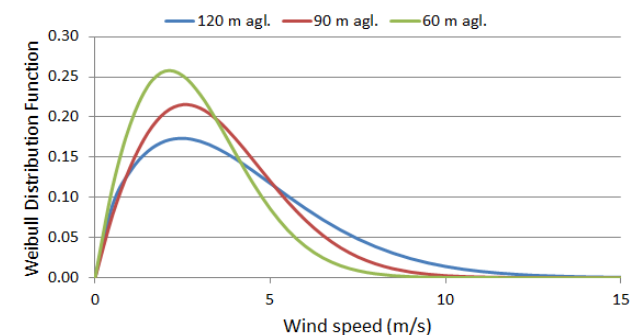
ความเร็ว 4 m/s และ 5m/s อีกด้วย โดยเฉพาะความเร็วลมที่มากกว่า 5 m/s ที่ความสูง 60 m มีสัดส่วนที่ไม่ถึง 10%

3.6) กำลังลม (Wind Power Density, W/m^2)

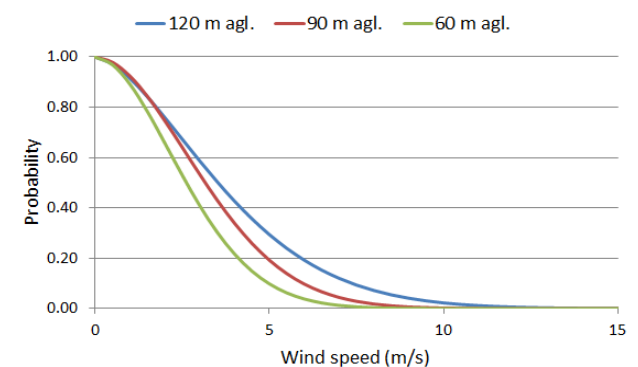
กำลังลมเฉลี่ยที่ความสูงต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 6 กำลังลมจะแปรผันกำลังสามกับความเร็วลมซึ่งเป็นสมการไม่เชิงเส้น (Non-Linear) เมื่อลมมีความเร็วมากกำลังลมก็จะมีค่ามากตามไปด้วย อีกประการหนึ่งคือกำลังลมจะแปรผันตรงกับความหนาแน่นของอากาศ พื้นที่บนภูเขาสูงมาก ค่าความหนาแน่นของอากาศจะเบาบางซึ่งจะมีผลโดยตรงต่อกำลังลมที่ได้



รูปที่ 8 Daily Wind Shear Coefficient



รูปที่ 9 การกระจายตัวของข้อมูลลมเฉลี่ย



รูปที่ 10 การกระจายตัวแบบสะสมของความเร็วลม

3.7) อุณหภูมิของอากาศ (Air Temperature, T) ความดันบรรยากาศ (Air Pressure, P) และความชื้นสัมพัทธ์ (Relative Humidity, RH) ของอากาศที่สถานีวัดลม

ได้ถูกบันทึกไว้ที่กล่องบันทึกข้อมูลเช่นกัน ดังแสดงในรูปที่ 11 และ 12 จะเห็นว่าอุณหภูมิที่สถานีวัดลมจะลดต่ำลงในช่วงฤดูหนาว เดือน พฤศจิกายน ถึง เดือน มกราคม และจะสูงขึ้นในช่วงเดือนเมษายนไปจนถึงเดือนมิถุนายน ส่วนความดันบรรยากาศจะสูงสุดในฤดูหนาวช่วงเดือนพฤศจิกายน ถึง เดือนมกราคม และในส่วนของการความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศก็จะสูงสุดในฤดูฝนระหว่างเดือนมิถุนายนถึงตุลาคม

ตารางที่ 5 พารามิเตอร์การกระจายตัวรายปี

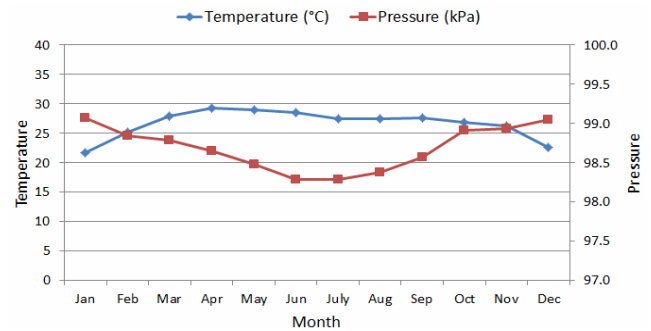
Year	Parameter	ความสูง (m)		
		120	90	60
2012	V (m/s)	3.74	3.43	2.81
	SD (m/s)	2.18	1.84	1.64
	C (m/s)	4.21	3.87	3.16
	k	1.79	1.97	1.80
2013	V (m/s)	3.80	3.50	2.87
	SD (m/s)	2.22	1.91	1.68
	C (m/s)	4.28	3.94	3.23
	k	1.80	1.93	1.79
2014	V (m/s)	4.20	3.36	2.80
	SD (m/s)	2.80	1.86	1.64
	C (m/s)	4.67	3.78	3.15
	k	1.55	1.90	1.79
2015	V (m/s)	4.07	3.35	2.86
	SD (m/s)	2.56	1.82	1.58
	C (m/s)	4.55	3.77	3.22
	k	1.65	1.94	1.90
Average	V (m/s)	3.96	3.41	2.84
	SD (m/s)	2.46	1.86	1.63
	C (m/s)	4.43	3.84	3.19
	k	1.67	1.93	1.82

ตารางที่ 6 กำลังลมเฉลี่ยที่ความสูงต่างกัน

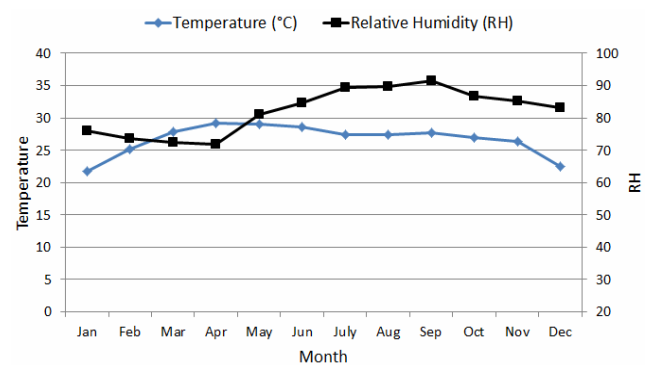
ความสูง	ความเร็วลม(m/s)	กำลังลม(W/m^2)
120 m	3.96	98
90 m	3.41	55
60 m	2.84	34

ตารางที่ 7 สัดส่วนความเร็วลมที่มากกว่า 3, 4 และ 5 m/s

Cut in (m/s)	Cut out(m/s)	% ที่ความสูง (m)		
		120	90	60
3	25	58.7	53.4	41.0
4	25	42.7	33.9	21.7
5	25	29.4	19.2	9.8



รูปที่ 11 อุณหภูมิและความดันของอากาศที่สถานีวัดลม



รูปที่ 12 อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ

4. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาถึงศักยภาพพลังงานลมในเขตพื้นที่จังหวัดหนองคายโดยการเก็บข้อมูลผลการวัดจริงที่ระดับความสูง 60, 90 และ 120 เมตรเหนือพื้นดินเป็นเวลาติดต่อกัน 4 ปี ระหว่างปี 2012 ถึง 2015 ข้อมูลที่ได้แสดงดังนี้

ความเร็วลมเฉลี่ยที่ระดับความสูง 120, 90 และ 60 เมตรเหนือพื้นดินคือ 3.96, 3.41 และ 2.84 เมตรต่อวินาที ตามลำดับ และมีค่าเท่ากับ 4.17 m/s ที่ความสูง 150 เมตรที่ได้จากการคำนวณนอกช่วง ในขณะที่ทิศทางลมส่วนใหญ่จะเป็นทิศตะวันออกเฉียงเหนือและตะวันออกเฉียง

ค่าของไวบูลล์ Shape parameter (k) และ Scale parameter (C) ในพื้นที่นี้มีค่าเท่ากับ 1.67 ถึง 1.82 และ 3.19 ถึง 4.43 เมตรต่อวินาที ตามลำดับ

ในส่วนของการคำนวณมีค่าอยู่ระหว่าง 36, 55 และ 98 W/m^2 ที่ความสูง 60, 90 และ 120 เมตรต่อวินาที ตามลำดับ

จากความเร็วลมเฉลี่ยที่วัดได้และกำลังลม ถือว่าเป็นความเร็วลมที่ค่อนข้างต่ำ ซึ่งจัดอยู่ใน Wind Class 1 [14] เท่านั้น ในขณะที่ความเร็วลมที่เหมาะสมที่จะติดตั้งกังหันลมเพื่อการผลิตกระแสไฟฟ้าในเชิงพาณิชย์ควรมีค่าเฉลี่ยทั้งปีตั้งแต่ 5 เมตรต่อวินาทีขึ้นไป [6,7,15] ดังจะเห็นได้จากการลงทุนติดตั้งกังหันลมเพื่อการผลิตกระแสไฟฟ้าของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ที่แหลมพรหมเทพ จังหวัดภูเก็ต และ พื้นที่บนเขาเขายะเิยง อำเภอสีคิ้ว จังหวัดนครราชสีมา ส่วนความเร็วลมในพื้นที่ ตำบลหนองกอมเกาะ อำเภอเมือง จังหวัดหนองคายเป็นความเร็วลมที่ค่อนข้างจะต่ำซึ่งไม่มีความเหมาะสมที่จะติดตั้งกังหันลมขนาดใหญ่เพื่อการผลิตกระแสไฟฟ้าในเชิงพาณิชย์ แต่ความเร็วลมขนาดนี้อาจจะเหมาะสมกับการพัฒนาควบคู่ไปกับการใช้พลังงานแสงอาทิตย์[16,17] เพื่อใช้ในการเกษตร ตัวอย่างเช่น การนำไปประยุกต์ใช้ในการสูบน้ำของเกษตรกรในพื้นที่ เป็นต้น

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้ทำงานวิจัยขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช) และ ศูนย์วิจัยและพัฒนาพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยขอนแก่น (AERD-KKU) สำหรับการสนับสนุนทุนในการทำวิจัยในครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Statistical Review of World Energy [online]. Available: <https://www.bp.com>. 2017.
- [2] Global wind power by country [online]. Available: http://en.wikipedia.org/wiki/wind_power_by_country. 2017.
- [3] Z.R. Shu, Q.S. Li and P.W. Chan, "Statistical analysis of wind characteristics and wind energy potential in Hong Kong," Energy Conversion and Management, Vol.101, pp.644-657, 2015.
- [4] Myung Eun Lee et al, "Assessment of offshore wind energy at Younggwang in Korea," Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol.21, pp. 131-141, 2013.
- [5] Laerte de Araujo Lima et al. "Wind resource evaluation in SJC Paraba-Brazil," Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol.16, pp.474-480, 2012.
- [6] Wind turbine installation at Phuket [online]. Available: <http://www.egat.co.th>. 2017.
- [7] Wind turbine installation at Lumtakong [online]. Available: <http://www.egat.co.th>. 2017.
- [8] Wind power in Thailand [online]. Available: https://en.wikipedia/wiki/Wind_power_in_Thailand. 2017.
- [9] Thailand Power Development Plan [online]. Available: <http://energy.go.th/2015>. 2017.
- [10] NRG system [online]. Available: <http://nrgsystem.com>. 2017.
- [11] Giovanni Gualtieri et al. "Method of extrapolation to the turbine hub height base on power law: A 1-h wind speed vs Weibull distribution extrapolation comparison," Renewable Energy, Vol.43, pp.183-200, 2012.
- [12] Wikanda Sridech et al. "Statistical error in the assessment of annual energy yields of wind turbine," Conference of the Mechanical Engineering Network of Thailand., ETM-031024, 2009.
- [13] Wind Plot [online]. Available: <https://www.weblakes.com>. 2017.
- [14] Jompop Waewsak, "Wind Energy Technology [Book]", pp. 99, 2015.
- [15] Akraphon Janon et al. "An investigation of the Low Performance of the First Wind Farm in Thailand: a case of poor Wind Turbine-Site Matching," Advanced Materials Research, Vol.724, pp.469-475, 2013.
- [16] Pham Quan et al. "Assessment of wind energy potential for selecting wind turbine: An application to Thailand," Sustainable Energy Technologies and Assessments, Vol.11, pp.17-26, 2015.
- [17] Tanate Chaichana and Sumpan Chaitep. "Wind power potential and characteristic analysis of Chiang Mai Thailand," Journal of Mechanical Science and Technology, Vol.24, pp.1475-1479, 2010.

การประยุกต์ใช้กระบวนการวิเคราะห์เชิงลำดับชั้น สำหรับการประเมินทำเลที่ตั้งโรงงานผลิตเชื้อเพลิงชีวมวล

Applicate Analytic Hierarchy Process for Evaluation of Biomass Plant Location

วรพจน์ พันธุ์คง^{1*} ธริณี มณีศรี² ชวลิต มณีศรี³

¹สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม

²สาขาวิชาการจัดการโลจิสติกส์และโซ่อุปทาน วิทยาลัยบัณฑิตศึกษาด้านการจัดการ มหาวิทยาลัยศรีปทุม

³สาขาวิชาวิศวกรรมโลจิสติกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ดำเนินการศึกษาและประเมินทางเลือกของทำเลที่ตั้งของโรงงานผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลจากเหง้ามันสำปะหลังในจังหวัดพิษณุโลกใน 3 ทางเลือก ได้แก่ อำเภอชาติตระการ อำเภอวัดโบสถ์ และอำเภอวังทอง โดยใช้วิธีการวิเคราะห์เชิงลำดับชั้นมาประเมินหาน้ำหนักความสำคัญของปัจจัย ซึ่งประกอบด้วยแหล่งวัตถุดิบ การขนส่ง ระบบสาธารณูปโภค แหล่งต้นกำลังและเชื้อเพลิง และแหล่งแรงงาน ซึ่งปัจจัยที่ผู้เชี่ยวชาญให้ความสำคัญมากที่สุดคือ แหล่งวัตถุดิบ เนื่องจากเห็นว่าเป็นส่วนสำคัญที่มีผลต่อต้นทุนสินค้าและเป็นค่าใช้จ่ายที่ผูกมัดระยะยาว ในการวิเคราะห์ผลของการวิจัย พบว่าอำเภอวังทองมีทำเลที่ตั้งที่มีความเหมาะสมมากที่สุดในการตั้งโรงงานผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลจากเหง้ามันสำปะหลังในจังหวัดพิษณุโลก โดยมีคะแนนความสำคัญ 0.40 ขณะที่อำเภอชาติตระการและอำเภอวัดโบสถ์มีคะแนนความสำคัญ 0.33 และ 0.27 ตามลำดับ

คำสำคัญ : กระบวนการวิเคราะห์เชิงลำดับชั้น เชื้อเพลิงชีวมวล ทำเลที่ตั้งโรงงาน

Abstract

This research studies and evaluates the plant location alternatives of biomass from cassava roots in Phitsanulok province. The alternatives are three districts such as Chat Trakan, Wat Bot, and Wang Thong. We apply the Analytic Hierarchy Process (AHP) to evaluate the important weight factors which include raw materials source, transportation, infrastructure, power and fuel source, and labors. The raw materials source is the most important factor from the expert's decision because the raw materials source affect to product cost and the cost of long term commitment. The result shows that Wang Thong district is the most suitable for construct plant of biomass from cassava roots in this province with 0.40 of the important point. While Chat Trakan district and Wat Bot district has 0.33 and 0.27 respectively.

Keywords : Analytic Hierarchy Process, Biomass, Plant location

1. บทนำ

ความผันผวนและวิกฤตด้านพลังงานในปัจจุบัน ทำให้หน่วยงานที่มีหน้าที่ด้านพลังงานของประเทศไทยศึกษาและวิจัยเพื่อสร้างความมั่นคงด้านพลังงานให้ประเทศ เชื้อเพลิงชีวมวล (Biomass) เป็นพลังงานทดแทนรูปแบบหนึ่งที่มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง อย่างไรก็ตามธุรกิจการผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลมีผู้ประกอบการจำนวนน้อยเนื่องจากความไม่มั่นใจในการลงทุน การจัดเตรียมวัตถุดิบทางการเกษตร และการนำเข้าซึ่งมีค่าใช้จ่ายสูง จากปัญหาดังกล่าว สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงานจึงดำเนินการศึกษารูปแบบธุรกิจการผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลจากเหง้ามันสำปะหลังในเชิงพาณิชย์ด้วยผนวกแนวคิดด้านการจัดการโลจิสติกส์และโซ่อุปทาน[1] โดยกำหนดพื้นที่จังหวัดพิษณุโลกซึ่งเกษตรกรนิยมปลูกมันสำปะหลังเป็นพื้นที่นำร่อง ซึ่งผลการศึกษาข้างต้นทำให้เห็นภาพรวมการดำเนินธุรกิจผลิตเชื้อเพลิงชีวมวล งานวิจัยชิ้นนี้จึงเพิ่มเติมในกรณีที่มีผู้ประกอบการต้องการหาทำเลที่ตั้งโรงงานเพื่อประกอบธุรกิจในพื้นที่จังหวัดพิษณุโลก โดยสร้างเครื่องมือสนับสนุนการตัดสินใจจากวิธีการกระบวนการวิเคราะห์เชิงลำดับชั้น (Analytic Hierarchy Process: AHP) ซึ่งเป็นเครื่องมือที่ช่วยในการตัดสินใจที่สามารถตัดสินใจในกรณีแบบหลายหลักเกณฑ์ (Multiple Criteria Decision Making: MDCM) โดยการประเมินให้คะแนนตามลำดับความสำคัญของเกณฑ์แล้วจึงพิจารณาจัดลำดับจนได้ทางเลือกที่ดีที่สุด ผลลัพธ์ที่ได้จะมีความน่าเชื่อถือ เพราะมีรูปแบบการตัดสินใจที่เป็นลำดับขั้น ตอนและมีประสิทธิภาพ

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การตัดสินใจเลือกทำเลที่ตั้ง

การตัดสินใจเลือกทำเลที่ตั้งส่วนใหญ่เกิดจากประเด็นต่างๆ เช่น การประกอบกิจการใหม่ การขยายกิจการหรือขยายสาขา ความคับแคบของทำเลที่ตั้งเดิมที่ทำให้ไม่สามารถขยายกิจการเพื่อรองรับการเปลี่ยนแปลงได้ ผลกระทบจากต้นทุนหรือการตลาดที่ถึงจุดอิ่มตัวหรือสูงกว่าทำเลอื่น การขาดแคลนทรัพยากรในทำเลที่ตั้งเดิม รวมถึง

ผลกระทบจากกฎหมายหรือชุมชนใกล้เคียง เป็นต้น ดังนั้นเมื่อทำเลที่ตั้งเป็นจุดเริ่มต้นของการดำเนินธุรกิจและเป็นเรื่องการผูกพันระยะยาว หากมีข้อบกพร่องหรือข้อผิดพลาดจะเป็นการยากต่อการแก้ไขแล้ว ทำเลที่ตั้งจึงส่งผลกระทบต่อ การดำเนินธุรกิจในหลายๆ ด้าน เช่น ค่าใช้จ่ายในการปฏิบัติการ ค่าขนส่ง ความมั่นคงด้านวัตถุดิบและแรงงาน จนถึงผลกระทบต่อระบบการผลิต

องค์กรจะตัดสินใจเลือกทำเลที่ตั้งจากตัวเลือกหลายๆ ทางเลือก เนื่องจากทำเลที่ตั้งแต่ละทางเลือกไม่สามารถตอบสนองความต้องการหรือปัจจัยที่กำหนดไว้ได้ ทำได้เพียงประเมินเพื่อเลือกทำเลที่ตั้งที่สามารถตอบสนองต่อความต้องการได้เหมาะสมที่สุดเท่านั้น[2] ปัจจัยที่นิยมใช้ในการประเมินเพื่อตัดสินใจเลือกทำเลที่ตั้ง[3][4][5] เช่น ตลาด แหล่งวัตถุดิบ การขนส่ง แหล่งต้นกำลังและเชื้อเพลิง สิ่งแวดล้อม แรงงาน สาธารณูปโภค น้ำและการถ่ายเทของเสีย กฎหมายและภาษี และที่ดิน เป็นต้น โดยปัจจัยดังกล่าวองค์กรสามารถกำหนดได้เอง ซึ่งอาจจะเลือกบางปัจจัย หรือเพิ่มเติมจากตัวอย่างข้างต้นได้ ดังตัวอย่างงานวิจัยของธนวัฒน์ เมธีชัยรัตน์[6] ได้กำหนดปัจจัยสำหรับเลือกที่ตั้งคลังน้ำมันในประเทศไทยไว้ 6 ปัจจัย คือ ค่าก่อสร้างท่อ น้ำมันส่วนต่อเข้าคลังน้ำมัน ความเหมาะสมด้านสิ่งแวดล้อม ความพร้อมของสาธารณูปโภค ความสามารถในการขยายพื้นที่คลังน้ำมัน ความปลอดภัยจากปัญหาน้ำท่วม และความสะดวกในการขนส่ง โดยขั้นตอนทั่วไปในการตัดสินใจเลือกทำเลที่ตั้ง มี 4 ขั้นตอนหลักคือ กำหนดขอบเขตของการประเมิน กำหนดปัจจัย รวบรวมทางเลือก ประเมินและตัดสินใจ

รูปแบบการหาทำเลที่ตั้งซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของการวิเคราะห์ด้านเทคนิควิศวกรรมของงานวิจัยการศึกษาความเป็นไปได้ในการตั้งโรงผลิตถ่านกะลามะพร้าวอัดแท่งในจังหวัดประจวบคีรีขันธ์ [7] อาจจะเป็นงานวิจัยที่มีการหาทำเลที่ตั้งของธุรกิจที่ใกล้เคียงกับงานวิจัยนี้ ซึ่งผู้วิจัยเลือกใช้วิธีประเมินทำเลที่ตั้งที่แตกต่างออกไป คือวิธีการให้น้ำหนักปัจจัย (Factor rating) โดยพิจารณา 9 ปัจจัยที่มีผลต่อการดำเนินงาน และการผลิต ถ่านกะลามะพร้าวอัดแท่ง ในการเปรียบเทียบทำเลที่ตั้ง 3 แห่ง

2.2 กระบวนการวิเคราะห์เชิงลำดับชั้น (Analysis Hierarchy Process: AHP)

AHP เป็นกระบวนการช่วยในการตัดสินใจ ซึ่งอาศัยหลักการของการตัดสินใจแบบพหุเกณฑ์ ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในหลายรูปแบบ เช่น การเลือกทำเลที่ตั้งของคลังน้ำมัน[6] การสนับสนุนการเลือกลงทุนในนวัตกรรม[8] การหาทำเลที่ตั้งโรงงานผลิตประตูหน้าต่างโดยใช้ AHP ร่วมกับโปรแกรม Expert Choice [9] และการคัดเลือกทำเลที่ตั้งคลังเก็บดอกหญ้า ใน 4 อำเภอ ของจังหวัดเชียงราย โดยใช้หลักการตัดสินใจแบบหลายหลักเกณฑ์ภายใต้การพิจารณาปัจจัยที่สำคัญ 7 ปัจจัย เช่น ขนาดของทรัพย์สิน ต้นทุนทรัพย์สิน ต้นทุนแรงงาน สาธารณูปโภค โหมดการขนส่ง ความสามารถในการเข้าถึงที่ตั้ง และระยะทางจากผู้จัดหา [10] เป็นต้น ซึ่งต้องกำหนดเกณฑ์ของเป้าหมายที่ต้องการศึกษาให้อยู่ในลักษณะเป็นลำดับชั้น ส่วนในระดับที่ต่ำลงมาจะเป็นเกณฑ์ย่อย (Sub-Criteria) ตามลำดับ จนถึงทางเลือก ซึ่งเป็นระดับต่ำสุดของการจัดลำดับชั้นการวิเคราะห์จะใช้หลักการเปรียบเทียบเป็นคู่ (Pair Wise Comparison) ของเกณฑ์ดังตารางที่ 1 ซึ่งค่าความสำคัญในการเปรียบเทียบแปลงมาเป็นตัวเลขระหว่าง 1 ถึง 9 โดยที่ a_{ij} คือ สมาชิกในแถวที่ i หลักที่ j ของเมตริกซ์ หมายถึง ผลการเปรียบเทียบความสำคัญระหว่างปัจจัย A_i และ A_j กำหนดมาตราส่วนในการวินิจฉัยเปรียบเทียบตั้งแต่ 1 ถึง 9 ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 2 หลังจากทราบผลการเปรียบเทียบในแต่ละคู่แล้ว จึงคำนวณหาน้ำหนักของแต่ละเกณฑ์ออกมาเป็นตัวเลข เพื่อแสดงให้เห็นถึงความสำคัญของแต่ละเกณฑ์อย่างชัดเจน [11]

ตารางที่ 1 ตารางแสดงเมตริกซ์ที่ใช้แสดงการเปรียบเทียบเป็นคู่

เกณฑ์ตัดสินใจ		ปัจจัย			
		A1	A2	A3	A4
ปัจจัย	A1	A_{11}	A_{12}	A_{13}	A_{14}
	A2	A_{21}	A_{22}	A_{23}	A_{24}
	A3	A_{31}	A_{32}	A_{33}	A_{34}
	A4	A_{41}	A_{42}	A_{43}	A_{44}

ตารางที่ 2 ความหมายของการเปรียบเทียบเป็นรายคู่

ระดับความเข้มข้นของความสำคัญ	ความหมาย	คำอธิบาย
1	สำคัญเท่ากัน	ทั้ง 2 เกณฑ์ส่งผลกระทบท่อวัตถุประสงค์เท่ากัน
3	สำคัญกว่าปานกลาง	ผู้วินิจฉัยให้ความคิดเห็นว่าเกณฑ์หนึ่งสำคัญกว่าอีกเกณฑ์ หนึ่งอยู่ในระดับปานกลาง
5	สำคัญกว่ามาก	ผู้วินิจฉัยให้ความคิดเห็นว่าเกณฑ์หนึ่งสำคัญกว่าอีกเกณฑ์ หนึ่งอยู่ในระดับมาก
7	สำคัญกว่ามากที่สุด	ผู้วินิจฉัยให้ความคิดเห็นว่าเกณฑ์หนึ่งสำคัญกว่าอีกเกณฑ์ หนึ่งอยู่ในระดับมากที่สุด
9	สำคัญกว่าสูงสุด	ผู้วินิจฉัยให้ความคิดเห็นว่าเกณฑ์หนึ่งสำคัญกว่าอีกเกณฑ์ หนึ่งอยู่ในระดับสูงสุด
2, 4, 6, 8	อยู่ระหว่างกลาง	อยู่ระหว่างระดับที่ได้อธิบายมาข้างต้น

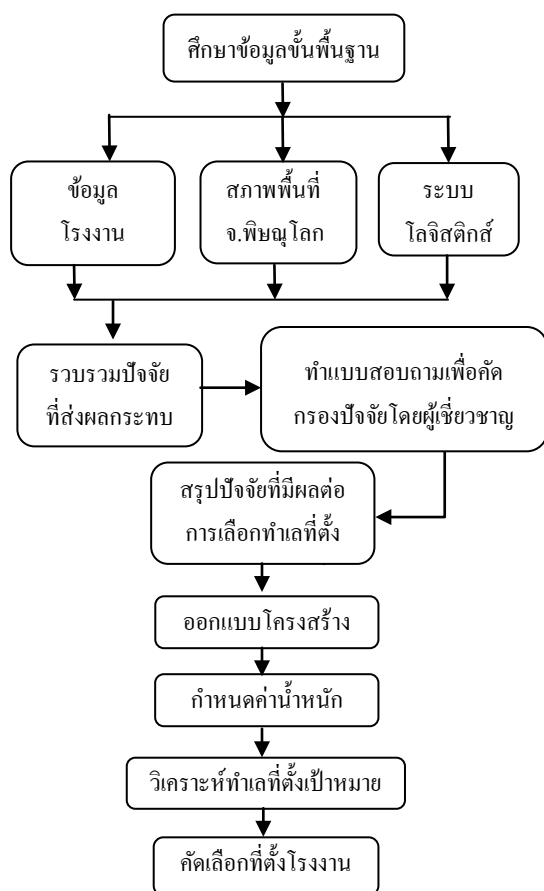
จากการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า การหาทำเลที่ตั้งสามารถทำได้หลายวิธี เช่น AHP และ Factor rating เป็นต้น ซึ่งบางครั้งประยุกต์ใช้ร่วมกับโปรแกรมที่ทำให้การคำนวณรวดเร็วขึ้น นอกจากนี้ AHP ถูกนำมาใช้ในการหาทำเลที่ตั้งทั้งในระดับจังหวัดและระดับประเทศสำหรับอุตสาหกรรมใกล้เคียงพบว่า มีเพียงถ่านกะลามะพร้าวอัดแท่งเท่านั้น

สรุปแล้วงานวิจัยนี้มีความแตกต่างกับงานวิจัยที่ผ่านมาเนื่องจากปัจจุบันยังไม่มีวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเลือกทำเลที่ตั้งของโรงงานผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลจากเหง้ามันสำปะหลัง มีเพียงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาความเป็นไปได้ของธุรกิจการผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลจากเหง้ามันสำปะหลังเท่านั้น ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเป็นการต่อยอด

งานวิจัยดังกล่าวอันเป็นประโยชน์ต่อผู้ประกอบการอย่างครบวงจร

3. ขั้นตอนการวิจัย

การเลือกทำเลที่ตั้งโรงงานผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลจากเหง้ามันสำปะหลัง เริ่มต้นจากการศึกษาและรวบรวมข้อมูลพื้นฐานของจังหวัดพิษณุโลก จากนั้นพิจารณาถึงปัจจัยในการตัดสินใจเลือกทำเลที่ตั้ง นำไปสู่การวิเคราะห์ปัจจัยและตัดสินใจด้วย AHP และออกแบบลำดับขั้นตอนในการตัดสินใจจัดขั้นตอนในรูปที่ 1



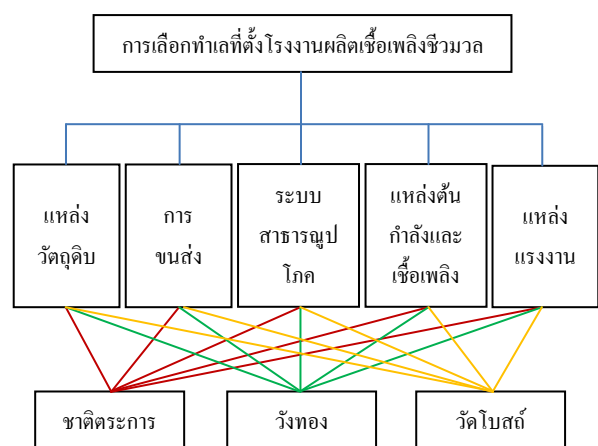
รูปที่ 1 ขั้นตอนการวิจัย

4. ผลการวิจัย

4.1 การกำหนดปัจจัยตัดสินใจเลือกทำเลที่ตั้ง

ปัจจัยที่นำมาพิจารณาทั้งหมดเพื่อประยุกต์ใช้ใน AHP ได้แก่ แหล่งวัตถุดิบ แหล่งแรงงาน ตลาด ราคาที่ดิน การขนส่ง ระบบสาธารณูปโภค สิ่งแวดล้อม แหล่งต้นกำลังและเชื้อเพลิง สังคมและชุมชน กฎหมายและภาษี โอกาส

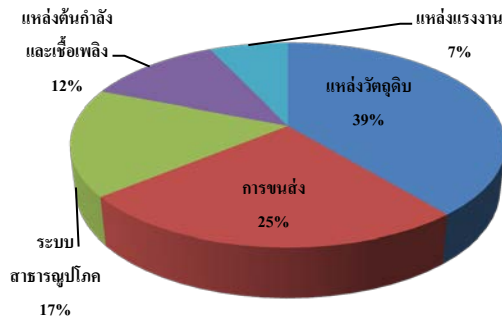
ในอนาคต นิคมอุตสาหกรรม ทิศทิศของชุมชนบรรยากาศรอบด้าน เสรีภาพทางการเมือง และเขตการค้าเสรีและเขตส่งเสริมการลงทุน ซึ่งใช้พิจารณาเลือกทำเลที่ตั้งโรงงานจากทางเลือกทั้งหมด 3 แห่ง คือ อำเภอชาติตระการ อำเภอวังทอง และอำเภอวัดโบสถ์ จากนั้นให้ผู้เชี่ยวชาญแต่ละด้านพิจารณาถ่วงน้ำหนักปัจจัย ผลการพิจารณาพบว่า ปัจจัยที่มีความสำคัญ 5 อันดับแรก ได้แก่ แหล่งวัตถุดิบ การขนส่ง แหล่งแรงงาน ระบบสาธารณูปโภค และแหล่งต้นกำลังและเชื้อเพลิง ซึ่งสร้างแผนภูมิตารางการตัดสินใจได้ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 แผนภูมิลำดับชั้นหรือแบบจำลองของการตัดสินใจ

4.2 การหาระดับค่าน้ำหนักความสำคัญแต่ละปัจจัยที่ใช้ในการตัดสินใจเลือกทำเลที่ตั้งโรงงาน

จากผลการศึกษาคำระดับความสำคัญทั้ง 5 ปัจจัยพบว่า ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการคัดเลือกทำเลที่ตั้งโรงงานผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลที่มีความสำคัญมากที่สุด คือ แหล่งวัตถุดิบ ปัจจัยรองลงมาคือ การขนส่ง ระบบสาธารณูปโภค แหล่งต้นกำลังและเชื้อเพลิง และแหล่งแรงงานตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 3 และรูปที่ 3



รูปที่ 3 สัดส่วนค่าน้ำหนักของปัจจัยตัดสินใจ

4.3 การตรวจสอบอัตราส่วนความสอดคล้องกันของเหตุผล (Consistency Ratio: CR)

เมื่อทราบค่าน้ำหนักความสำคัญของแต่ละปัจจัยแล้ว จึงตรวจสอบความสอดคล้องกันของปัจจัยด้วยการเปรียบเทียบเชิงคู่ว่าการเปรียบเทียบเกณฑ์ของผู้เชี่ยวชาญ ซึ่งนำไปคำนวณค่า Eigenvector [12] (* ในตารางที่ 3) มีความสมเหตุสมผลหรือไม่ โดย ถ้าค่า $CR \leq 0.10$ แสดงว่าปัจจัยมีความสอดคล้องกัน สามารถนำ Eigenvector ไปใช้เป็นค่าน้ำหนักได้ และถ้าค่า $CR > 0.10$ แสดงว่าค่าปัจจัยไม่มีความสอดคล้องกัน ต้องต้องปรับการให้คะแนนความสำคัญในการเปรียบเทียบเชิงคู่อีกครั้ง โดยคำนวณค่า CR ได้ดังนี้

$$CR = \frac{CI}{RI}$$

โดยที่ CI คือ ดัชนีความสอดคล้องกันของเหตุผล (Consistency Index) สามารถคำนวณได้จาก

$$CI = \frac{(\lambda_{\max} - n)}{(n - 1)}$$

เมื่อ n คือ ขนาดของสแควร์เมตริก และ $\lambda_{\max}$ คือ ค่าไอเกน (Eigen Value) สูงสุดของสัมประสิทธิ์เฉพาะ และ RI คือ ดัชนีความสอดคล้องกันจากการสุ่มตัวอย่าง (Random Consistency Index) โดยเทียบค่าจากตารางที่ 4 ซึ่งค่า CI และ CR คำนวณได้ดังนี้ [11][13]

การคำนวณหา $\lambda_{\max}$ เริ่มจากการนำเมตริกการเปรียบเทียบรายคู่คูณกับเมตริกค่าน้ำหนักความสำคัญแต่ละปัจจัย (Eigenvector)

$$\begin{bmatrix} 1 & 3 & 3 & 3 & 3 \\ 1/3 & 1 & 3 & 3 & 3 \\ 1/3 & 1/3 & 1 & 3 & 3 \\ 1/3 & 1/3 & 1/3 & 1 & 3 \\ 1/3 & 1/3 & 1/3 & 1/3 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0.388 \\ 0.250 \\ 0.172 \\ 0.116 \\ 0.072 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2.195 \\ 1.452 \\ 0.941 \\ 0.594 \\ 0.373 \end{bmatrix}$$

นำผลลัพธ์หารด้วยค่าน้ำหนักความสำคัญ จากนั้นหาค่าเฉลี่ยของผลลัพธ์ดังนี้

$$= \begin{bmatrix} 2.195 & 1.452 & 0.941 & 0.594 & 0.373 \\ 0.388 & 0.250 & 0.172 & 0.116 & 0.072 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 5.675 & 5.808 & 5.470 & 5.120 & 5.180 \end{bmatrix}$$

$$\lambda_{\max} = \left(\frac{5.675 + 5.808 + 5.470 + 5.120 + 5.180}{5} \right)$$

$$\lambda_{\max} = 5.450$$

$$CI = \frac{(\lambda_{\max} - n)}{(n - 1)} = \frac{(5.450 - 5)}{(5 - 1)} = \frac{0.450}{4} = 0.112$$

ตารางที่ 3 ค่าน้ำหนักความสำคัญเกณฑ์การประเมินในแต่ละปัจจัย

เกณฑ์	แหล่งวัตถุดิบ	การขนส่ง	ระบบสาธารณูปโภค	แหล่งต้นกำลังและเชื้อเพลิง	แหล่งพลังงาน	ค่าเฉลี่ย $\times 100\%$
แหล่งวัตถุดิบ	0.43	0.60	0.39	0.29	0.23	*38.80%
การขนส่ง	0.14	0.20	0.39	0.29	0.23	*25.00%
ระบบสาธารณูปโภค	0.14	0.07	0.13	0.29	0.23	*17.20%
แหล่งต้นกำลังและเชื้อเพลิง	0.14	0.07	0.04	0.10	0.23	*11.58%
แหล่งพลังงาน	0.14	0.07	0.04	0.03	0.08	*7.20%
ผลรวม	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	100.00%

ตารางที่ 4 ค่าดัชนีความสอดคล้องกันจากการสุ่มตัวอย่าง

(Random Consistency Index : RI)

จำนวนปัจจัยที่ถูกนำมาเปรียบเทียบ	1	2	3	4	5
RI	0.00	0.00	0.58	0.90	1.12

ดังนั้นอัตราส่วนความสอดคล้องกันของเหตุผล (CR) โดยเทียบค่า RI จากตารางที่ 4 เมื่อจำนวนปัจจัยที่ถูกนำมาเปรียบเทียบเท่ากับ 5 ปัจจัย คือ

$$CR = \frac{CI}{RI} = \frac{0.112}{1.12} = 0.10$$

ผลการศึกษา พบว่า คำนวณค่า CR ได้ 0.10 จึงสรุปได้ว่าการเปรียบเทียบรายคู่ที่มีความสอดคล้องกันของเหตุผลอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ กล่าวคือ ค่าน้ำหนักของแต่ละปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการคัดเลือกทำเลที่ตั้งนั้น มีความสอดคล้องกันและสามารถยอมรับได้

ตารางที่ 5 ค่าน้ำหนักของแต่ละปัจจัยในแต่ละทางเลือก

ทางเลือก	แหล่งวัตถุดิบ	การขนส่ง	ระบบสาธารณูปโภค	แหล่งต้นกำลังและเชื้อเพลิง	แหล่งแรงงาน
ชาติตระการ	0.57	0.14	0.29	0.14	0.14
วัดโบสถ์	0.29	0.29	0.14	0.29	0.29
วังทอง	0.14	0.57	0.57	0.57	0.57

ตารางที่ 6 ค่าน้ำหนักความสำคัญของแต่ละทางเลือกในภาพรวม

ทางเลือก	แหล่งวัตถุดิบ	การขนส่ง	ระบบสาธารณูปโภค	แหล่งต้นกำลังและเชื้อเพลิง	แหล่งแรงงาน	ลำดับความสำคัญรวม
	0.39	0.25	0.17	0.12	0.07	
ชาติตระการ	0.22	0.04	0.05	0.02	0.01	0.33
วัดโบสถ์	0.11	0.07	0.02	0.03	0.02	0.27
วังทอง	0.05	0.14	0.10	0.07	0.04	0.40

5. สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผล

การประเมินทำเลที่ตั้งโรงงานผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลภายในพื้นที่จังหวัดพิษณุโลก ด้วยกระบวนการวิเคราะห์เชิงลำดับชั้น (AHP) โดยมีปัจจัยซึ่งผ่านการกลั่นกรองจากผู้เชี่ยวชาญรวม 5 ปัจจัย ได้แก่ แหล่งวัตถุดิบ การขนส่ง

4.4 การเปรียบเทียบปัจจัยในแต่ละทางเลือกสำหรับการตัดสินใจเลือกทำเลที่ตั้งโรงงาน

ทำการเปรียบเทียบค่าน้ำหนักความสำคัญของทั้ง 5 ปัจจัย ได้แก่ แหล่งวัตถุดิบ การขนส่ง แหล่งแรงงาน ระบบสาธารณูปโภค และแหล่งต้นกำลังและเชื้อเพลิง ในแต่ละทางเลือก ดังตารางที่ 5

จากนั้นหาค่าลำดับความสำคัญรวมของทางเลือกจากการคำนวณด้วยค่าน้ำหนักของแต่ละปัจจัยในแต่ละทางเลือก และค่าน้ำหนักความสำคัญเกณฑ์การประเมินในแต่ละปัจจัยจากตารางที่ 3 พบว่า ทางเลือกที่เหมาะสมที่สุดในการตัดสินใจเลือกทำเลที่ตั้งโรงงานผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลจากเห้งามันสำปะหลัง คือ อำเภอวังทองดังแสดงในตารางที่ 6

ระบบสาธารณูปโภค แหล่งต้นกำลังและเชื้อเพลิง และแหล่งแรงงาน ซึ่งใช้ประเมินทำเลที่ตั้ง 3 ทางเลือก ได้แก่ อำเภอชาติตระการ อำเภอวังทอง และอำเภอวัดโบสถ์ สรุปว่า พื้นที่ที่มีความเหมาะสมมากที่สุดในการตั้งโรงงานผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลจากเห้งามันสำปะหลัง คือ

อำเภอวังทอง ด้วยค่าความสำคัญ 0.40 รองลงมาคือ อำเภอชาติตระการ และอำเภอวัดโบสถ์ ตามลำดับ

5.2 ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้มีการประเมินน้ำหนักความสำคัญของปัจจัยจากผู้เชี่ยวชาญเพียง 5 ท่าน ดังนั้นหากมีผู้เชี่ยวชาญมากขึ้น อาจสะท้อนค่าได้แม่นยำมากขึ้น นอกจากนี้การเลือกทำเลที่ตั้งโรงงานผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลจากเหง้ามันสำปะหลังนี้ยังขาดการเปรียบเทียบด้านการเศรษฐศาสตร์ถึงความคุ้มค่าในการลงทุนแต่ละทางเลือก ซึ่งจะทำให้การตัดสินใจมีประสิทธิภาพมากขึ้น

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] T. Manisri, S. Thepjit, and T. Jiaranai, "A Study of Biomass Fuel from Cassava Stump Business Model by Logistics and Supply Chain Management Concept," *Sripatum Review of Science and Technology*, Vol.5, pp.100-109, January-December, 2014.
- [2] P. Praneetpolgrang, and et al, *Production and Operation Management*, Diamond in Business World, Bangkok, 2004.
- [3] James A. Tompkins, John A. White, Yavuz A. Bozer, and J.M.A. Tanchoco, *Facilities Planning*, 4th Edition, John Wiley & Sons, Inc., New York, 2010.
- [4] J. Heizer, and B. Render, *Operations Management*, 13th Edition, Pearson Prentice Hall, New Jersey, 2013.
- [5] J. M. Moore, *Plant Layout and Design*, 4th Edition, The Macmillan Company, New York, 1970.
- [6] T. Mateetanyarat, "Oil Tank Farm Site Selection in Thailand by Using the Analytic Hierarchy Process," *Ladkrabang Engineering Journal*, Vol.32, No.3, pp.37-42, September, 2015.
- [7] R. Piwnim and S. Pimsakul, "Feasibility Study of Setting up a Coconut Shell Charcoal Briquette Plant in Prachuapkhirikhan," *Ladkrabang Engineering Journal*, Vol.28, No.1, pp.49-54, March, 2011.
- [8] C. Sri-udomchai and N. Thawesaengskulthai, "Application of Analytical Hierarchy Process in Decision Support for Innovation Award," the Proceeding of Industrial Network Conference 2012, Cha-am, Phetchaburi, pp.2010-2016, 2012.
- [9] Prachya Tarak, "Selection of Factory Location of Door and Window Company," M.S. Thesis, Dhurakij Pundit University, 168 pages, Bangkok, 2009.
- [10] M. Khangkhan and A. Sopadang, "Multiple Criteria Decision Making (MCDM) for a Grass Warehouse Site Selection in Chiang Rai Province, Thailand," *Thai Journal of Operations Research*, Vol.3, No.2, pp.1-8, July-December, 2015.
- [11] V. Tansirikongkol, *AHP Advanced Decision for Organization Progress and Public Well-being*, Amarin Printing and Publishing, Bangkok, 2014.
- [12] Defence Technology Institute (Public Organization), "Analytical Hierarchy Process," [On-line Available]: http://www.dti.or.th/download150319174753_3ahp4.pdf.
- [13] R. Chalongsuppanyoo and J. Payakpate, "Applying AHP for Dormitory Consideration: A Case Study – Private Dormitory at Naresuan University," *Phayao Research Conference 2014*, 8 pages, Phayao, 2014.

เครื่องเตรียมท่อนอ้อยสำหรับคั้นน้ำ

Sugar Cane Preparing Machine for Squeezing

Juice Cane

พิมพ์พรรณ ปรีองาม นงลักษณ์ เล็กรุ่งเรืองกิจ อนุพันธ์ เทอดวงศ์วรกุล

ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน

บทคัดย่อ

เครื่องลอกกาบและตัดผิวท่อนอ้อยแบบป้อนต่อเนื่อง เป็นการพัฒนามาจากเครื่องตัดผิวท่อนอ้อยแบบป้อนต่อเนื่อง เนื่องจากท่อนอ้อยหลังผ่านการลอกกาบแล้วเสียหายมากส่งผลให้การตัดผิวมีประสิทธิภาพต่ำ จึงได้พัฒนาชุดป้อนเพื่อ บังคับการป้อนท่อนอ้อยเข้าสู่ชุดลอกกาบ เพิ่มสปริง 2 ข้างเพื่อให้ใบมีดสามารถปรับระยะห่างตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ของท่อนอ้อยได้ ให้ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ปรับใบมีดชุดลอกกาบให้มีลักษณะโค้ง กำหนดความเร็วรอบของ ใบมีดชุดลอกกาบ 3 ระดับ คือ 864, 1080 และ 1152 รอบต่อนาที ตามลำดับ และกำหนดความเร็วรอบชุดป้อน 3 ระดับ คือ 16, 24 และ 36 รอบต่อนาที ตามลำดับ จากผลการทดลองพบว่า ที่ความเร็วรอบของชุดป้อน 16 รอบต่อนาทีและที่ความเร็วรอบ ของชุดลอกกาบ 1080 รอบต่อนาที มีประสิทธิภาพสูงสุด เพราะมีพื้นที่ผิวที่ตัดออกเท่ากับร้อยละ 91.06 น้ำหนักอ้อยที่ถูกตัด ออกเท่ากับร้อยละ 19.01 และมีอัตราการทำงาน 115.86 กิโลกรัมต่อชั่วโมง

คำสำคัญ : อ้อยคั้นน้ำ ป้อน ลอกกาบ

Abstract

The continuous feeding sugar cane polishing and peeling machine was developed from the previous polishing one which had low performance because the sugar cane stalk was damaged. The new model adds the feeding unit in front of the peeling unit and spring to suit the diameter of sugar cane stalk. The speeds of the feeding unit were conducted at 16 rpm, 24 rpm and 36 rpm in conjunction with three speeds of the blade mechanism at, 864 rpm, 1080 rpm and 1152 rpm respectively. This study can be concluded that the optimum rotational speeds of the feeding units and the blade mechanism are 16 rpm and 1080 rpm, respectively. These parameters resulted in the highest working capacity of 115.86 kg/h with the polishing capacity of 91.06% and the weight loss of 19.01%.

Keywords : Juice cane, Feeding, Peeling

1. บทนำ

การนำอ้อยไปใช้ในอุตสาหกรรมอ้อยคั้นน้ำ นอกเหนือไปจากการผลิตน้ำตาลแต่เพียงอย่างเดียวจะช่วยให้ผลิตผลการเกษตรมีมูลค่าเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้อ้อยคั้นน้ำจะเก็บเกี่ยวที่อายุ 8 เดือน ในขณะที่อ้อยโรงงานเก็บเกี่ยวที่อายุ 12 เดือน [1] หากเกษตรกรหันมาปลูกอ้อยคั้นน้ำจะสามารถทำรายได้ให้แก่เกษตรกรได้เป็นอย่างดี แต่ในปัจจุบันอุตสาหกรรมอ้อยคั้นน้ำเป็นอุตสาหกรรมที่ยังคงใช้แรงงานคนมากทำให้การเพิ่มกำลังการผลิตทำได้ยาก เนื่องจากต้องอาศัยความชำนาญของแรงงานในการปอกเปลือกอ้อยซึ่งมีอัตราการทำงานเฉลี่ย 72.26 กก./ชม./คน [2] จึงทำให้ต้นทุนการผลิตสูง เครื่องเตรียมท่อนอ้อยสำหรับคั้นน้ำ เป็นการพัฒนาจากเครื่องขัดผิวอ้อยแบบป้อนต่อเนื่อง [3-4] ลักษณะการทำงานของเครื่องนี้เริ่มจากอ้อยถูกป้อนเข้าสู่เครื่องด้วยลูกกลิ้งเหล็กโดยที่ผู้ปฏิบัติการไม่ต้องคอยประคอง ผ่านเข้าสู่ชุดแปรงขัดทำหน้าที่ขัดผิวของเปลือกอ้อยออกด้วยความเร็วรอบ 1,080 รอบ/นาที อ้อยที่ผ่านการขัดแล้วจะออกทางท้ายเครื่อง อัตราการทำงานสูงสุด 276.96 กิโลกรัม/ชั่วโมง แต่ยังคงอาศัยแรงงานคนในการลอกกาบและสาวใบอ้อยก่อนนำอ้อยไปขัดผิวด้วยเครื่องขัดผิวท่อนอ้อยแบบป้อนต่อเนื่อง ในปีเดียวกัน

เครื่องลอกกาบและใบอ้อยส่วนใหญ่จะเป็นเครื่องมือที่ทำงานร่วมกับเครื่องตัดอ้อยติดท้ายรถแทรกเตอร์ชนิดตัดเป็นลำ โดยทำหน้าที่ลอกกาบใบอ้อยออกจากต้นอ้อยให้สะอาดก่อนจะตัดด้วยเครื่องตัดอ้อย มีกลไกการทำงานแตกต่างกันออกไป เช่น ชุดลูกกลิ้งดึงเข้าออกร่วมกับชุดแปรงปิดใบ หรือการใช้แรงลมดูด [5-6] ต่อมา [7] ได้ออกแบบเครื่องลอกกาบและสาวใบอ้อย โดยใช้ล้อจักรยานยนต์ติดใบมีดรูปตัว S ใช้รถไถเดินตามเป็นต้นกำลัง มีอัตราการทำงาน 1,172 กิโลกรัม/ชั่วโมง

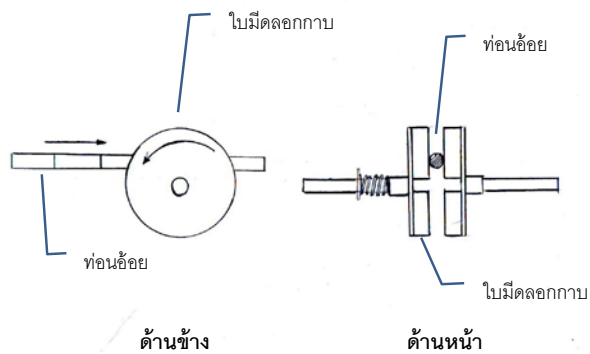
ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาออกแบบ สร้างและทดสอบการทำงาน เครื่องเตรียมท่อนอ้อยสำหรับคั้นน้ำ ให้สามารถลอกกาบอ้อยและขัดผิวท่อนอ้อยได้ต่อเนื่อง และมีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยได้มีการเพิ่มส่วนลอกกาบและสาวใบอ้อยที่ต่อจากชุดป้อน

โดยปรับเปลี่ยนนำชุดป้อนไว้หน้าสุดของเครื่อง เพื่อลดความเมื่อยล้า ปริมาณคน ประหยัดเวลาในการทำงาน และเพิ่มองค์ประกอบของชุดส่งกำลังให้มีประสิทธิภาพดีขึ้น โดยใช้มอเตอร์เพียง 1 ตัว ขนาด $\frac{1}{2}$ แรงม้า กับชุดลอกกาบและชุดป้อนอ้อยเข้าสู่เครื่องขัดผิวท่อนอ้อยแบบป้อนต่อเนื่อง

2. หลักการทำงานและการออกแบบชุดลอกกาบ

ลักษณะการลอกกาบตามแนวยาวแบบตามใบของท่อนอ้อย การป้อนท่อนอ้อยเข้าสู่เครื่องทำได้ทีละลำและหลังจากท่อนอ้อยเข้าสู่ชุดป้อนแล้ว ท่อนอ้อยจะสามารถเคลื่อนที่เข้าสู่ชุดลอกกาบและชุดขัดได้เองโดยไม่ต้องอาศัยผู้ปฏิบัติงาน ความเร็วรอบของชุดป้อน จะมีค่าที่มีความสอดคล้องกับความเร็วรอบของชุดลอกกาบ ใบมีดของชุดลอกกาบมี 2 แบบคือ ใบมีดตรงและใบมีดโค้ง ระยะห่างใบมีดสามารถปรับระยะได้ตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อนอ้อยโดยอัตโนมัติ เช่นเดียวกับชุดป้อนที่สามารถขับเคลื่อนได้ตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อนอ้อยโดยอัตโนมัติ ชุดป้อนและชุดลอกกาบขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ตัวเดียวกัน อ้อยที่ออกจากชุดลอกกาบถูกส่งเข้าสู่ชุดขัดต่อไป เศษกาบและผิวอ้อยที่ถูกขัดออกแล้วจะร่วงลงสู่ตัวรองรับด้านล่างที่มีลักษณะเอียงทั้ง 2 ช่องแยกกัน ส่วนท่อนอ้อยที่ผ่านการขัดแล้วจะออกทางด้านท้ายเครื่อง

การออกแบบชุดลอกกาบ ประกอบด้วยแผ่นเหล็กกลม 2 แผ่นที่ติดใบมีด หันหน้าเข้าหากัน ขณะทำงานจะหมุนในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา ดังรูปที่ 1 จากการส่งผ่านกำลังด้วยสายพาน หลังจากอ้อยถูกดึงเข้าสู่เครื่องด้วยชุดป้อนแล้วท่อนอ้อยจะถูกใบมีดลอกกาบ ตา และหวดออกทางด้านข้างของท่อนอ้อย



รูปที่ 1 ทิศทางและลักษณะการทำงานของใบมีดลอกกาบ

ใบมีดลอกกาบมี 2 แบบ คือ (1) ใบมีดตรง ประกอบด้วยใบมีด จำนวน 6 อัน ติดอยู่บนแผ่นเหล็กกลม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 255 มม.หนา 5 มม. ดัง**รูปที่ 2** ใช้สกรูยึดระหว่างใบมีดและแผ่นเหล็กกลม เพื่อปรับลักษณะการทำงานของใบมีดให้มีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น สามารถใช้งานได้กับท่อนอ้อยทุกขนาด ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อนอ้อยไม่เท่ากัน (2) ใบมีดโค้ง ประกอบด้วย ใบมีดตะขอจำนวน 4 เล่ม ติดกับเหล็กกลม ขนาดเดียวกับใบมีดตรง ใบมีดโค้งทำมุมกับเหล็กกลม 35° **รูปที่ 3** ซึ่งงานใบมีดทั้ง 2 แบบจะสวมอยู่บนเพลานาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 19.05 มม. บริเวณคุมของแผ่นเหล็กกลมจะมีสปริงติดอยู่ ซึ่งสปริงนี้จะสวมอยู่บนเพลานาเพื่อควบคุมการเคลื่อนที่ของชุดลอกกาบตามแนวแกนเพลานา



รูปที่ 2 ใบมีดตรง



รูปที่ 3 ใบมีดโค้ง

ระบบการส่งกำลังของชุดลอกกาบ ใช้มอเตอร์ขนาด $\frac{1}{2}$ แรงม้า 1 ตัว ใช้ล้อยางพาน 2 นิ้ว 2 ร่อง ต่อจากมอเตอร์ โดยร่องที่ 1 ใช้กับชุดป้อนต่อสายพานจากมอเตอร์ มาสู่ตัวเกียร์ทด อัตราทด 1:10 เพื่อลดความเร็วรอบจาก 1440 รอบต่อนาที เป็น 144 รอบต่อนาที จากนั้นก็ต่อเฟืองคอกจอกกับทางออกของตัวเกียร์ทด เพื่อเปลี่ยนทิศทางการทำงานของสายพานให้มีทิศทางเดียวกับชุดป้อน และร่องที่ 2 ของล้อยางพานจากมอเตอร์ต่อสายพานไปยังล้อยางพานของชุดลอกกาบ

เมื่อดำเนินการสร้างเสร็จแล้วดัง**รูปที่ 4** ได้ทำการทดสอบใช้งานเบื้องต้น พบว่า ใบมีดตรงจะทำให้อ้อยหักระหว่างลอกกาบ ส่วนใบมีดโค้ง จะจิกเข้าไปในเนื้ออ้อย ทำให้เครื่องหยุดทำงาน [8] จึงได้ทำการปรับเหลือแต่แบบใบมีดโค้งและลดจำนวนใบมีดลงเหลือจานละสองใบ



รูปที่ 4 เครื่องเตรียมท่อนอ้อยสำหรับคั้นน้ำที่เสร็จสมบูรณ์

3. วิธีการทดลอง

อ้อยที่ใช้ในการทดลองคืออ้อยพันธุ์สุพรรณบุรี 50 และมีอายุประมาณ 7 - 8 เดือน ทำการคัดเลือกอ้อยที่มีขนาดต่างๆ จำนวน 90 ลำ จากนั้นนำมาตัดให้ยาว 120 เซนติเมตร วัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอ้อยและนำไป

ซึ่งก่อนทดลอง ป้อนอ้อยเข้าสู่ชุดป้อนของเครื่องขัดผิว ท่อนอ้อยแบบป้อนต่อเนื่อง 2 รอบ แต่ละรอบจับเวลาการทำงานตั้งแต่อ้อยป้อนเข้าสู่ชุดป้อนจนกระทั่งออกจากชุดลอกกาบ และชั่งน้ำหนักอ้อยหลังการทดสอบ สำหรับเงื่อนไขที่ใช้ในการทดลองดังแสดงตารางที่ 1

ตารางที่ 1 เงื่อนไขการทดลอง

ชุดที่	ความเร็วรอบชุดป้อน (รอบ/นาที)	ความเร็วรอบชุดลอกกาบ (รอบ/นาที)
1	16	864
2	16	1080
3	16	1152
4	24	864
5	24	1080
6	24	1152
7	36	864
8	36	1080
9	36	1152

วัดพื้นที่เปลือกอ้อยที่เหลือแต่ละลำโดยใช้ถุงพลาสติกวางทับที่อ้อยแล้วใช้ปากกาเมจิกวาดตามขอบนำไปสแกนด้วยเครื่องสแกน บันทึกข้อมูลที่ได้เป็นรูปภาพไฟล์ .bmp เพื่อนำไปหาพื้นที่เปลือกที่เหลือด้วยโปรแกรมการหาพื้นที่ใบไม้และผิวผลไม้ [9] ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 การหาพื้นที่ผิวด้วยโปรแกรมหาพื้นที่ใบไม้ นำข้อมูลที่ได้มาคำนวณ ดังสมการต่อไปนี้

อัตราการทำงาน

$$\text{Working Capacity} = \frac{W}{t} \quad (1)$$

เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักอ้อยที่ถูกขัดออก

$$\text{Weight Loss} = \frac{W_1 - W_2}{W_1} \times 100 \quad (2)$$

เปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ผิวที่ถูกขัดออก

$$\text{Polishing Capacity} = \frac{A_1 - A_2}{A_1} \times 100 \quad (3)$$

โดยที่

W คือ น้ำหนักอ้อยทั้งชุดการทดสอบ (kg)

t คือ เวลารวมที่ใช้ในการทดสอบ (h)

W_1 คือ น้ำหนักอ้อยก่อนเข้าเครื่องครั้งที่ 1 (g)

W_2 คือ น้ำหนักอ้อยหลังเข้าเครื่องครั้งที่ 2 (g)

A_1 คือ พื้นที่ผิวทั้งหมดของท่อนอ้อย (mm^2)

A_2 คือ พื้นที่ผิวที่เหลือจากการขัดผิว (mm^2)

4. การวิเคราะห์สถิติ

วิเคราะห์ความแปรปรวนโดยใช้แบบ One-way (ANOVA) ในการตรวจสอบผลของระดับความเร็วรอบชุดป้อนและชุดลอกกาบต่อร้อยละของน้ำหนักอ้อยที่ถูกขัดออก ร้อยละพื้นที่ผิวที่ถูกขัดออกและอัตราการทำงาน แล้วเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของแต่ละวิธีใช้การทดสอบแบบคันแคน (Duncan multiple range test) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($p \leq 0.05$)

5. ผลการทดลอง

อ้อยที่นำมาทดสอบมีเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ย 28.8 มม. จากผลการทดลองลอกกาบก้อยและขัดผิวอ้อยด้วยเครื่องเตรียมท่อนอ้อยสำหรับคั้นน้ำที่ความเร็วรอบชุดป้อน 16, 24 และ 36 รอบ/นาที ความเร็วรอบชุดลอกกาบ 864, 1080 และ 1152 รอบ/นาที ใช้ความเร็วรอบแปรงขัด 1080 รอบ/นาที [10] ผลของความเร็วรอบชุดป้อนและชุดลอกกาบที่มีผลต่อการทดลอง มีรายละเอียดดังนี้

ตารางที่ 2 ร้อยละของน้ำหนักร้อยที่ถูกขจัดออก ร้อยละพื้นที่ผิวที่ถูกขจัดออกและอัตราการทำงาน ภายใต้เงื่อนไขการทดลองต่างๆ

ชุดที่	น้ำหนักร้อยที่ถูกขจัดออก (%)	พื้นที่ผิวที่ถูกขจัดออก (%)	อัตราการทำงาน (kg/h)
1	15.5 ^{ab}	76.4 ^{abc}	95.9 ^a
2	19.0 ^{abc}	91.1 ^c	115.9 ^{ab}
3	13.5 ^a	88.7 ^{bc}	95.3 ^a
4	19.6 ^{abc}	81.0 ^{bc}	129.6 ^{ab}
5	13.6 ^a	62.1 ^a	131.0 ^{ab}
6	18.0 ^{abc}	81.2 ^{bc}	115.2 ^{ab}
7	28.2 ^c	85.0 ^{bc}	143.7 ^b
8	17.5 ^{abc}	80.4 ^{bc}	152.2 ^{bc}
9	26.9 ^{bc}	72.0 ^{ab}	184.0 ^c

หมายเหตุ อักษรที่ต่างกัน หมายถึง ความแตกต่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$)

จากการทดสอบพบว่า ชุดการทดลองที่ 2 มีจำนวนร้อยละพื้นที่ผิวที่ถูกขจัดออกสูงสุด คือ 91.06 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่น้ำหนักร้อยที่ถูกขจัดออกไปมีเพียง 19 เปอร์เซ็นต์ และ ชุดการทดลองที่ 5 มีค่าของร้อยละพื้นที่ผิวที่ถูกขจัดออกต่ำสุดคือ 62.07 เปอร์เซ็นต์ เพื่อพิจารณาอัตราการทำงาน พบว่า จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วรอบชุดป้อนเพิ่มขึ้น ถึงแม้ว่าชุดการทดลองที่ 9 จะมีอัตราการทำงานสูงสุด 184.18 กก./ชม. แต่พื้นที่ผิวที่ถูกขจัดออกมีเพียง 72 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่น้ำหนักร้อยที่ถูกขจัดออกมีค่าสูงถึง 26.9 เปอร์เซ็นต์ นั่นเป็นเพราะว่าเงื่อนไขนี้ไม่ได้ชัดเจนเฉพาะผิวอ้อยแต่กินเนื้ออ้อยด้วยเช่นเดียวกับชุดการทดลองที่ 7 หากนำท่อนอ้อยกลับมาขัดซ้ำอีกรอบ นอกจากจะทำให้อัตราการทำงานลดลงแล้ว ยังทำให้ได้เนื้ออ้อยน้อยลงด้วย

6. สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดสอบและการเปรียบเทียบ เปอร์เซ็นต์พื้นที่ผิวที่ถูกขจัดออก เปอร์เซ็นต์น้ำหนักร้อยที่ถูกขจัดออก และอัตราการทำงานของเครื่องเตรียมท่อนอ้อยสำหรับคั้นน้ำแบบป้อนต่อเนื่อง โดยใช้ใบมีดโค้งสองใบ ในการเลือกชุดการทดลองที่เหมาะสม จะต้องพิจารณาเงื่อนไขที่ให้ความสะดวกสูงสุดโดยดูจากค่าพื้นที่ผิวที่ถูกขจัดออกและให้อัตราการทำงานที่สูง

ดังนั้น ชุดการทดลองที่ 2 ใช้ความเร็วรอบชุดป้อน 16 รอบ/นาที และความเร็วรอบชุดลอกกาบ 1080 รอบ/นาที จึงเป็นชุดการทำงานที่ดีที่สุด เพราะมีเปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ผิวที่ถูกขจัดออกเท่ากับ 91.06 เปอร์เซ็นต์ ให้ความสะดวกสูงสุด มีเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักร้อยที่ถูกขจัดออกเท่ากับ 19.01 เปอร์เซ็นต์และมีอัตราการทำงาน 115.86 กิโลกรัมต่อชั่วโมง

7. ข้อเสนอแนะ

หลังการดำเนินการทดสอบเครื่องเตรียมท่อนอ้อยสำหรับคั้นน้ำ พบว่าการการเพิ่มส่วนลอกกาบและสางใบอ้อยทำให้อัตราการทำงานของเครื่องลดลง ดังนั้นแนวทางในการพัฒนาต่อไปนอกจากจะออกแบบโครงสร้างให้เครื่องมีขนาดเล็กลง น้ำหนักเบา เคลื่อนย้ายสะดวก เหมาะแก่เกษตรกรที่ตระเวนขายน้ำอ้อยคั้นโดยบรรทุกเครื่องไว้บนรถกระบะ และใช้ต้นกำลังจากเครื่องยนต์แทนการใช้ไฟฟ้าอย่างเดียวแล้ว ยังต้องพิจารณากลไกการลอกกาบและใบอ้อยด้วย

8. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากสถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

9. เอกสารอ้างอิง

- [1] K. Sooksathan, U. Phoolkets and B. Komolwas, "Commercial Sugarcane in Thailand," Bangkok, 1977.
- [2] S. Khawpratecp, "Performance Study of Small Sugar Cane Juicing Machine in Juicing Sugar Cane Skin of which was Cleaned by Scraping, Polishing and Peeling," M.Eng. Thesis, Department of Agricultural Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University Kamphaeng Saen Campus, 2002.
- [3] P. Pruengam, "Development and Testing of The Continuous Feeding Sugar Cane Polishing Machine," M.Eng. Thesis, Department of Agricultural Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University Kamphaeng Saen Campus, 2007.
- [4] P. Pruengam and M. Kwangwaropas, "Design and Manufacture of the Circumferential Sugar Cane Polishing Machine," Engineering Journal of Research and Development, Vol. 19, No.2, pp. 73-79, 2008.
- [5] B. Bahalayodhin and S. Leeyawattananupong, "Sugar Cane Trash Extractor," In Proceedings of the Agricultural Engineering Conference, Nakhon Pathom, Thailand, May 18-20, 1994, 79-80.
- [6] J. Mooyotha, "Blower-Type Sugar Cane Trash Extrator," M.Eng. Thesis, Department of Agricultural Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University Kamphaeng Saen Campus, 2006.
- [7] Anonymous, "Sugarcane Leaf Pruning Machine," Special Problems Project, Rajamangala University of Technology Isan Kalasin, 2007, [Online]. Available : www.irpus.or.th/projectfile/2550_2008_06_03_I040_I250c08012_Complete.pdp. [2008, August 1].
- [8] D. Chomhong, S. Samantrab and T. Thiankhonburi, "Development of The Continuous Feeding Sugar Cane Polishing Machine for Juice Cane," Agricultural Engineering Project, Department of Agricultural Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University Kamphaeng Saen Campus, 2010.
- [9] B. Charimobhas, J. Bussarakamwadee, and U. Teerapitayanon, "Automatic Programme of Computer for Leaf and Fruit Surface Area," Thai Agricultural Research Journal, Vol. 25, No. 1, pp. 102-108, 2005.
- [10] N. Pradubwong and P. Klakhan, "Improvement the continuous feeding sugar cane polishing machine," Agricultural Engineering Project, Department of Agricultural Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University Kamphaeng Saen Campus, 2009.

อิทธิพลของปัจจัยที่มีผลต่อการป้องกันไม้ยางพาราด้วยวิธีการ แบบเต็มเซลล์

Influence of Parameter in Rubber-Wood Full-Cell Preservation Process

ภาณุ คำกรฤชา อภิชาติ อัจฉนาเสียว
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความสามารถในการซึมลึกและการเกาะตัวของสารละลาย Disodium Octaborate Tetra hydrate ในกระบวนการรักษาไม้ยางพาราแบบเต็มเซลล์ ทำการศึกษาโดย ลงความดันสุญญากาศที่ 0.2 บาร์ เปลี่ยนแปลงเวลาในการรักษาระดับความดันสุญญากาศเริ่มต้นต่อเวลาในการรักษาระดับความดันเป็น 0/60, 10/50 และ 20/40 (นาที่/นาที่) และเปลี่ยนแปลงระดับความดันเป็น 8, 10 และ 12 บาร์ พบว่า ที่ความดัน 10 บาร์และสภาวะเวลา 0/60 (นาที่/นาที่) ปริมาณโบรอนในเนื้อไม้และความเข้มข้นของโบรอนในแกนกลางเนื้อไม้มีค่าสูงสุดคือ 1.11 %BAE (boric acid equivalent) และ 14.82 ppm ตามลำดับ ซึ่งมีค่ามากกว่าค่าความเข้มข้นของโบรอนที่แกนกลางเนื้อไม้ที่ผ่านการทดสอบด้วยสีและได้รับการยอมรับว่าไม้ผ่านเกณฑ์ของบริษัทเอกชนซึ่งมีค่าเพียง 1.982 ppm แต่เมื่อเวลาเปลี่ยนแปลงจาก 0/60 เป็น 10/50 และ 20/40(นาที่/นาที่) ปริมาณและความเข้มข้นของโบรอนจะมีค่าลดลง และเมื่อความดันเพิ่มขึ้นจาก 8 บาร์เป็น 10 บาร์ ปริมาณและความเข้มข้นของโบรอนจะมีค่าเพิ่มขึ้น แต่เมื่อความดันเพิ่มขึ้นจาก 10 บาร์เป็น 12 บาร์ พบว่าปริมาณและความเข้มข้นของโบรอนมีแนวโน้มลดลง

คำสำคัญ : ไม้ยางพารา กระบวนการแบบเต็มเซลล์ สารละลายไดโซเดียมออกตาโบเรตเตตระไฮเดรต การรักษาเนื้อไม้

Abstract

This research studied influences on penetration and retention of disodium octaborate tetra hydrate in Full-Cell process. The conditions of experiment were held 0.2 bar vacuum pressure, applied 8, 10, 12 bar pressure and hold 0/60, 10/50, 20/40 (min/min) vacuum/pressure time. The results show that, 10 bar pressure and time 0/60 give the highest %BAE (boric acid equivalent) results about 1.11, 14.82 ppm. Compare with wood standard from factory witch boron concentration was 1.982 ppm. When time condition were 0/60 to 20/40, provide a decreasing trend of boron retention .When time condition were 0/60 and pressure increased from 8 bar to 10 bar pressure, provide an increasing trend of boron retention. When the pressure was raised from 10 bar to 12 bar pressure, provide a decreasing trend of boron retention

Keyword : Rubber Wood, Full-Cell Process, Disodium Octaborate Tetra hydrate, Wood Preservation

1. บทนำ

ไม้จากต้นยางพารามีส่วนประกอบของ น้ำตาล เซลลูโลส และคาร์โบไฮเดรตสูง จึงมีความเสี่ยงจากแมลงจำพวกมอดจีฟุซ (Lyctidae) มากัดกินทำลายเนื้อไม้เป็นอาหารโดยเฉพาะในระหว่างการรอกการแปรรูปในลานไม้ หลังจากตัดจากต้นเพียง 24 ชม. ทำให้กระบวนการรักษาเนื้อไม้ก่อนนำไปแปรรูปมีความสำคัญต่อการเพิ่มความทนทาน และยืดอายุการใช้งานของไม้ให้นานขึ้น การรักษาเนื้อไม้ทำได้หลายวิธี เช่น การอบแห้งไม้ การรมควัน หรือการใช้สารเคมีเป็นต้น จากมาตรฐาน EN20-2 ระบุว่าสารประกอบ DOT (Disodium Octaborate Tetrahydrate) มีความสามารถในการละลายน้ำสูง มีประสิทธิภาพต่อต้านแมลงได้เป็นอย่างดี โดยเฉพาะมอดจีฟุซซึ่งเป็นศัตรูหลักของไม้ยางพารา เมื่อมีปริมาณโบรอนเนื้อไม้ร้อยละ 0.2 BAE (boric acid equivalent) ขึ้นไป[1] วิธีการแพร่สารละลายเข้าสู่เนื้อไม้ทำได้หลายวิธี เช่น กระบวนการ Empty cell กระบวนการแช่สารละลาย กระบวนการพ่นหรือทาสารละลาย และ กระบวนการ Full-Cell เป็นต้น กระบวนการ Full cell เป็นกระบวนการที่พาสารเคมีเข้าสู่เนื้อไม้ได้ดีกว่าวิธีอื่นที่กล่าวมาข้างต้น เพราะใช้สภาวะสุญญากาศดึงอากาศออกจากเซลล์เนื้อไม้เพิ่มช่องว่างให้สารละลายซึมเข้าสู่เนื้อไม้ได้ดีขึ้น จากนั้นใช้ความดันในการอัดสารละลายเข้าสู่เนื้อไม้และสุดท้ายใช้สภาวะสุญญากาศดึงอากาศออกอีกครั้งเพื่อนำสารละลายที่เกินออกไปจากผิวไม้ โดย Abeyasinghe ได้ศึกษาการแพร่โบรอนเข้าสู่เนื้อไม้ด้วยกระบวนการ Full-Cell ที่สภาวะสุญญากาศเริ่มต้น 0.1 บาร์ นาน 15 นาที จากนั้นใช้ความดัน 6 บาร์อัดสารละลายนาน 15 นาทีและระดับสุญญากาศสุดท้าย 0.1 บาร์เป็นเวลา 20 นาทีเพื่อเปรียบเทียบกับวิธีการแช่ พบว่ากระบวนการ Full-cell นำพาสารละลายเข้าสู่แกนกลางเนื้อไม้ได้มากกว่า 10 เท่า และสะสมอยู่ในเนื้อไม้ได้มากกว่า 5 เท่าเมื่อเทียบกับวิธีการแช่[2] และ Dhamodaran ได้ทดลองอัดสารละลายโบรอนในไม้ยางพาราด้วยกระบวนการ Full-Cell โดยใช้ความดันสุญญากาศเริ่มต้นเป็นเวลา 15 นาที พบปริมาณโบรอนในเนื้อไม้มากที่สุดเมื่อเทียบกับสภาวะอื่น และความเข้มข้นจะ

ลดลงเมื่อเวลาในการรักษาระดับสุญญากาศเริ่มต้น มากกว่า 15 นาทีขึ้นไป[3] จากการศึกษางานวิจัยเพิ่มเติมยังไม่พบการเปรียบเทียบเงื่อนไขด้านเวลาในการรักษาระดับสุญญากาศเริ่มต้นและเวลาในการรักษาระดับความดัน ในกระบวนการ Full-cell ที่เหมาะสมกับไม้ยางพาราในประเทศไทย จึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้

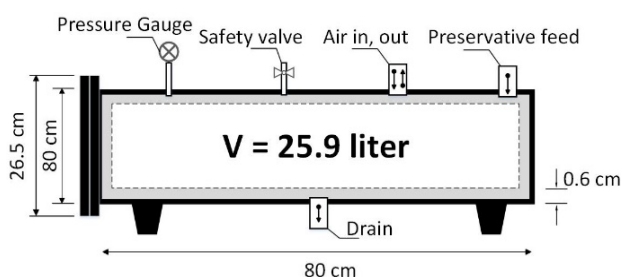
2. วิธีดำเนินการวิจัย

2.1 การคัดเลือกไม้ตัวอย่างและการเตรียมสารละลาย

ไม้ยางพาราได้รับมาจากบริษัทแห่งหนึ่งในประเทศไทย อายุประมาณ 7 ปี ตัดมาไม่เกิน 7 วัน จากนั้นเลื่อยไม้ให้มีขนาดสัดส่วนเป็น 1:10 ของไม้ที่ใช้ในโรงงานคือ $3\text{cm} \times 8\text{cm} \times 10\text{cm}$ จากนั้นทำการปรับสภาพไม้ โดยนำไปอบควบคุมความชื้นให้มีความชื้นไม่เกินร้อยละ 27[4] ซึ่งคำนวณค่าปริมาณความชื้นจากสมการอบแห้งแบบ dry basis ตามมาตรฐานการหาความชื้น ASTM D4442 [5] งานวิจัยนี้ใช้สารละลาย DOT จากบริษัท Celcure Group ประเทศมาเลเซีย ซึ่งเตรียมสารละลายความเข้มข้นร้อยละ 1.2 โดยใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย

2.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการ Full-Cell process

ทำการออกแบบและสร้างถังปฏิกรณ์หลัก ปริมาตร 25.9 ลิตร โดยใช้เหล็กหนา 0.6 cm ที่สามารถทนแรงดันสูงกว่า 20 บาร์ ซึ่งมีส่วนประกอบต่างๆ แสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 แสดงถังปฏิกรณ์ความดันที่ใช้ในการทดลอง

2.3 วิธีการทดลอง

สภาวะในการทดลอง อ้างอิงมาจากการทำงานจริงในบริษัทเอกชนที่ได้ให้ไม้ยางพารามาทำการทดสอบ โดย

บริษัทเริ่มโดยนำไม้เข้าถังความดัน แล้วทำการดึงอากาศออกด้วยปั๊มสุญญากาศ จนมีความดันคงที่ 0.2 บาร์ ใช้เวลาประมาณ 2 นาที จากนั้นทำการอัดสารละลายเข้าไปจนมีความดัน 10 บาร์ จึงระบายสารละลายกลับไปที่เก็บไว้ในถัง แล้วนำไม้ออกมาจากถังความดัน รวมเวลาทั้งสิ้น 60 นาที ดังนั้นเพื่อเปรียบเทียบผลลัพธ์ของความเข้มข้นของโบรอนในเนื้อไม้ที่ได้รับผลจากเงื่อนไขด้านเวลาและความดันระหว่างการทดลองและสภาวะที่ใช้ในโรงงาน จึงคงเวลารวมในการทดลองให้เท่ากับเวลารวมในการทำงานจริง ด้วยการทำการศึกษาอิทธิพลของเวลาในการรักษาระดับสุญญากาศเริ่มต้นและเวลาในการรักษาระดับความดัน ที่มีผลต่อปริมาณของโบรอนที่แพร่เข้าไปในไม้ ซึ่งเมื่อเวลาในการรักษาระดับสุญญากาศ เพิ่มขึ้น ค่าเวลาในการรักษาระดับความดันจะลดลง เพื่อให้เวลารวมเท่ากับ 60 นาทีเท่าเดิมทุกการทดลอง มีสภาวะการทดลองคือ เวลาในการรักษาระดับสุญญากาศ/เวลาในการรักษาระดับความดันเท่ากับ 0/60, 10/50 และ 20/40 ตามลำดับ ความดันเท่ากับ 8, 10 และ 12 บาร์ รักษาระดับของสุญญากาศเริ่มต้นและสุดท้ายให้คงที่ที่ 0.2 บาร์ ส่วนเวลาในการรักษาระดับสุญญากาศสุดท้ายควบคุมให้คงที่ที่ 5 นาทีทุกการทดลอง โดยขั้นตอนการทดลองมีดังนี้

2.3.1. นำไม้ตัวอย่างเข้าถังความดัน และดึงอากาศออกด้วยปั๊มสุญญากาศ จนมีระดับสุญญากาศคงที่ที่ 0.2 บาร์ แล้วรักษาเวลาสุญญากาศตามกำหนด

2.3.2. เติมสารละลายในถังความดันขณะที่ถังยังเป็นสภาวะสุญญากาศ

2.3.3. อัดความดันด้วยอากาศจนมีความดันคงที่ครบกำหนดและรักษาความดันไว้ตามกำหนด

2.3.4. ปลดอากาศและสารละลายออกจนหมด แล้วดึงอากาศออกด้วยปั๊มสุญญากาศจนมีระดับสุญญากาศคงที่ที่ 0.2 บาร์ เป็นเวลา 5 นาที

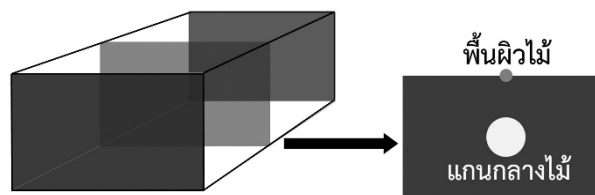
2.4 การวิเคราะห์ปริมาณและความเข้มข้นของโบรอนในไม้

ปริมาณและความเข้มข้นของโบรอนในเนื้อไม้สามารถทดสอบหาได้หลายวิธี เช่น การไตเตรตสารละลายตาม

มาตรฐาน Indian Standard IS:2753-1[6] การทดสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์สสาร และการทดสอบการเทียบสีด้วยสารละลาย Curcumin [7] ซึ่งบริษัทเอกชนส่วนใหญ่ใช้วิธีการทดสอบสีก่อนที่จะนำไปออกจำหน่าย

2.4.1 การวิเคราะห์ความเข้มข้นโบรอนในแกนกลางเนื้อไม้

งานวิจัยนี้ใช้การทดสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์สสาร ICP-OES (Inductively Couple Plasma Optical Emission Spectrometer) โดยเตรียมสารละลายและตัวอย่างไม้ตามมาตรฐาน AWP A7[8] เริ่มต้นด้วยการย่อยไม้ตัวอย่างให้มีขนาด 30 mesh ออกเป็นสองกลุ่มคือ ชิ้นผิวนอกและแกนกลางของไม้(แกนกลางไม้ คือบริเวณ 1 ใน 9 ของพื้นที่หน้าตัดไม้) ดังแสดงในรูปที่ 2 จากนั้นวิเคราะห์หาความเข้มข้นของโบรอนตามมาตรฐาน AWP A11[9]



รูปที่ 2 ตำแหน่งเนื้อไม้ที่นำมาทดสอบหาปริมาณโบรอน

2.4.3 การวิเคราะห์ปริมาณโบรอนในเนื้อไม้

เป็นการวัดปริมาณกรดบอริกในรูปของ ค่าร้อยละสมมูลกรดบอริก %BAE (Boric acid equivalent) ที่พบในเนื้อไม้ ซึ่งคำนวณได้จากน้ำหนักของสารละลายในเนื้อไม้ก่อนและหลังกระบวนการ ด้วยสมการที่ 1 และ 2 [3]

$$S = \frac{D}{V} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\%BAE = \frac{S \times C}{W_d} \times 100 \quad \dots\dots\dots (2)$$

เมื่อ S คือ Solution Pickup (kg/m³)

D คือ น้ำหนักไม้เปียก-น้ำหนักไม้หลังอบแห้ง (kg)

V คือ ปริมาตรไม้ (m³)

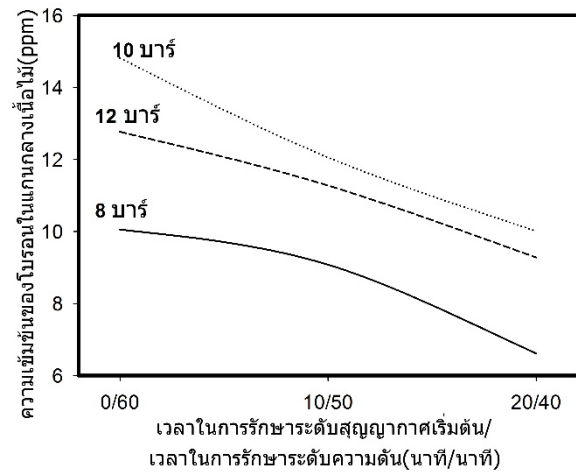
C คือ ร้อยละของความเข้มข้นของสารละลาย

W_d คือ ความหนาแน่นของไม้ (kg/m³)

3. ผลการทดลอง

3.1 ความสามารถในการซึมลึกของสารละลายในเนื้อไม้

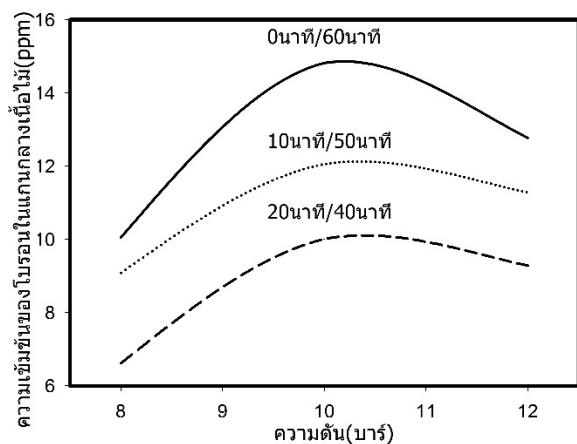
จากการวิเคราะห์ความเข้มข้นของโบรอนในแกนกลางเนื้อไม้ ด้วยเครื่องวิเคราะห์สสาร ICP-OES ที่แสดงในรูปที่ 3 พบว่า เวลาในการรักษาระดับสุญญากาศเริ่มต้นและเวลาในการรักษาระดับความดัน มีผลต่อความเข้มข้นของโบรอนในแกนกลางเนื้อไม้ เมื่อเพิ่มเวลาในการรักษาระดับสุญญากาศเริ่มต้น และลดเวลาในการรักษาระดับความดัน (เวลารวมเท่าเดิม โดยระยะเวลาในการรักษาระดับสุญญากาศเริ่มต้นที่เพิ่มขึ้น และระยะเวลาในการรักษาระดับความดันที่ลดลงนั้น ทั้งสองมีส่วนต่าง 10 นาที) พบว่าความเข้มข้นของโบรอนในเนื้อไม้มีค่าลดลง แสดงว่าอิทธิพลของเวลาในการรักษาระดับสุญญากาศเริ่มต้นมีน้อยกว่าอิทธิพลของเวลาในการรักษาระดับความดัน โดยที่ความดัน 10 บาร์ สภาวะสุญญากาศเริ่มต้น 0 นาที (ดึงอากาศออกถึง 0.2 บาร์ แล้วอัดน้ำยาทันที) และรักษาระดับความดันเป็นเวลา 60 นาที ที่แกนกลางของไม้มีค่าความเข้มข้นของโบรอนสูงสุดเท่ากับ 14.82 ppm ส่วนที่เวลาในการรักษาระดับสุญญากาศเริ่มต้น/เวลาในการรักษาระดับความดันเท่ากับ 20/40 นาที ที่แกนกลางของไม้มีค่าความเข้มข้นของโบรอนลดลงมาที่ 10.01 ppm ซึ่งลดลงคิดเป็นร้อยละ 32.47 ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับการทดลองของ Dhamodaran[3] ที่พบว่าเมื่อระยะเวลาสุญญากาศในกระบวนการ Full-Cell เพิ่มขึ้นความเข้มข้นของโบรอนในเนื้อไม้จะมีค่าลดลง เพราะการทำ initial vacuum เป็นการดึงอากาศที่อยู่ในเซลล์เนื้อไม้ออกมาก่อนการแพร่และการอัดน้ำยาด้วยความดัน จึงทำให้มีปริมาณน้ำยาหรือสารละลายในปริมาณที่มากขึ้น ยิ่งเมื่อใช้เวลาในการรักษาระดับสุญญากาศที่มากขึ้น ช่องว่างภายในเซลล์เนื้อไม้ยิ่งมากขึ้นไปด้วย



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ของเวลาในการรักษาระดับ

สุญญากาศเริ่มต้น/เวลาในการรักษาระดับความดัน
กับความเข้มข้นของโบรอนในแกนกลางเนื้อไม้

ส่วนอิทธิพลของระดับความดันที่มีผลต่อความเข้มข้นของโบรอนในเนื้อไม้ จากการทดลองพบว่า เมื่อความดันเพิ่มขึ้น จาก 8 เป็น 10 บาร์ ความเข้มข้นของโบรอนจะมีค่าเพิ่มขึ้น ดังที่แสดงในรูปที่ 4 เนื่องจากที่ความดันสูง สารละลายโบรอนจะมีแรงดันเข้าไปในเนื้อไม้มาก มีผลให้ความเข้มข้นของโบรอนในเนื้อไม้สูงขึ้นด้วย โดยที่ความดัน 10 บาร์ และ เวลาในการรักษาระดับสุญญากาศเริ่มต้น/เวลาในการรักษาระดับความดันเท่ากับ 0/60 นาที โบรอนในแกนกลางไม้มีค่าสูงสุดเท่ากับ 14.82 ppm เปรียบเทียบกับความดันที่ 8 บาร์ พบว่าความเข้มข้นของโบรอนในแกนกลางไม้เท่ากับ 10.05 ppm ซึ่งเพิ่มขึ้นคิดเป็นร้อยละ 32.17 แต่เมื่อความดันมากกว่า 10 บาร์ ที่สภาวะเวลาเดียวกัน ความเข้มข้นของโบรอนกลับมีค่าลดลง โดยที่ความดันเพิ่มขึ้นจาก 10 เป็น 12 บาร์ พบว่าความเข้มข้นของโบรอนในแกนกลางไม้มีค่า 12.77 ppm ซึ่งลดลงคิดเป็นร้อยละ 13.83 ซึ่งอาจจะเกิดมาจากแรงต้านทานของเนื้อไม้เอง และความดันที่สูงขึ้นไปจะทำให้มีแรงต้านของสารละลายจากด้านตรงกันข้ามของชิ้นงานไม้ไม่ให้สารละลายอีกด้านสามารถแพร่เข้าไปในเนื้อไม้ได้[10]



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ของระดับความดัน กับความเข้มข้นของโบรอนในแกนกลางเนื้อไม้

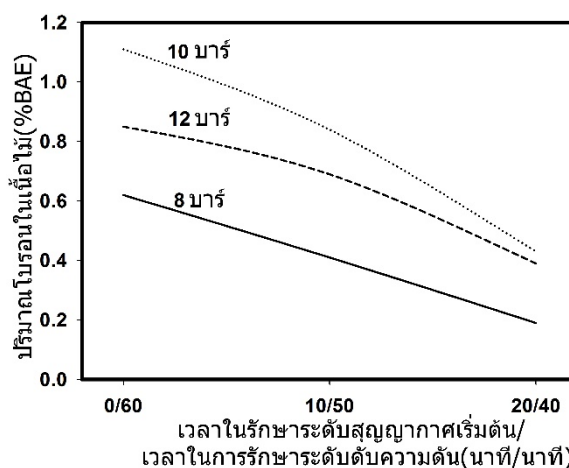
และเมื่อนำไม้จากโรงงานเอกชนที่ผ่านการวิเคราะห์วิธีเทียบสีที่ผ่านการยอมรับแล้ว มาวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์สสาร ICP-OES พบว่าไม้ดังกล่าวมีความเข้มข้นในแกนกลางเนื้อไม้เพียง 1.98 ppm ดังนั้นเมื่อทำการเปรียบเทียบกับงานวิจัยนี้ พบว่า ค่าความเข้มข้นของโบรอนในแกนกลางเนื้อไม้ทุกสภาวะมีค่ามากกว่าค่าที่ยอมรับของบริษัทเอกชนที่ผ่านการวิเคราะห์เทียบสีมาแล้ว

3.2 ความสามารถในการเกาะตัวของสารละลายในเนื้อไม้

จากรูปที่ 5 แสดงให้เห็นว่า เวลาในการรักษาระดับสัญญาณเริ่มต้นและเวลาในการรักษาระดับความดัน มีผลต่อปริมาณโบรอนในเนื้อไม้ โดยมีแนวโน้มเหมือนกับแนวโน้มที่มีผลต่อความเข้มข้นของโบรอนที่แกนกลางไม้

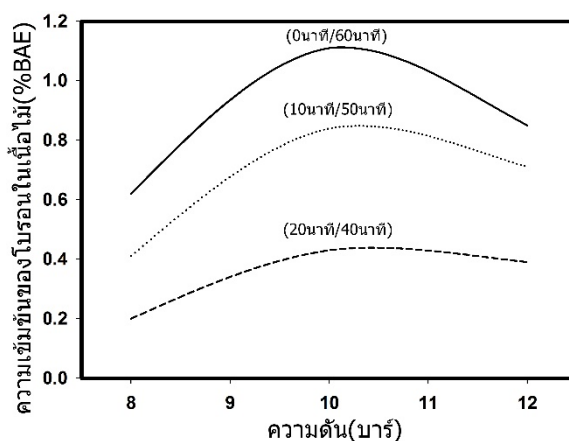
จากการทดลองพบว่า ที่สภาวะความดัน 10 บาร์ ปริมาณโบรอนในเนื้อไม้มีค่าสูงสุดเท่ากับ 1.11 %BAE เมื่อเวลาในการรักษาระดับสัญญาณเริ่มต้น/เวลาในการรักษาระดับความดัน เท่ากับ 0/60 นาที และมีค่าต่ำสุดเท่ากับ 0.43 %BAE เมื่อเวลาในการรักษาระดับสัญญาณเริ่มต้น/เวลาในการรักษาระดับความดันเป็น 20/40 โดยลดลงคิดเป็นร้อยละ 61.26 ซึ่งค่าความเข้มข้นของโบรอนในเนื้อไม้ที่ได้รับการยอมรับว่าผ่านมาตรฐานคือ 0.2%BAE เท่านั้น ส่วนรูปที่ 6 แสดงให้เห็นว่า ระดับความดันมีผลต่อปริมาณโบรอนในเนื้อไม้ โดยที่ระดับความดันเพิ่มขึ้นจาก 8 เป็น 10 บาร์ปริมาณโบรอนจะมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งการรักษาระดับ

สัญญาณเริ่มต้น/เวลาในการรักษาระดับความดันเป็น 0/60 บาร์ มีปริมาณโบรอนในเนื้อไม้สูงสุดเท่ากับ 1.11%BAE เมื่อระดับความดัน 10 บาร์ เปรียบเทียบกับความดันที่ 8 บาร์ พบปริมาณของโบรอนในเนื้อไม้มีค่าต่ำสุดเพียง 0.62 %BAE โดยเพิ่มขึ้นคิดเป็นร้อยละ 44.14 และเป็นที่สังเกตว่าเมื่อเพิ่มระดับความดันความดันมากกว่า 10 บาร์ขึ้นไป จะมีแนวโน้มของปริมาณโบรอนในเนื้อไม้ลดลงด้วย ซึ่งเป็นประเด็นที่น่าสนใจในอนาคตถึงเหตุผลของปรากฏการณ์นี้



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ของเวลาในการรักษาระดับ

สัญญาณเริ่มต้น/เวลาในการรักษาระดับความดันกับปริมาณโบรอนในเนื้อไม้



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ของระดับความดันกับปริมาณโบรอนในเนื้อไม้

4. สรุปผลการทดลอง

การรักษาเนื้อไม้ยางพาราด้วยกระบวนการ Full-Cell โดยใช้สารละลาย DOT ที่ความดัน 10 บาร์และสภาวะเวลา 0/60 (นาที่/นาที่) พบว่าเป็นสภาวะที่เหมาะสมกับไม้ยางพาราในประเทศไทย โดยมีปริมาณโบรอนในเนื้อไม้และความเข้มข้นของโบรอนในแกนกลางเนื้อไม้สูงสุดคือ 1.11 %BAE และ 14.82 ppm ตามลำดับ ซึ่งมีค่ามากกว่าค่าความเข้มข้นของโบรอนที่แกนกลางเนื้อไม้ที่ผ่านการทดสอบด้วยสีและได้รับการยอมรับว่าไม้ผ่านเกณฑ์ของบริษัทเอกชนซึ่งมีค่าเพียง 1.982 ppm และมีปริมาณโบรอนเพียงพอต่อการป้องกันมอดซีดซึ่งเป็นศัตรูหลักของไม้ยางพารา เมื่อเปลี่ยนแปลงเวลาจาก 0/60 เป็น 10/50 และ 20/40(นาที่/นาที่) จากผลการทดลอง พบว่า ปริมาณและความเข้มข้นของโบรอนจะมีค่าลดลง และเมื่อระดับความดันเพิ่มขึ้นจาก 8 บาร์เป็น 10 บาร์ ปริมาณและความเข้มข้นของโบรอนจะมีค่าเพิ่มขึ้น และเป็นที่สังเกตว่าเมื่อความดันเพิ่มขึ้นจาก 10 บาร์เป็น 12 บาร์ ค่าปริมาณและความเข้มข้นของโบรอนมีแนวโน้มลดลง สาเหตุที่อิทธิพลของเวลาในการรักษาระดับความดันมีค่ามากกว่าเวลาในการรักษาระดับสุญญากาศ เนื่องมาจาก ในขณะที่เวลาในการรักษาระดับความดันเพิ่มขึ้น สารละลาย DOT ในถังความดันจะสัมผัสกับเนื้อไม้และเกิดการแพร่ได้ตลอดเวลา แต่ในขณะที่เวลาในการรักษาระดับสุญญากาศเพิ่มขึ้น ภายในถังความดันจะไม่มีสารละลาย DOT อยู่ จึงส่งผลให้โบรอนในสภาวะที่เพิ่มเวลาในการรักษาระดับความดัน สามารถแพร่เข้าไปสู่ในเนื้อไม้ได้มากกว่า ทำให้ในเนื้อไม้มีค่าความเข้มข้นและปริมาณของโบรอนเพิ่มมากขึ้น

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] W.Sittichaya and R.Beaver, "Rubberwood destroying beetles in the eastern and gulf areas of Thailand (Coleoptera: Bostrichidae, Curculionidae: Scolytinae and Platypodinae)," Songklanakarin Journal of Science and Technology, 2009.
- [2] UM.Abeyasinghe and HS.Amarasekera, "Pressure and non- pressure preservation methods for rubber wood treatment by Boron preservatives," Proc Int for Environ Symp, 16, 2011.
- [3] TK.Dhamodaran, "Preservative Treatment and Chemical Modification of Rubber wood," Kerala Forest Research Institute, 1996.
- [4] O.Sulaiman, "The effect of relative humidity on the physical and mechanical properties of oil palm trunk and rubberwood," Cellul Chem Technol. 2012, 46(5), 401–7.
- [5] ASTM International, "ASTM D4442 – 92 (2003), Standard Test Methods for Direct Moisture Content Measurement of Wood and Wood-Base Materials," 1992.
- [6] Bureau of Indian Standards, "IS 2753-1 (1991): Methods for estimation of preservatives in treated timber and in treating solutions, Part 1: Determination of copper, arsenic, chromium, zinc, boron, creosote and fuel oil," CED 9, Timber and Timber Stores, 1991.
- [7] Ministry of Industry Thailand, "TIS industrial standards, 1894-2009," 2009.
- [8] American Wood Preservers' Association, "AWPA A7, Standard for wet ashing procedures for preparing wood for chemical analysis," 2012.
- [9] American Wood Preservers' Association, "AWPA A11: Standard Method for Analysis of Treated Wood and Treating Solutions by Atomic Absorption Spectroscopy," 1983.
- [10] J.D. MacLean, "Preservative pressure. In: preservative treatment of wood by pressure methods," Agriculture handbook No40. U.S. Govt. Print. Off., 1953.

ปัจจัยในการเลือกใช้รถโดยสารประจำทางของผู้บกพร่องทางการเห็น ในกรุงเทพมหานครและปริมณฑล

Factors Impacting of Travels by Bus for the Visually Impaired in the Bangkok Metropolitan Region

สาวตรี ศรีพยัคฆ์ เหมือนมาศ วิเชียรสินธุ์

สาขาวิชาวิศวกรรมโครงสร้างพื้นฐานและการบริหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอข้อเสนอแนะในการส่งเสริมผู้บกพร่องทางการเห็นในการเดินทางไปสถานศึกษาหรือที่ทำงานโดยรถโดยสารประจำทาง ใช้แบบสอบถามในการเก็บข้อมูลและสร้างแบบจำลองโลจิตทวินามบนพื้นฐานทฤษฎีอรรถประโยชน์ด้วยโปรแกรม SPSS ผลการศึกษาพบว่า ในปัจจุบันผู้บกพร่องทางการเห็นนิยมเลือกวิธีการเดินทางด้วยรถโดยสารประจำทางมากที่สุดเป็นร้อยละ 24.7 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการเลือกวิธีการเดินทางด้วยรถโดยสารประจำทางอย่างมีนัยสำคัญ คือ ราคาค่าโดยสาร และระดับการศึกษา โดยความถูกต้องรวมของแบบจำลองคิดเป็นร้อยละ 84.0 หากหน่วยงานที่เกี่ยวข้องต้องการส่งเสริมการเดินทางของผู้บกพร่องทางการเห็นให้ใช้บริการรถโดยสารประจำทางประจำทางให้มากขึ้น หน่วยงานที่เกี่ยวข้องควรกำหนดราคาค่าโดยสารสำหรับผู้บกพร่องทางการเห็นที่จะต้องจ่ายต่อเที่ยวในการเดินทางไปสถานศึกษาหรือที่ทำงานให้อยู่ในขอบเขตราคา 21 - 30 บาทต่อเที่ยว หรือราคาค่าโดยสารเฉลี่ย 25.50 บาทต่อเที่ยว

คำสำคัญ : ผู้บกพร่องทางการเห็น การเลือกวิธีการเดินทาง แบบจำลองโลจิตทวินาม กรุงเทพมหานคร ปริมณฑล

Abstract

This article presented the recommendation to support the visually impaired in traveling to schools or workplaces by using a questionnaire to collect data and making a binary logit model. The model was based on the utility theory using SPSS program. The study indicated that at present most of the visually impaired decide to travel by the public buses about 24.7%. The factors that significantly affected the choices of bus mode were the fares and the level of education. The model was well estimated with the accuracy of 84.0 %. The findings are useful for the relevant authorities to understand visually impaired. The authorities should control the fares for them at a price range from 20 to 30 baht per trip or at 25.50 baht average per trip.

Keywords : Visually Impaired, Mode Choice, Binary Logit Model, Bangkok Metropolitan Region

1. บทนำ

จากฐานข้อมูลทะเบียนกลางคนพิการของกรมส่งเสริมและพัฒนาคุณภาพชีวิตคนพิการ ปีพ.ศ. 2558 [1] พบว่าประชากรที่บกพร่องทางการเห็นทั่วประเทศมีจำนวนมากถึง 189,377 คน โดยประชากรที่บกพร่องทางการเห็นที่อาศัยอยู่ในกรุงเทพมหานครและปริมณฑล มีจำนวนถึง 3,860 คน (ของจำนวนผู้บกพร่องทางการเห็นทั่วประเทศ) ซึ่งในปัจจุบันผู้บกพร่องทางการเห็นเป็นกลุ่มบุคคลที่มีความรู้ ความสามารถในการทำงานจนเป็นที่ยอมรับในสังคม ปัจจุบันมากขึ้นและยังมีบทบาททางสังคม ซึ่งจะเห็นได้จากการจ้างงานต่างๆ เริ่มมีการจ้างงานผู้บกพร่องทางการเห็นมากขึ้น โดยเปิดโอกาสให้ผู้บกพร่องทางการเห็นแสดงศักยภาพความรู้ ความสามารถอย่างเต็มที่ แต่การเดินทางยังคงเป็นปัญหาและอุปสรรคที่สำคัญที่ทำให้ผู้บกพร่องทางการเห็นไม่สามารถเดินทางได้สะดวก ซึ่งผู้บกพร่องทางการเห็นในประเทศไทยจำนวนไม่น้อยที่มีความรู้ ความสามารถในการทำงานและการศึกษาเล่าเรียน แต่ต้องเป็นคนตกงานหรือไม่ได้รับการศึกษาเพียงเพราะปัญหาและอุปสรรคในเรื่องการเดินทางเท่านั้น งานวิจัยนี้จึงต้องการศึกษาพฤติกรรมการเดินทางระหว่างสถานศึกษาหรือที่ทำงานและวิเคราะห์พฤติกรรมการเลือกวิธีการเดินทางของผู้บกพร่องทางการเห็น โดยศึกษาและวิเคราะห์ทางเลือกในการเดินทาง ซึ่งจะขึ้นอยู่กับการตัดสินใจของแต่ละบุคคลบนพื้นฐานทฤษฎีอรรถประโยชน์ แล้วนำมาพัฒนาเป็นแบบจำลองโลจิตทวินาม (Binary Logit Model) เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์หาสัดส่วนการเลือกวิธีการเดินทางที่จะเกิดขึ้นในอนาคต แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นจะเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาและการแก้ปัญหาการเดินทางของผู้บกพร่องทางการเห็นในกรุงเทพมหานครและปริมณฑล เช่น แก้ไขปัญหาในเรื่องรายได้ไม่พอกับค่าใช้จ่ายในการเดินทางและลดความกังวลและเป็นห่วงจากบุคคลในครอบครัวหรือบุคคลใกล้ชิดที่มองว่าผู้บกพร่องทางการเห็น

ควรอยู่กับบ้านไม่ควรเดินทางออกไปทำงานหรือไปเรียน หนังสือ งานวิจัยนี้จะส่งผลให้ผู้บกพร่องทางการเห็นสามารถใช้ชีวิตประจำวันและเข้าไปมีส่วนร่วมทางสังคมได้ใกล้เคียงกับบุคคลทั่วไป

2. จุดประสงค์และขอบเขตของการวิจัย

เพื่อศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลต่อพฤติกรรมการเลือกวิธีการเดินทางของผู้บกพร่องทางการเห็น โดยสร้างแบบจำลองการเลือกวิธีการเดินทางของผู้บกพร่องทางการเห็น พร้อมทั้งหาสัดส่วนความน่าจะเป็นในการเลือกวิธีการเดินทาง

ขอบเขตของการวิจัยศึกษากลุ่มตัวอย่างผู้บกพร่องทางการเห็นที่อาศัยอยู่ในกรุงเทพมหานครและปริมณฑล จำนวน 365 คน ซึ่งจะพิจารณาเฉพาะผู้บกพร่องทางการเห็นที่เดินทางระหว่างที่พักอาศัยกับสถานศึกษาหรือที่ทำงาน โดยรถโดยสารประจำทาง

3. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ทฤษฎีอรรถประโยชน์ (Utility Theory) [2] ในการวิเคราะห์พฤติกรรมการเลือกวิธีการเดินทางของผู้เดินทางกับปัจจัยต่างๆ สามารถเขียนสมการแสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรตามและตัวแปรอิสระที่อยู่ในรูปแบบจำลองฟังก์ชันอรรถประโยชน์ ดังสมการ (1)

$$U_{in} = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_i X_i \quad (1)$$

โดยที่ :

U_{in} คือ อรรถประโยชน์คนที่ n ที่มีต่อทางเลือก i

$\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_i$ คือ ค่าพารามิเตอร์ของตัวแปรอิสระ

$X_1, X_2, \dots, X_i$ คือ ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับอรรถประโยชน์ i

ของบุคคล n

แบบจำลองโลจิตทวินาม (Binary Logit Model) เป็นแบบจำลองในการวิเคราะห์การเลือกรูปแบบการเดินทางเป็นการจำลองทางเลือก 2 ทางเลือก ดังสมการ (2)

$$P_m = \frac{e^{u_m}}{\sum_m e^{u_m}} \quad (2)$$

โดยที่ :

P_m คือ ความน่าจะเป็นที่รูปแบบการเดินทาง m จะถูกเลือก

U_m คือ อรรถประโยชน์ที่ได้เลือกรูปแบบการเดินทาง m

m คือ จำนวนประเภทของรูปแบบการเดินทางทั้งหมด
ในกลุ่มของตัวเลือก

ในเรื่องการศึกษาการเข้าใช้ระบบขนส่งสาธารณะในการเดินทางโดยวิธีต่างๆของผู้พิการในประเทศไทยมีงานของ อนุชา นิลศรีไพรวัลย์ [3] ที่ศึกษาถึงความต้องการในการเดินทางของผู้บกพร่องทางการเห็นและผู้บกพร่องทางการเคลื่อนไหว โดยศึกษาถึงปัจจัยในการเลือกระบบขนส่งที่ใช้ในการเดินทางของผู้พิการและศึกษาสภาพของสิ่งอำนวยความสะดวกในการเดินทาง ผลการศึกษาพบว่า ผู้บกพร่องทางการเห็นส่วนใหญ่เดินทางโดยใช้ทางเท้าและรถโดยสารประจำทาง ในขณะที่ผู้บกพร่องทางการเคลื่อนไหวส่วนใหญ่เดินทางโดยใช้รถแท็กซี่และรถยนต์ส่วนบุคคล ส่วนการประเมินสิ่งอำนวยความสะดวกของระบบขนส่งสาธารณะ ผลการศึกษาพบว่า สิ่งอำนวยความสะดวกไม่มีความต่อเนื่องในเส้นทางของการเดินทางและการปรับปรุงระบบขนส่งสาธารณะมีอยู่น้อยและไม่มีประสิทธิภาพ ถ้าระบบขนส่งสาธารณะมีสิ่งอำนวยความสะดวกเพื่อให้ผู้พิการสามารถเข้าใช้ได้สะดวกสบายในการเดินทางจะทำให้ผู้พิการมีความต้องการเดินทางมากขึ้น จากปัญหาและอุปสรรคในการเข้าถึงสิ่งอำนวยความสะดวกในการเดินทางของผู้พิการในงานของ ธรรมกร อธิคมวิทยา [4] ศึกษาถึงปัญหาและอุปสรรคในการเข้าถึงบริการด้านสิ่งอำนวยความสะดวกของผู้บกพร่องทางการเห็นในท่าอากาศยานสุวรรณภูมิ ผลการศึกษาพบว่า ผู้บกพร่องทางการเห็นไม่สามารถเคลื่อนไหวอิสระได้ในอาคารผู้โดยสาร การจัดสิ่งอำนวยความสะดวกในอาคารผู้โดยสารไม่สอดคล้องกับแนวคิด

อารยะสถาปัตย์และไม่เป็นมิตรต่อการเดินทางของผู้บกพร่องทางการเห็น ท่าอากาศยานสุวรรณภูมิควรปรับปรุงการจัดบริการด้านสิ่งอำนวยความสะดวกสำหรับผู้บกพร่องทางการเห็นในอาคารผู้โดยสารท่าอากาศยานสุวรรณภูมิ เพื่อรองรับการให้บริการของผู้บกพร่องทางการเห็น จะเห็นได้ว่าสิ่งอำนวยความสะดวกในการเดินทางของผู้พิการเป็นเรื่องที่สำคัญมากไม่ว่าจะเป็นท่าอากาศยานหรือแม้แต่รถไฟฟ้าใต้ดิน สุกัญญา บุญคง [5] ศึกษาถึงระดับความต้องการของผู้พิการต่อการเข้าถึงการจัดสิ่งอำนวยความสะดวกของผู้พิการในการใช้บริการรถไฟฟ้าใต้ดิน ผลการศึกษาพบว่า การเข้าใช้บริการรถไฟฟ้าใต้ดินของผู้พิการอยู่ในระดับปานกลาง ผู้พิการจะมีปัญหาและอุปสรรคด้านการติดต่อสื่อสารเป็นอย่างมาก ต้องการให้รถไฟฟ้าใต้ดินจัดสิ่งอำนวยความสะดวกให้ผู้พิการ เช่น การประกาศออกเสียงเพื่อบอกสถานีต่อไปกับผู้บกพร่องทางการเห็นในการปรับปรุงหรือพัฒนาสิ่งอำนวยความสะดวกระบบขนส่งสาธารณะ เพื่อรองรับการใช้งานของผู้พิการส่งผลให้ผู้พิการมีคุณภาพชีวิตที่ดีขึ้นและมีส่วนร่วมในสังคม

ในเรื่องการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเลือกรูปแบบการเดินทางในประเทศไทยมีงานของ ณภัทร เลขะวัฒนะ [6] เป็นการศึกษาปัจจัยในการเลือกรูปแบบการเดินทางของนักเรียนด้วยรถนักเรียนและยานพาหนะอื่นด้วยแบบจำลองโลจิตทวินาม ผลการศึกษาพบว่า ตัวแปรที่มีผลต่อการเลือกยานพาหนะเดินทาง คือ ระยะทางในการเดินทาง เหตุการณ์สมมติด้านเวลาในการรอคอยรถรับส่งนักเรียนที่จุดจอดรถ และเหตุการณ์สมมติด้านค่าใช้จ่ายในการใช้บริการรถรับส่งนักเรียน ผลที่ได้จากการศึกษาใช้เป็นข้อมูลในการพิจารณาแนวทางการกำหนดนโยบายทางด้านจราจรและขนส่งในอนาคต เพื่อลดปัญหาการจราจรที่หนาแน่นบริเวณโดยรอบของโรงเรียน และพรพนิต สุวรรณรัตน์ [7] ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเลือกรูปแบบการเดินทางเข้าสู่

สถานีรถไฟความเร็วสูงสายตะวันออกเฉียงเหนือด้วยแบบจำลองโลจิสติกส์และแบบจำลองโลจิสติกส์ชั้นพบว่า ปัจจัยที่ส่งผลต่อการเลือกรูปแบบการเดินทางอย่างมีนัยสำคัญ ได้แก่ ค่าใช้จ่าย เวลา ระยะทาง สถานะภาพ เพศ การครอบครองรถยนต์ จำนวนรถยนต์ รายได้ อายุ และการศึกษา สัดส่วนความน่าจะเป็นของรูปแบบทางเลือก พบว่า แท็กซี่ได้รับความนิยมในการเข้าสู่สถานีกรุงเทพมหานคร รถโดยสารประจำทางได้รับความนิยมในการเข้าสู่สถานีสระบุรี ขอนแก่น และนครราชสีมา และรถยนต์ส่วนบุคคลได้รับความนิยมในการเข้าสู่สถานีอุดรธานีและหนองคาย

4. วิธีดำเนินการวิจัย

4.1 ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง

ประชากรที่ศึกษา คือ กลุ่มผู้ปกครองทางการเห็นที่จดทะเบียนคนพิการอยู่ในกรุงเทพมหานครและปริมณฑล จำนวน 3,860 คน ซึ่งกำหนดขนาดของกลุ่มตัวอย่างโดยใช้สูตรการคำนวณของ Yamane [8] จำนวน 365 ตัวอย่าง

4.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้ คือ แบบสอบถาม และโปรแกรม SPSS ในการวิเคราะห์ค่าต่างๆ เพื่อพัฒนาแบบจำลองโลจิสติกส์ (Binary Logit Model)

4.3 การเก็บรวบรวมข้อมูล

การวางแผนในการเก็บรวบรวมข้อมูลในการวิจัย จะใช้วิธีการสำรวจด้วยวิธี Revealed Preference และวิธี Stated Preference ในการเก็บข้อมูลจะใช้วิธีการสัมภาษณ์โดยตรงกับผู้ตอบแบบสอบถามประมาณ 165 คน และการสอบถามทางโทรศัพท์ประมาณ 200 คน ในปี พ.ศ. 2559

4.4 การวิเคราะห์ข้อมูล

วิเคราะห์ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อพฤติกรรมการเลือกวิธีการเดินทางของผู้ปกครองทางการเห็นในพื้นที่กรุงเทพมหานครและปริมณฑล ด้วยแบบจำลองโลจิสติกส์ (Binary Logit Model)

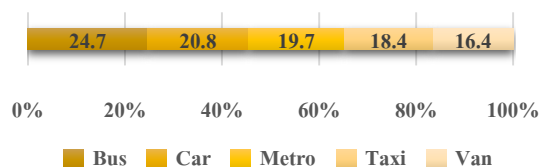
4.5 การทดสอบทางสถิติและความถูกต้องของแบบจำลอง

ในการพิจารณาแบบจำลองจะทดสอบค่าทางสถิติและความถูกต้องของแบบจำลอง ดังนี้ การทดสอบนัยสำคัญของสัมประสิทธิ์ การทดสอบระดับของความสอดคล้อง การทดสอบเครื่องหมายของสัมประสิทธิ์ และการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

5. ผลการวิจัย

5.1 การวิเคราะห์สัดส่วนทางเลือกของการเดินทางของผู้ปกครองทางการเห็นในปัจจุบัน

ผลการวิเคราะห์สัดส่วนความน่าจะเป็นของรูปแบบทางเลือกในการเดินทางของผู้ปกครองทางการเห็นในปัจจุบันพบว่า รถโดยสารประจำทางเป็นรูปแบบการเดินทางที่ได้รับความนิยม คิดเป็นร้อยละ 24.7 ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 ผลการวิเคราะห์สัดส่วนทางเลือกการเดินทางของผู้ปกครองทางการเห็นในปัจจุบัน

5.2 การสร้างแบบจำลองรถโดยสารประจำทาง

ในการวิเคราะห์หาสมการถดถอยแบบทวินามเป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อแบบจำลองโดยการเลือกตัวแปรเข้าแบบจำลองใช้วิธีแบบ Forward Stepwise เพื่อหาปัจจัยสำคัญในการเปลี่ยนรูปแบบการเดินทางของผู้ปกครองทางการเห็น โดยการเลือกค่าสัมประสิทธิ์ของ ตัวแปรอิสระจากแบบจำลองที่เหมาะสม

ตารางที่ 1 ตัวแปรตามสำหรับการวิเคราะห์วิธีการเดินทาง

Original Value	Internal Value
Bus - No	0
Bus - Yes	1

การตรวจสอบว่าตัวแปรอิสระใดสำคัญที่จะนำเข้ามาในแบบจำลอง โดยโปรแกรมจะสร้าง Logit Response Function นำค่าตัวแปรอิสระที่มี Score มากที่สุดและค่า P-Value น้อยที่สุดเข้าไปในแบบจำลองเป็นลำดับแรก โดยตัวแปรอิสระต้องมีค่า P-Value น้อยกว่า 0.05 เท่านั้น ถ้าตัวแปรอิสระตัวใดมีค่ามาก

กว่า 0.05 จะไม่นำค่าตัวแปรอิสระเข้ามาวิเคราะห์ ดังตารางที่ 2 และผลการวิเคราะห์สมการถดถอยโลจิสติกส์ทวินามของแบบจำลองรถโดยสารประจำทางเรียงลำดับตามค่า P-Value ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 2 ตัวแปรที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองของรถโดยสารประจำทาง

ตัวแปร	คำอธิบายตัวแปร	Score	P-Value
X_7	ราคาค่าโดยสาร 20 - 30 บาท/เที่ยว	70.534	.000
X_2	ระดับการศึกษาสูงสุดชั้นประถมศึกษา	16.115	.000
X_{10}	ราคาค่าโดยสารมากกว่า 70 - 80 บาท/เที่ยว	11.077	.001
X_{46}	คนที่รับระดับความหนาแน่นความหนาแน่นภายในพาหนะได้ในระดับปานกลาง	10.127	.001
X_{12}	ราคาค่าโดยสารมากกว่า 90 - 100 บาท/เที่ยว	9.903	.002
X_{13}	ราคาค่าโดยสารมากกว่า 100 - 150 บาท/เที่ยว	9.903	.002
X_{41}	วิธีการเดินทางใหม่ที่จะเลือก หากมีค่าโดยสารเพิ่มขึ้น คือ รถโดยสารประจำทาง	9.280	.002
X_{11}	ราคาค่าโดยสารมากกว่า 80 - 90 บาท/เที่ยว	8.407	.004
X_{39}	วิธีการเดินทางใหม่ที่จะเลือก หากมีค่าโดยสารเพิ่มขึ้น คือ รถยนต์ส่วนบุคคล	7.911	.005
X_8	ราคาค่าโดยสารมากกว่า 50 - 60 บาท/เที่ยว	7.768	.005
X_{40}	วิธีการเดินทางใหม่ที่จะเลือก หากมีค่าโดยสารเพิ่มขึ้น คือ รถแท็กซี่	6.221	.013
X_{14}	ราคาค่าโดยสารมากกว่า 150 บาท/เที่ยว	5.450	.020
X_4	อาชีพพนักงานบริษัท	4.297	.038

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์สมการถดถอยโลจิสติกส์ทวินามของแบบจำลองรถโดยสารประจำทาง

Model	Variable	β	Wald	P-Value
Bus	Constant	-4.776	17.079	.000
	X7	4.167	55.079	.000
	X8	-3.502	36.486	.000
	X2	1.718	22.511	.000

การวิเคราะห์ค่าสถิติทดสอบไคสแควร์ที่มีผลต่อตัวแปรอิสระโดยใช้สมมติฐานของการทดสอบคือ $H_0: \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \beta_4 = \beta_5$ และ $H_1: \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5$ อย่างน้อย 1 ตัว ไม่เท่ากับ 0 และค่า P-Value ต้องเท่ากับ .000 แสดงว่าแบบจำลองปฏิเสธ

H_0 ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลอง มีผลต่อตัวแปรอิสระอย่างน้อย 1 ตัว ดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ค่าสถิติไคสแควร์ของรถโดยสารประจำทาง

Model	Chi-square	DF	P-Value
Step	138.712	3	.000
Block	138.712	3	.000
Model	138.712	3	.000

การตรวจสอบระดับของความสอดคล้องของแบบจำลองและวิเคราะห์ค่าร้อยละของความผันแปรของตัวแปรตาม (รถโดยสารประจำทาง) โดยแสดงค่าของตัวแปรพารามิเตอร์ (β) ที่อยู่ในสมมติฐานของการทดสอบ คือ $H_0: \beta_1$ และ $H_1: \beta_1 \neq 0$ ได้ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ผลการวิเคราะห์ค่าสถิติ Nagelkerke R Square

Model	-2 Log likelihood	Cox&Snell R Square	Nagelkerke R Square
Bus	269.023	.316	.470

จากตารางที่ 5 ผลการวิเคราะห์ค่าสถิติ Nagelkerke R Square ของแบบจำลองรถโดยสารประจำทางมีค่า Nagelkerke R Square เท่ากับ .470 แสดงให้เห็นว่า ตัวแปรอิสระมีความผันแปรของการเลือกใช้รถโดยสารประจำทาง ร้อยละ 47.0

เมื่อพิจารณาค่าสถิติโดยรวมแสดงให้เห็นว่าสมการถดถอยแบบทวินามมีความเหมาะสมและสามารถเขียนสมการในการพยากรณ์ความน่าจะเป็นในการเดินทางด้วยรถโดยสารประจำทาง จากตัวแปรทั้งหมด ดังนี้

$$U_{(Bus)} = -4.776 + 4.167X_7 - 3.502X_8 + 1.718X_2$$

โดยที่: $U_{(Bus)}$ คือ อรรถประโยชน์ของผู้ประกอบการเห็นที่ต่อการใช้รถโดยสารประจำทาง

X_7 คือ ราคาโดยสารมากกว่า 20-30 บาท/เที่ยว

X_8 คือ ราคาโดยสารมากกว่า 50-60 บาท/เที่ยว

X_2 คือ ระดับการศึกษาสูงสุดชั้นประถมศึกษา

ในงานนี้ จากข้อมูลที่สำรวจทั้งหมด จากกลุ่มตัวอย่างผู้ปกครองทางการเห็น ได้แบ่งข้อมูลออกเป็น 2 ส่วน คือ ข้อมูลร้อยละ 80 นำมาใช้เป็นข้อมูลที่ใช้ในการพัฒนาแบบจำลอง และอีกร้อยละ 20 เป็นข้อมูลอิสระใช้สำหรับตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง ดังแสดงในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ผลความถูกต้องของแบบจำลองรถโดยสารประจำทาง

		รถโดยสาร		ร้อยละ
		ไม่เลือก	เลือก	
สำรวจจริง	ไม่เลือก	225	34	86.9
	เลือก	19	53	73.6
ร้อยละของการพยากรณ์ความถูกต้องรวม				84.0

จากตารางที่ 6 ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบจำนวนผู้ปกครองทางการเห็นที่เดินทางด้วยรถโดยสารประจำทาง มีค่าความถูกต้องรวมมีค่าร้อยละ 84.0 จากค่าสถิติโดยรวมนี้ พบว่าสมการถดถอยแบบทวินามที่เสนอมีความเหมาะสม

6. สรุปผลการวิจัย

ผลการวิเคราะห์พฤติกรรมการเลือกวิธีการเดินทางของผู้ปกครองทางการเห็นในการเดินทางไปสถานศึกษาหรือที่ทำงานด้วยรถโดยสารประจำทาง พบว่า ตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อแบบจำลองมากที่สุด คือ ปัจจัยด้านราคาค่าโดยสารและระดับการศึกษา ปัจจัยเหล่านี้เป็นปัจจัยที่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อพฤติกรรมการเลือกวิธีการเดินทางไปสถานศึกษาหรือที่ทำงานของผู้ปกครองทางการเห็น ซึ่งคิดความถูกต้องของแบบจำลองเป็นร้อยละ 84.0 จากข้อมูลข้างต้นแสดงให้เห็นว่ากลุ่มผู้ปกครองทางการเห็นที่จบการศึกษาในระดับประถมศึกษา นิยมเลือกใช้รถโดยสารประจำทางในการเดินทางไปสถานศึกษาหรือที่ทำงานมากกว่าผู้ปกครองทางการเห็นที่จบการศึกษาในระดับอื่นและหาราคาค่าโดยสารที่อยู่ในช่วงที่มากกว่า 21 - 30 บาทต่อเที่ยว หรือราคาค่าโดยสารเฉลี่ย 25.50 บาทต่อเที่ยว ผู้

บกพร่องทางการเห็นจะเลือกเดินทางด้วยรถโดยสารประจำทางมากขึ้น แต่หากราคาค่าโดยสารอยู่ในช่วงที่มากกว่า 50 - 60 บาทต่อเที่ยว หรือราคาค่าโดยสารเฉลี่ย 55.50 บาทต่อเที่ยว ผู้บกพร่องทางการเห็นจะเลือกเดินทางด้วยรถโดยสารประจำทางลดน้อยลง

7. ข้อเสนอแนะ

จากผลของแบบจำลอง เสนอแนะว่า หากต้องการส่งเสริมการเดินทางของผู้บกพร่องทางการเห็นให้ใช้บริการด้วย รถโดยสารประจำทางประจำทางให้มากขึ้น ทางหน่วยงานที่เกี่ยวข้องจะต้องทราบว่ากลุ่มผู้บกพร่องทางการเห็นที่เลือกใช้บริการส่วนใหญ่ คือ ผู้บกพร่องทางการเห็นที่จบการศึกษาสูงสุดในระดับชั้นประถมศึกษา และควรกำหนดราคาค่าโดยสารที่จะต้องจ่ายต่อเที่ยวในการเดินทางไปสถานศึกษาหรือที่ทำงานให้อยู่ในขอบเขตราคามากกว่า 20 - 30 บาทต่อเที่ยว หรือราคาค่าโดยสารเฉลี่ย 25.50 บาทต่อเที่ยว

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] Department of Empowerment of Persons with Disabilities, "Statistic Disabled People With Identification by Region and Gender.: 1st November 1994 - 31th August 2015"
- [2] K. Vanichbuncha, "Advanced Statistical Analysis SPSS for Windows," Chulabook, Bangkok, 2003.
- [3] A. Nilsriphaiwan, "A study of Accessibility of Public Transportation Systems for Disabled Persons in Bangkok and Its Vicinity," M.Eng Thesis, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi, 2000.
- [4] H. Aticomvitaya, "Universal Design For Blind : Passenger Terminal of Suvarnabhumi Airport," M.A Independent Study, Faculty of Requirements, Silpakorn University, 2012.
- [5] S. Boonkong, "The ways to Develop the MRT Facilities Approaching for the Handicap," M.S.W. Thesis, Faculty of Social Administration, Thammasat University, 2008.
- [6] N. Lekawatthana, "Development of Travel Mode Choice Model Between School bus and Other vehicles," SWU Engineering Journal, Vol. 9(1), pp. 61-67, 2014.
- [7] P.Suwannarat, "High Speed Rail Station Access Choice Model for Cross-Regional Commuter Trips: Case Study of the Bangkok-Nong Khai Corridor," The 10th National Transport Conference, Chiangmai, 2016.
- [8] T.Yamane, "Statistics : An Introductory Analysis," The 3rd Ed. Harper and Row, New York, 1973.

กำลังแบกทานแบบไม่ระบายน้ำของฐานรากรูปตัวที่รับแรงกระทำ แบบเยื้องศูนย์

Undrained Bearing Capacity of T-shaped Strip Footing Subjected to Eccentrically Inclined Load

ค่าน้อย กุลละวง

อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยแห่งชาติลาว

สุรภาพ แก้วสวัสดิ์วงศ์ ชนะชัย ทองโถม

นิสิตปริญญาเอก สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการศึกษาแฟกเตอร์กำลังแบกทานของฐานรากรูปตัวที่รับแรงเยื้องศูนย์ในดินเหนียว โดยฐานรากรูปตัวที่มีชิ้นส่วนที่ยื่นลงไปใต้ดิน ซึ่งจะช่วยให้เพิ่มความสามารถในการรับแรงเยื้องศูนย์หรือโมเมนต์ที่กระทำต่อฐานรากได้เป็นอย่างดี วิธีไฟไนต์อีลิเมนต์แบบ 2 มิติบนระนาบความเครียดถูกนำมาใช้วิเคราะห์เสถียรภาพของปัญหานี้ ผลการวิเคราะห์ที่ได้คือแฟกเตอร์กำลังแบกทานของฐานราก (N_c) จะขึ้นอยู่กับตัวแปรดังนี้คือ อัตราส่วนระยะฝังต่อความกว้างของฐานรากรูปตัว (D/B) และ อัตราส่วนระยะเยื้องศูนย์ต่อความกว้างของฐานรากรูปตัว (e/B) จากการวิเคราะห์พบว่าเมื่อ D/B มีค่ามากขึ้นจะทำให้ค่าแฟกเตอร์กำลังแบกทานมีค่าเพิ่มมากขึ้นและค่า e/B มากขึ้นจะส่งผลให้แฟกเตอร์กำลังแบกทานมีค่าลดลง

คำสำคัญ : ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข ระนาบความเครียด ไฟไนต์อีลิเมนต์ ฐานรากรูปตัว

Abstract

This paper presents parametric studies of bearing capacity factor of T-shaped strip foundations in clay. The footing has a connected part projected from the center of the footing and embedded into the ground. This part increases the stability and performance of the footing subjected to eccentrically inclined load or moment. The two dimensional finite element with plane strain condition was employed to determine stability of this problem. The computational result is bearing capacity factor (N_c) which is a function of ratio of embedded length and width (D/B) and ratio of eccentric length and width (e/B). The results show that the solution of N_c increase with an increase of D/B and a decrease of e/B .

Keywords : Numerical Analysis, Plane Strain, Finite Element, T-shaped footing

1. บทนำ

การหาค่ากำลังแบกทานที่ปลายด้านล่างของฐานรากถูกนำเสนอครั้งแรกโดย Terzaghi [1] ซึ่งมีรูปแบบสมการแปรผันกับพารามิเตอร์เพียงสองตัว ดังนี้

$$q = N_c s_u \quad (1)$$

โดย q คือความดันเฉลี่ยแบกทาน (Average Bearing Pressure) ที่ปลายของฐานราก s_u คือกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดินเหนียว (Undrained Shear Strength) N_c คือแฟกเตอร์กำลังแบกทานของฐานราก (Bearing Capacity Factor)

ในอดีตได้มีงานวิจัยมากมายที่ได้ศึกษาเกี่ยวกับกำลังแบกทานของฐานราก เช่น งานวิจัยของ Skempton [2] และ Meyerhof [3-4] ที่ได้ทำการทดสอบด้วยแบบจำลองทางกายภาพเพื่อหาค่ากำลังแบกทานของฐานรากบนดินเหนียวและดินทราย และงานวิจัยของ Prandtl [5-6] ที่ได้หาค่าผลเฉลยแม่นยำตรง (Exact Solution) ของปัญหาฐานรากยาวต่อเนื่อง (Strip Foundation) บนดินเหนียวเอาไว้ซึ่งผลเฉลยที่ได้มีค่าเท่ากับ $(2+\pi)$

ต่อมา Houlsby และ Martin [7] และ Salgado et al. [8] ได้ใช้วิธีเชิงตัวเลขคือวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของการวิเคราะห์ลิมิต (Finite Element Limit Analysis) ในการวิเคราะห์หาค่าแฟกเตอร์กำลังแบกทานของฐานรากต่อเนื่อง (Strip Foundation) และฐานรากวงกลม (Circular Foundation) เอาไว้ซึ่งมีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกับผลเฉลยแม่นยำตรงของ Prandtl [5-6] เป็นอย่างมาก

สำหรับวิธีวิเคราะห์เชิงตัวเลขอีกวิธีคือวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) ก็ได้มีการนำมาใช้เพื่อหาค่าผลเฉลยของกำลังแบกทานของฐานรากเช่นกัน เช่น งานวิจัยของ Edwards et al. [9] และ Keawsawasvong และ Ukritchon [10] โดยงานวิจัยทั้งสองได้ศึกษาไปถึงกำลังแบกทานของฐานรากแบบยาวที่ฝังในดินเหนียวด้วย เช่น เสาเข็ม นอกเหนือจากนี้ Keawsawasvong และ Ukritchon [11] ก็ยังได้ใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ศึกษากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่เท่ากันทุกทิศทางของดินเหนียวเพื่อหาแฟกเตอร์ของกำลังแบกทานวิบัติของฐานรากต่อเนื่องบนดินเหนียวอีกด้วย

เนื่องจากแรงที่กระทำบนฐานรากบางครั้งไม่ได้กระทำเฉพาะที่ตรงจุดกึ่งกลางของฐานรากเท่านั้น แรงกระทำสามารถเอียงศูนย์กลางไปจากจุดกึ่งกลางของฐานรากได้ทำให้เกิดโมเมนต์ซึ่งส่งผลต่อฐานรากทำให้หมุนและบางส่วนของฐานรากสามารถแยกออกจากผิวดินได้ ลักษณะเช่นนี้ทำให้คุณสมบัติการรับแรงในแนวดิ่งของฐานรากแผ่ลดลงอย่างมากเนื่องจากส่วนที่สัมผัสดินของฐานรากน้อยลงทำให้และเกิดความเค้นขึ้นอย่างมากเมื่อแรงเอียงศูนย์กลางไปถึงจุดปลายสุดของฐานราก ซึ่งโดยหลักการแล้วความเค้นที่เอียงศูนย์กลางไปยังที่ปลายสุดของฐานรากจะทำให้เกิดพฤติกรรมของแรงกระทำแบบจุด (Point Load) ขึ้นซึ่งส่งผลให้ค่าความเค้นตรงจุดนั้นเข้าสู่อนันต์และไม่สามารถคำนวณได้

หลักการคำนวณแรงเอียงศูนย์กลางบนฐานรากแผ่สามารถศึกษาได้จากหนังสือการออกแบบฐานรากทั่วไป เช่น หนังสือของ Das [12]

ต่อมา Kaya และ Ormek [13] ได้นำเสนอฐานรากรูปตัวที (T-shaped Strip Footing) ที่มีส่วนของระยะฝังออกไปจากกึ่งกลางของฐาน ซึ่งชั้นส่วนนี้จะช่วยเพิ่มความสามารถในการรับแรงเอียงศูนย์กลางหรือโมเมนต์ที่กระทำต่อฐานรากได้เป็นอย่างดี โดย Kaya และ Ormek ได้ทำการทดสอบทั้งแบบจำลองทางกายภาพและแบบจำลองเชิงตัวเลขสำหรับการวิเคราะห์ปัญหาฐานรากรูปตัวทีนี้ ซึ่งผลที่ได้บ่งบอกถึงความสามารถของฐานรากชนิดนี้ที่สามารถรับแรงเอียงศูนย์กลางและโมเมนต์ได้เป็นอย่างดีเมื่อเทียบกับฐานรากแผ่แบบทั่วไป อย่างไรก็ตาม งานวิจัยของ Kaya และ Ormek เป็นเพียงแค่กรณีศึกษาเท่านั้น ผลเฉลยที่ครอบคลุมพารามิเตอร์ทุกตัวของฐานรากรูปตัวที เช่น อัตราส่วนระยะฝังต่อความกว้างของฐานราก หรืออัตราส่วนระยะเอียงศูนย์กลางต่อความกว้างของฐานรากที่ส่งผลต่อแฟกเตอร์กำลังแบกทานของฐานราก (N_c) ก็ยังไม่ได้ถูกนำเสนออย่างครอบคลุมในงานวิจัยของ Kaya และ Ormek

งานวิจัยนี้นำเสนอการวิเคราะห์หาแรงกดแนวดิ่งแบบเอียงศูนย์กลางของฐานรากรูปตัวทีด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อนำเสนอความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนระยะ

ฝั่งต่อความกว้างของฐานราก ต่อแฟกเตอร์กำลังแบกทานของฐานราก (N_c) สำหรับทุกๆค่าของอัตราส่วนระยะเชิงศูนย์กลางต่อความกว้างของฐานราก เพื่อแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของของฐานรากรูปตัวที่ฝังในดินที่สามารถรับแรงเชิงศูนย์กลางได้ดีกว่าฐานรากแผ่นแบบปกติ

2. วิธีการวิเคราะห์และกำหนดแบบจำลองฐาน

รากปล่อง

งานวิจัยนี้ใช้โปรแกรมไฟไนต์อีลิเมนต์ (Finite Element) Plaxis 2D โดย Brinkgreve [14] ในการจำลองและวิเคราะห์หาผลเฉลยของปัญหาทั้งผลเฉลย

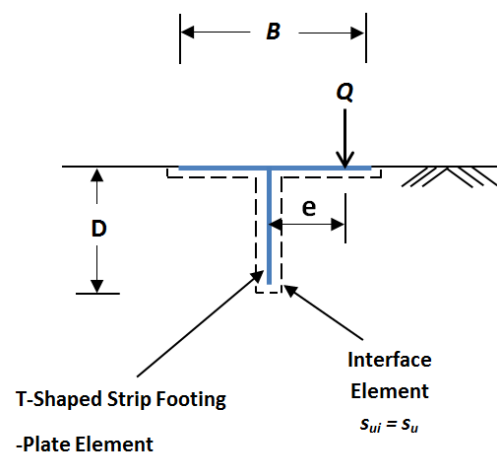
งานวิจัยนี้จำลองให้ดินเหนียวเป็นอีลิเมนต์แบบปริมาตรที่เป็นการวิบัติแบบมอร์-คูลอมบ์ ดินเหนียวมีกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำที่คงที่ตลอดความลึก (s_u) ดินเหนียวมีอัตราส่วนโมดูลัสของยังต่อกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดินเหนียว (E/s_u) = 500 (เป็นค่าที่ใช้กันทั่วไปสำหรับการวิเคราะห์หา Limit State โดยใช้วิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ [15]) มุมเสียดทานภายใน (ϕ) = 0° มุมขยายตัวเชิงปริมาตร (ψ) = 0° อัตราส่วนของปัวซอง (ν) = 0.495 ซึ่งเป็นคุณสมบัติทางกลศาสตร์ของดินเหนียวแบบไม่ระบายน้ำหรือไม่มีการเปลี่ยนแปลงเชิงปริมาตร ดินเหนียวเป็นดินแบบไม่มีหน่วยน้ำหนักหรือ Weightless Soil ซึ่งมี $\gamma = 0$ การกำหนดให้ดินไม่มีหน่วยน้ำหนักเพื่อจะหาค่ากำลังแบกทานซึ่งไม่มีผลของหน่วยน้ำหนักและอิทธิพลของน้ำหนักบรรทุก (Surcharge Factor) [1]

ฐานรากรูปตัวที่แบบระนาบถูกจำลองเป็นอีลิเมนต์แบบแผ่น ฐานรากมีความกว้าง (B) และระยะฝัง (D) ดังแสดงในรูปที่ 1 และเป็นแบบแข็งเกร็ง (Rigid) นอกเหนือจากนี้ ฐานรากแบบปล่องถูกกำหนดให้มีแรงกดแนวตั้ง (Q) ที่กึ่งกลางของโครงสร้าง โดยมีค่า $Q = qB = N_c s_u B$ นอกเหนือจากนี้ แรงกดแนวตั้งสูงสุด (Q) สามารถกระทำเอียงไปจากจุดกึ่งกลางของฐานรากเป็นระยะ e โดยระยะเชิงศูนย์กลางนี้สามารถมีค่าได้ระหว่าง 0 ถึง 0.5B

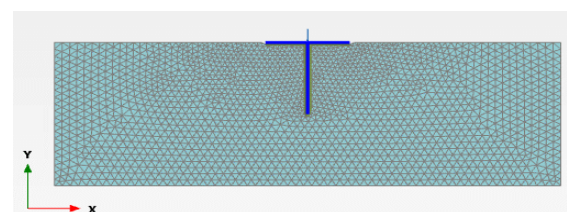
ชิ้นส่วนเชื่อมต่อระหว่างดินและโครงสร้างถูกใช้ตลอดความยาวระหว่างผิวสัมผัสระหว่างฐานรากรูปตัวที่และดินเหนียว ค่าแฟกเตอร์การยึดเกาะระหว่างดินและฐานราก (α) มีค่าเท่ากับ 1 ซึ่งหมายถึงกรณีที่พื้นผิวสัมผัสเป็นแบบหยาบสมบูรณ์ (Rough Surface) แฟกเตอร์การยึดเกาะมีนิยามคือ $\alpha = s_{ui}/s_u$ โดย s_{ui} คือกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำที่ผิวสัมผัสระหว่างดินและฐานราก

เงื่อนไขการเคลื่อนตัวและหน่วยแรงที่ขอบเขตของงานวิจัยนี้คือขอบล่างของแบบจำลองไม่มีการเคลื่อนที่ทั้งแนวราบและแนวตั้ง ขอบซ้ายและขอบขวาไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ในแนวราบ

แบบจำลองเป็นแบบระนาบความเครียด (Plane Strain) โดยชิ้นส่วนดินเป็นชิ้นส่วนรูปสามเหลี่ยมแบบมี 15 จุดต่อ (Node) และหน่วยแรงภายในชิ้นส่วน 12 จุด (Stress Points) การแบ่งโครงข่ายออกเป็นชิ้นส่วนย่อยใช้แบบละเอียดสูงสุด (Very Fine) ดังที่แสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 1 แบบจำลองฐานรากรูปตัวที่ในดินเหนียว



รูปที่ 2 การแบ่งชิ้นส่วนของแบบจำลองฐานรากฐานรากรูปตัวที่โดย Plaxis 2D

ตัวแปรป้อนเข้าสำหรับการวิเคราะห์ไฟไนต์อีลิเมนต์ของการวิเคราะห์หัตถิมิตดังนี้

1. อัตราส่วนระยะฝั่งต่อความกว้างของฐานรากรูปตัวที (D/B) = 0, 0.25, 0.5, 1 และ 1.5
2. อัตราส่วนระยะเยื้องศูนย์กลางต่อความกว้างของฐานรากรูปตัวที (e/B) = 0, 0.125, 0.25, 0.375 และ 0.5

ผลเฉลยแบบตัวแปรไร้มิติที่ได้จากวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ของการวิเคราะห์หัตถิมิตคือ $N_c = Q/Bs_u$

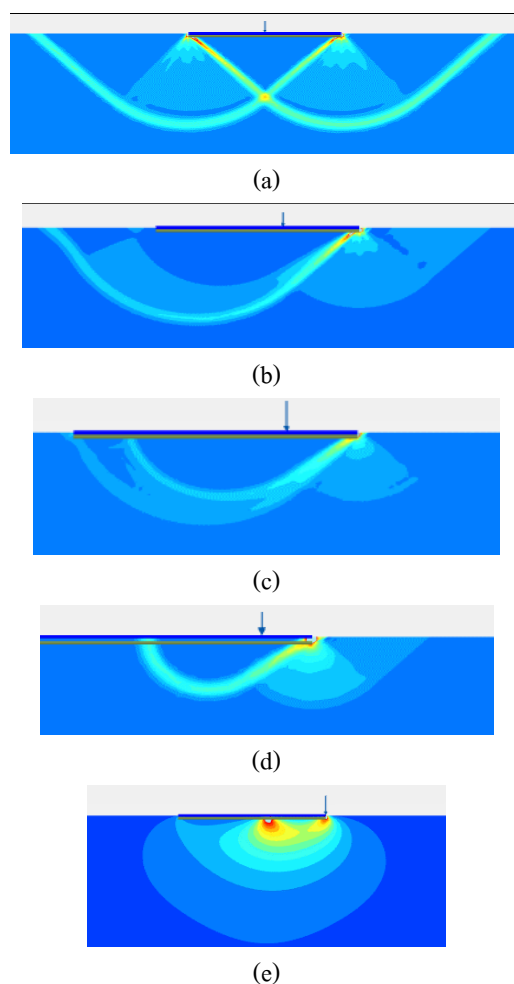
3. ผลการวิเคราะห์

รูปที่ 3, 4, 5 แสดงเส้นการเพิ่มขึ้นของความเครียดเฉือน (Incremental Shear Strain Contour) ในกรณีอัตราส่วนระยะฝั่งต่อความกว้างของฐานรากรูปตัวที (D/B) = 0, 0.25 และ 1.5 ตามลำดับ โดยในแต่ละกรณีจะเปรียบเทียบค่าของอัตราส่วนระยะเยื้องศูนย์กลางต่อความกว้างของฐานรากรูปตัวที (e/B) เท่ากับ 0, 0.125, 0.25, 0.375 และ 0.5 เพื่อศึกษาผลกระทบของตัวแปรดังกล่าว

จากรูปที่ 3 พบว่า ในกรณีที่ $D/B = 0$ การเพิ่มขึ้นของความเครียดเฉือนมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตาม e/B ที่เพิ่มขึ้น เมื่อไม่มีการเยื้องศูนย์กลางเส้นความเครียดเฉือนจะมีความสมมาตรเป็นลักษณะครึ่งวงกลมซ้อนทับกัน โดยความเครียดเฉือนจะมีค่ามากที่สุดที่บริเวณปลายของฐานราก โดยค่าการเพิ่มขึ้นของความเครียดที่ตรงกลางของฐานรากมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับตำแหน่งอื่น และเมื่ออัตราส่วน e/B มีค่าเพิ่มขึ้น การเพิ่มขึ้นของความเครียดเฉือนจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปจากสมมาตรเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงไป โดยตำแหน่งที่ความเครียดเฉือนสูงสุดจะอยู่บริเวณมุมของฐานรากที่ใกล้กับตำแหน่งแรงกระทำ จนกระทั่งในกรณีที่ e/B สูงสุดเท่ากับ 0.5 การเพิ่มขึ้นของความเครียดเฉือนสูงสุดจะอยู่ที่ตำแหน่งตรงกลางและบริเวณมุมของฐานราก โดยกรณีนี้ที่ตรงบริเวณมุมของฐานรากจะเกิดความเค้นที่มีค่าเข้าสู่อนันต์ทำให้ไม่สามารถคำนวณหาแรงในแนวดิ่งได้

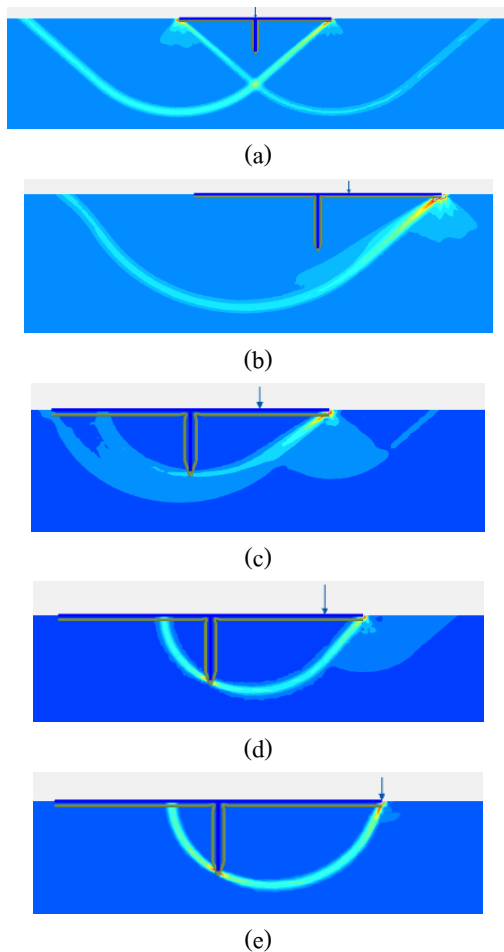
รูปที่ 4 แสดงการเคลื่อนตัวที่เพิ่มขึ้นในกรณีที่ $D/B = 0.25$ พบว่าความเครียดเฉือนมีค่าสมมาตรในกรณีที่ $e/B = 0$ เมื่อ e/B มีค่าเพิ่มขึ้น ความเครียดเฉือนมีค่าเปลี่ยนแปลงไป

มากที่สุดที่บริเวณมุมของฐานรากเช่นเดียวกับกรณีที่ $D/B = 0$ แต่เส้นการเพิ่มขึ้นของความเครียดเฉือนจะค่อยๆตัดผ่านบริเวณปลายฐานรากรูปตัวที โดยความเครียดเฉือนในกรณี $e/B = 0.5$ จะเหมือนกับกรณีที่ D/B เท่ากับ 0 โดยเส้นความเครียดเฉือนที่เพิ่มขึ้นจะเริ่มจากปลายสุดและเคลื่อนผ่านข้างใต้สุดของส่วนที่ฝังในดินของฐานรากรูปตัวที การขยายตัวของเส้นแรงเฉือนในลักษณะนี้เป็นข้อพิสูจน์ได้ว่า ความเค้นตรงปลายสุดของฐานรากรูปตัวทีจะไม่เข้าสู่อนันต์ ทำให้ฐานรากรูปตัวทีที่มีแรงเยื้องศูนย์กลางอยู่ที่ปลายสุด ($e/B = 0$) สามารถคำนวณหาแรงกระทำในแนวดิ่งสูงสุด (Q) ที่กระทำได้



รูปที่ 3 เส้นการเพิ่มขึ้นของความเครียดเฉือนของฐานรากรูปตัวทีที่มีค่า $D/B = 0$ และ e/B (a) = 0, (b) = 0.125, (c) = 0.25, (d) = 0.375 และ (e) = 0.5

รูปที่ 5 แสดงการเคลื่อนตัวที่เพิ่มขึ้นในกรณีที่ $D/B = 1.5$ พบว่าความเครียดเฉือนมีค่าสมมาตรในกรณีที่ $e/B = 0$ เมื่อ e/B มีค่าเพิ่มขึ้น ความเครียดเฉือนมีค่าเปลี่ยนไปในกรณีนี้ จะมีความเครียดเฉือนอยู่บริเวณมุมทั้งสองมุมของฐานราก และค่อยๆเปลี่ยนไปตามอัตราส่วน e/B ที่เพิ่มขึ้น โดยแนวความเครียดเฉือนจะเลื่อนตำแหน่งขึ้นมามากขึ้นตามระยะยื่นของฐานรากรูปตัวที ซึ่งต่างจากกรณีที่ $D/B = 0$ และ 0.25

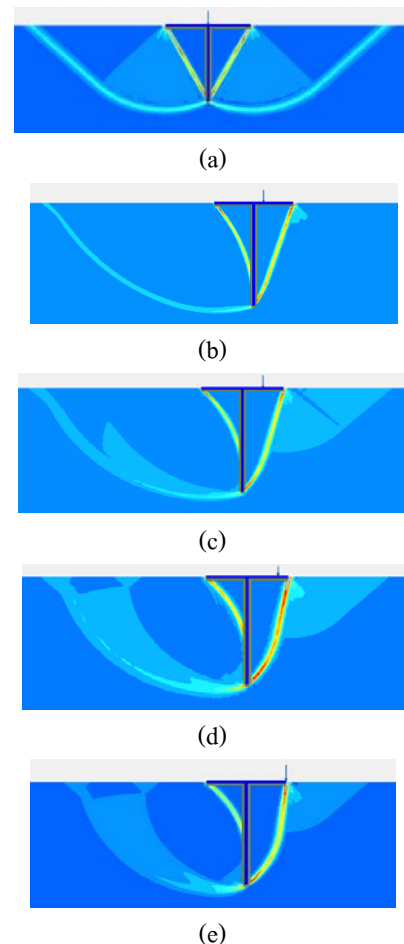


รูปที่ 4 เส้นการเพิ่มขึ้นของความเครียดเฉือนของฐานรากรูปตัวทีที่มีค่า $D/B = 0.25$ และ e/B (a) = 0, (b) = 0.125, (c) = 0.25, (d) = 0.375 และ (e) = 0.5

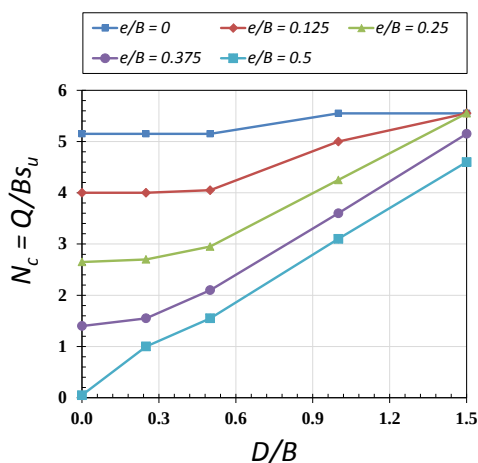
รูปที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแฟกเตอร์กำลังแบกทาน (N_c) กับอัตราส่วนระยะฝังต่อความกว้างของฐานรูปตัวที (D/B) ที่อัตราส่วน $e/B = 0, 0.125, 0.25, 0.375$ และ 0.5 พบว่าเมื่ออัตราส่วน D/B ที่ค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้แฟกเตอร์กำลังแบกทานมีค่าเพิ่มมากขึ้นในกรณีที่

e/B มาก ส่วนในกรณีที่ e/B น้อย ($e/B = 0$ และ 0.375) จะมีแฟกเตอร์กำลังค่อนข้างคงที่ในช่วงแรกก่อนที่จะเพิ่มขึ้นเมื่อ $D/B = 0.3$ เมื่อพิจารณาที่กรณี $D/B = 0$ และ $e/B = 0$ พบว่ามีค่าผลเฉลยเท่ากับ 5.14 ซึ่งเท่ากับผลเฉลยแม่นยำตรงของ Prandtl [5-6]

รูปที่ 7 ค่าความสัมพันธ์ของแฟกเตอร์กำลังแบกทานกับ อัตราส่วนระยะเชิงศูนย์กลางต่อความกว้างของฐานรากรูปตัวที ที่อัตราส่วน $D/B = 0, 0.25, 0.5, 1$ และ 1.5 พบว่า ค่าแฟกเตอร์กำลังแบกทานมีค่าลดลงเมื่อค่า e/B มีค่าเพิ่มมากขึ้น และเมื่อเพิ่มอัตราส่วน D/B จะทำให้ค่าแฟกเตอร์กำลังแบกทานมีค่าเพิ่มขึ้น

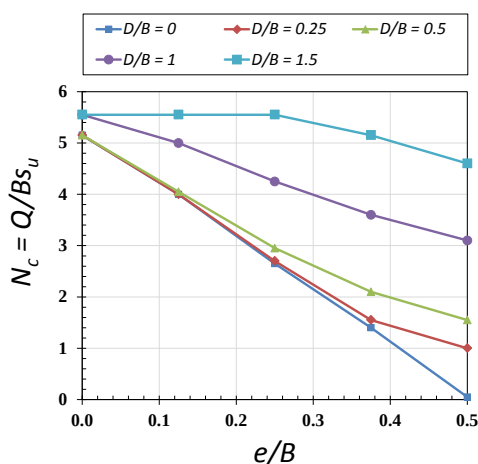


รูปที่ 5 เส้นการเพิ่มขึ้นของความเครียดเฉือนของฐานรากรูปตัวทีที่มีค่า $D/B = 1.5$ และ e/B (a) = 0, (b) = 0.125, (c) = 0.25, (d) = 0.375 และ (e) = 0.5



รูปที่ 6 ค่าความสัมพันธ์ของแฟกเตอร์กำลังแบกทานกับอัตราส่วนระยะฝั่งต่อความกว้างของฐานรูปตัวที่

นอกจากนี้ จากรูปที่ 6 และ 7 ยังพบว่า กรณี $D/B = 0$, 0.25, 0.5 จะมีค่าแฟกเตอร์กำลังแบกทานใกล้เคียงกันในช่วงแรก และจะเริ่มแตกต่างกันในช่วงหลัง สำหรับกรณีที่ $e/B = 0.5$ กรณี $D/B = 0$ จะให้ค่าแฟกเตอร์กำลังแบกทานเท่ากับ 0 หรือแรงกด (Q) เท่ากับ 0 ในขณะที่สองกรณีที่เหลือให้ค่ามากกว่า 0



รูปที่ 7 ค่าความสัมพันธ์ของแฟกเตอร์กำลังแบกทานกับ อัตราส่วนระยะเยื้องศูนย์กลางต่อความกว้างของฐานรากรูปตัวที่

ในแง่ของการใช้งาน เนื่องจากผลเฉลยทั้งหมดอยู่ในรูปของตัวแปรไร้มิติ ผู้ใช้ตารางสามารถคำนวณได้จากขนาดความกว้าง (B) ของฐานรากรูปตัวที่ เช่น $B = 1$ เมตร จากนั้นก็พิจารณาว่าแรงเยื้องศูนย์กลางไปจากจุดกึ่งกลางของฐานราก (e) เท่าไหร่ เช่น เยื้องไป $e = 0.25$ เมตร ดังนั้นจะได้ว่า $e/B = 0.25$ ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ไร้มิติ

จากนั้นผู้ใช้ต้องลองกำหนดความยาวของระยะฝั่ง (D) ของฐานรากขึ้นมา เช่น $D = 1$ เมตร ก็จะได้ว่า $D/B = 1$ ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ไร้มิติเช่นกัน จากนั้น นำค่าพารามิเตอร์ไร้มิติทั้งสอง (e/B และ D/B) ไปพิจารณาในรูปที่ 6 (หรือรูปที่ 7) ก็จะพบว่า ค่า N_c หรือ Q/Bs_u ที่ได้จะมีค่าประมาณ 3.6 ซึ่งหมายถึงฐานรากสามารถรับแรงกดแนวตั้งสูงสุดหรือ $Q = 3.6Bs_u$ สำหรับค่า s_u หรือกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดินเหนียวอ่อนชั้นบนสุด (First Layer Soft Clay) ของกรุงเทพมหานคร จะมีค่าอยู่ประมาณ 1.5 ดัน/เมตร ดังนั้นค่า $Q = (3.6 \times 1 \times 1.5) = 5.4$ ดัน ซึ่งหมายถึงฐานรากที่มีความยาว 1 เมตรในดินเหนียวอ่อนชั้นแรกของกรุงเทพมหานครสามารถรับแรงแนวตั้งที่เยื้องศูนย์กลาง 0.25 เมตร (อาจจะเป็แรงที่ถ่ายลงมาจากเสาเป็นต้น) ได้ด้วยแรงสูงสุด 5.4 ดัน (โดยค่า Q ตัวนี้ ยังไม่มีการนำเอาไปหาร FS (Factor of Safety) หากนำไปหาร FS จะได้ $Q_{FS} = Q/FS$ ซึ่งค่าที่ได้จะมีค่าน้อยลงโดยค่า FS ขึ้นอยู่กับผู้ออกแบบเป็นผู้กำหนด)

4. สรุป

งานวิจัยนี้นำเสนอการวิเคราะห์แรงกดในแนวตั้งเยื้องศูนย์กลางของฐานรากรูปตัวที่ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อศึกษาผลกระทบของตัวแปรต่อค่าแฟกเตอร์กำลังแบกทาน (N_c) จากผลการศึกษาพบว่าค่าแฟกเตอร์กำลังแบกทานขึ้นอยู่กับตัวแปรดังนี้

1. อัตราส่วนระยะฝั่งต่อความกว้างของฐานรากรูปตัวที่ (D/B)
2. อัตราส่วนระยะเยื้องศูนย์กลางต่อความกว้างของฐานรากรูปตัวที่ (e/B)

จากการวิเคราะห์พบว่าเมื่อ D/B มีค่ามากขึ้นจะทำให้ค่าแฟกเตอร์กำลังแบกทานมีค่าเพิ่มมากขึ้นและค่า e/B มากขึ้นจะส่งผลให้แฟกเตอร์กำลังแบกทานมีค่าลดลง

ท้ายที่สุด ผู้เขียนได้นำเสนอตัวอย่างการออกแบบฐานรากรูปตัวที่ในดินเหนียวอ่อนกรุงเทพมหานครโดยใช้รูปที่ 6 หรือ 7 ในการคำนวณ

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] K. Terzaghi, Theoretical Soil Mechanics, New York: Wiley. USA, 1943.
- [2] A. W. Skempton, "The Bearing Capacity of Clays", Building Research Congress, London, 1, pp. 180–189, 1951.
- [3] G. G. Meyerhof, "The Ultimate Bearing Capacity of Foundations", Geotechnique, No. 4, pp. 301–332, 1951.
- [4] G. G. Meyerhof, "Some Recent Research on Bearing Capacity of Foundations", Canadian Geotechnical Journal, Vol. 1, pp. 16–26, 1963.
- [5] Prandtl, L. "Über die Härte Plastischer Körper. Nachr. Ges. Wiss. Göttingen, Math-Phys. Kl. 12, pp. 74–85, 1920.
- [6] L. Prandtl, "Eindringungsfestigkeit und Festigkeit von Schneiden. Zeit. Angew. Math. Mech. 1, 15, 1921.
- [7] G. T. Houlsby, C. M. Martin, "Undrained Bearing Capacity Factors for Conical Footings on Clay", Geotechnique 53, No. 5, pp. 513–520, 2003.
- [8] R. Salgado, A. V. Lyamin, S. W. Sloan, H. S. Yu, "Two and Three-Dimensional Bearing Capacity of Foundations in Clay", Geotechnique 54, No. 5, pp. 297–306, 2004.
- [9] D. H. Edwards, L. Z. Dravkovic, D. M. Potts, "Depth Factors for Undrained Bearing Capacity". Geotechnique Vol. 55, No. 10, pp. 755–758, 2005.
- [10] S. Keawsawasvong, B. Ukritchon, "Effect of Embedded Depth on End Bearing Capacity of Footing on Clays", Engineering Journal Chiang Mai University, Vol. 23, No. 1, pp. 11–19, 2016.
- [11] S. Keawsawasvong, B. Ukritchon, "Bearing Capacity of Strip Foundations on Anisotropic Clay Using NGI-ADP Constitutive Model" Ladkrabang Engineering Journal, Vol. 33, No. 2, pp. 98–103, 2016.
- [12] B.M. Das, Principle of Foundation Engineering 2nd ed. PWS Kent Publishing Company, USA, 1990.
- [13] N. Kaya, M. Ornek, "Experimental and Numerical Studies of T-shaped Footing", Acta Geotechnica Slovenica, Vol. 10, No. 1, pp. 43–58, 2013.
- [14] R. B. J. Brinkgreve, PLAXIS 2D Version 8 Manual. A.A. Balkema Publishers, 2002: www.plaxis.com.
- [15] S.W. Sloan, "Geotechnical Stability Analysis". Géotechnique, Vol. 63, No. 7, pp. 531–572, 2013.

การเพิ่มความแม่นยำด้วยจำนวนภาพตัดที่ใช้ ในการประมวลผลหา ขนาดคละมวลรวมในแอสฟัลต์คอนกรีต

Increasing Accuracy by Number of Sectional Images used in Processing the Aggregate Gradation in Asphalt Concrete

กฤษฎา แสนสมบูรณ์ บุญชัย แสงเพชรงาม ศิวารักษ์ อุ่นศิริไธย
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการใช้เทคนิคการประมวลผลภาพวิเคราะห์ด้วยวิธีการกัดกร่อนภาพหลายขนาด (Size-based multiple erosion) ซึ่งปรับปรุงมาจากเทคนิค watershed transform ในการหาสัดส่วนขนาดคละของมวลรวมในส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต ผู้วิจัยได้ใช้วิธีที่ปรับปรุงขึ้นมาวิเคราะห์หาเปอร์เซ็นต์การค้าง(%retained)ของมวลรวมจากภาพสแกนหน้าตัดชิ้นงานแอสฟัลต์คอนกรีต แล้วนำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับเปอร์เซ็นต์การค้างด้วยวิธีการร่อนผ่านตะแกรงในห้องปฏิบัติการ ที่ได้บันทึกไว้ก่อนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต ผลทางสถิติชี้ให้เห็นได้ว่าค่าเปอร์เซ็นต์การค้างที่ได้จากการประมวลผลภาพไม่มีความแตกต่างกับค่าเปอร์เซ็นต์การค้างด้วยวิธีร่อนตะแกรง นอกจากนี้ผู้วิจัยยังได้วิเคราะห์อิทธิพลของขนาดพื้นที่ภาพหน้าตัดและจำนวนภาพหน้าตัดที่ใช้ในการวิเคราะห์ และพบว่าการใช้ขนาดพื้นที่ภาพหน้าตัดและจำนวนภาพหน้าตัดที่มากขึ้น จะช่วยเพิ่มความถูกต้องแม่นยำของผลลัพธ์ค่าเปอร์เซ็นต์การค้างของมวลรวมได้มากขึ้น

คำสำคัญ : แอสฟัลต์คอนกรีต การประมวลผลภาพ ขนาดคละ

Abstract

This paper presents the application of image processing (IP) technique using size-based multiple erosion method which is derived from the watershed transform method to determine the percent retained of aggregates in asphalt concrete. The method uses scanned cross-sectional images of asphalt concrete specimens as the input and yields the percent retained on standard aggregate sizes as the results. The statistical analysis reveals that the percent retained results obtained by the IP method are not different from those obtained by sieving method in laboratory. Moreover, the statistical analysis shows that the bigger image area and the more number of sectional images can reduce the deviation of the percent retained results in reference to the sieving method.

Keywords : Asphalt concrete, image processing, aggregate gradation, sieve analysis

1. บทนำ

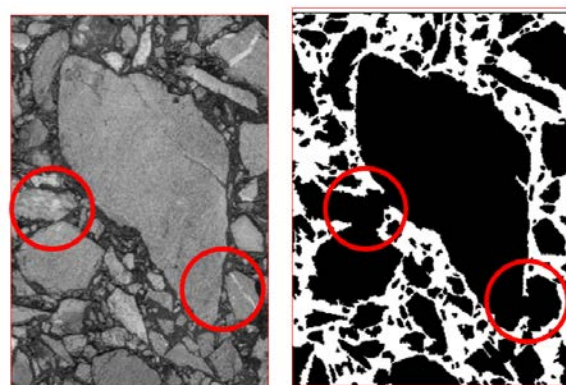
การกระจายตัวของหินขนาดต่างๆ หรือที่เรียกว่าขนาดคละนั้นเป็นสิ่งที่มีความสำคัญอย่างยิ่งในงานวิศวกรรมโยธาโดยเฉพาะงานวัสดุแอสฟัลต์ผสมร้อนที่ใช้ปูผิวถนนลาดยาง เพราะขนาดคละแต่ละแบบสามารถรับน้ำหนักได้แตกต่างกัน ขนาดคละที่ดีจะสามารถรับแรงได้ดีกว่าซึ่งจะช่วยให้อุณหภูมิถนนทนทานมากขึ้น [1]

การหาขนาดคละของวัสดุแอสฟัลต์ผสมร้อน จึงมักถูกใช้ในการควบคุมคุณภาพการก่อสร้างผิวทาง ซึ่งวิธีทดสอบปกติต้องนำวัสดุแอสฟัลต์ผสมร้อนมาสกัดแอสฟัลต์ออกจากมวลรวมก่อนแล้วจึงนำมวลรวมไปทดสอบวิเคราะห์ขนาดคละด้วยการคัดแยกด้วยตะแกรง [2,3] ทว่าข้อจำกัดในการทดสอบคือขั้นตอนทั้งหมดใช้เวลาประมาณหลายวัน ดังนั้นที่ผ่านมาได้มีหลายงานวิจัยริเริ่มใช้การประมวลผลภาพ (image processing) มาช่วยหาขนาดคละของมวลรวม เพื่อลดระยะเวลาให้เหลือน้อยลงด้วยการประมวลผลภาพสองมิติ [4-10] และการประมวลผลภาพสามมิติ [11-16] การประมวลผลภาพสามมิติ สามารถให้ผลลัพธ์มิติขนาดรูปทรงของเม็ดหินในวัสดุที่ครบทั้งความกว้าง ความยาว ความหนา ทว่าต้องการเครื่องมือพิเศษเช่น X-Ray Computerized Tomography ในการสแกนชิ้นงานวัสดุ ส่วนการประมวลผลภาพสองมิติ มีความสะดวกมากกว่า เพราะต้องการเพียงภาพถ่ายหรือภาพสแกนหน้าตัดวัสดุ แต่ได้ผลลัพธ์เพียงความกว้างและความยาวของเม็ดหินจากรูปตัดวัสดุ การใช้วิธีประมวลผลภาพสองมิติมาวิเคราะห์หาขนาดคละของมวลรวมจึงอาจไม่ได้ผลลัพธ์ที่ถูกต้อง

ในงานวิจัยนี้ จึงมีวัตถุประสงค์ที่ต้องการศึกษาว่า การหาขนาดคละมวลรวมด้วยวิธีประมวลผลภาพสองมิติ จะสามารถให้ความถูกต้องแม่นยำของผลลัพธ์ ที่เพียงพอหรือไม่ โดยใช้การทดลองปรับเปลี่ยนจำนวนภาพหน้าตัดที่ใช้วิเคราะห์ค่าเปอร์เซ็นต์การค้าง(%retained)ที่ได้จากการประมวลผลภาพ มาเปรียบเทียบกับ เปอร์เซ็นต์การค้างบนตะแกรงจากวิธีร่อนตะแกรงในห้องปฏิบัติการ

2. เทคนิคการคัดกรองภาพหลายขนาด

หลักการหาขนาดคละด้วยการประมวลผลภาพถ่ายสองมิติ คือการนำภาพหน้าตัดของแอสฟัลต์คอนกรีตมาแยกพิกเซล(pixels)ในภาพออกเป็นสองส่วน โดยกำหนดให้ส่วนหนึ่งเป็นสีขาว และอีกส่วนหนึ่งเป็นสีดำ ส่วนสีดำคือส่วนของมวลรวมละเอียดขนาดเล็กที่ถูกเคลือบด้วยแอสฟัลต์(mastic) และส่วนสีขาวคือหน้าตัดของมวลรวมหยาบขนาดกลางถึงขนาดใหญ่ แล้วใช้เทคนิค watershed transform (WT) [18] ซึ่งนิยามใช้กำหนดขอบเขตของภาพมวลรวมหยาบ และนำภาพมวลรวมหยาบที่ได้ไปคำนวณหาความกว้าง ความยาว และพื้นที่ของหิน ซึ่งทำให้สามารถคำนวณหาสัดส่วนน้ำหนักของหินขนาดต่างๆ ได้ ทว่าเทคนิค watershed transform ยังให้ผลลัพธ์ที่คลาดเคลื่อนซึ่งเกิดจากการนับภาพก้อนหินหลายก้อนที่อยู่ประชิดกันเป็นก้อนเดียวกัน ตัวอย่างแสดงในรูปที่ 1

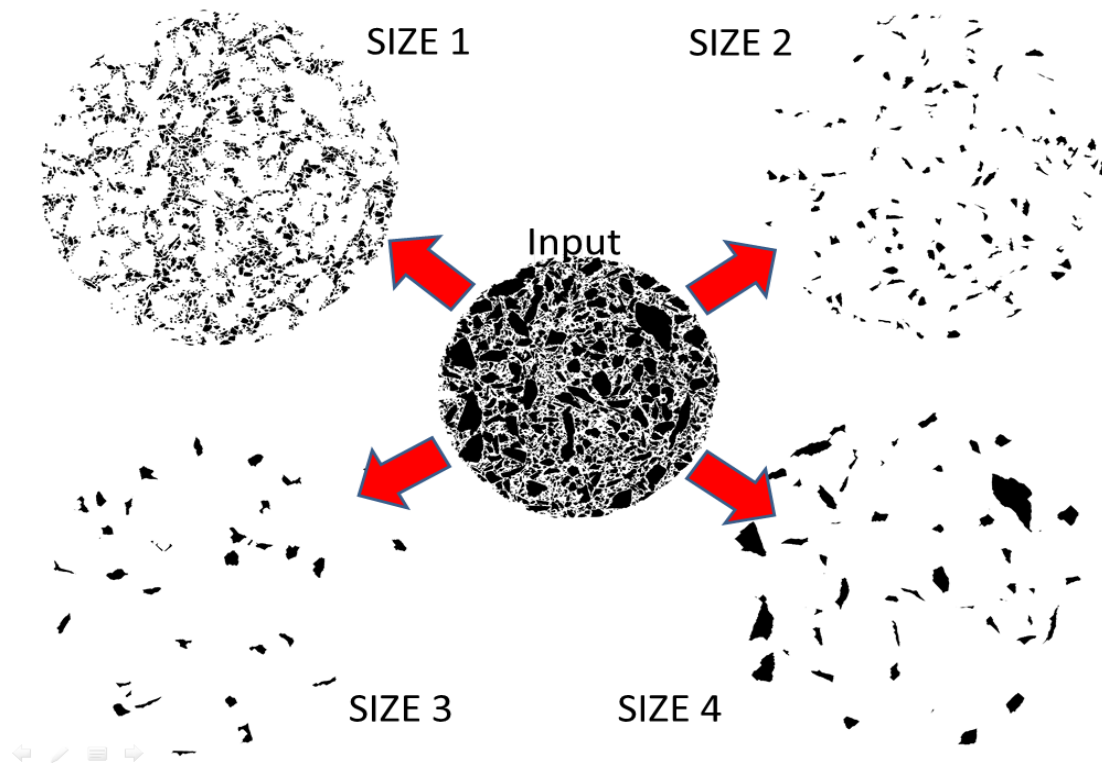


รูปที่ 1 ปัญหาภาพมวลรวมอยู่ติดกัน

ในงานวิจัยนี้ได้ปรับปรุงแก้ไขข้อจำกัดดังกล่าว ด้วยการนำเทคนิคการคัดกรองภาพหลายขนาด (Size-Based Multiple erosion) [17] เทคนิคนี้นำภาพหลังจากที่ผ่านขั้นตอน watershed transform มาแยกภาพมวลรวมออกเป็น 4 กลุ่มตามขนาด ด้วยฟังก์ชัน shape logic ในโปรแกรม ImageJ [19] ขนาดพื้นที่ของมวลรวมทั้ง 4 ขนาดมีดังนี้ 1-10,000 pixel , 10,001-30,000 pixel , 30,001-50,000 pixel และ 50,001 ขึ้นไป ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 2 และนำภาพมวลรวมแต่ละขนาดมาผ่านวิธีการคัดกรอง (morphological erosion) ที่ขนาดต่างๆ กัน โดยใช้หลักที่ว่ามวลรวมที่ขนาดใหญ่กว่า จะใช้จำนวน pixels ในการ

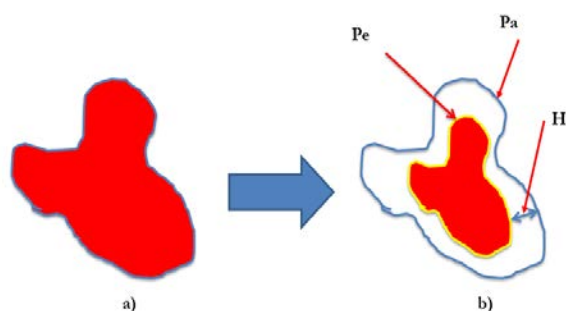
กัฏกร่อนมากกว่า โดยผู้วิจัยได้เลือกค่าของการกัฏกร่อนของมวลรวมแต่ละขนาดไว้ดังนี้ 5 pixels สำหรับมวลรวมที่มีขนาด 1-10,000 pixels 20 pixels สำหรับมวลรวมที่มีขนาด 10,001-30,000 pixels 30 pixels สำหรับมวลรวมที่

ขนาด 30,001-50,000 pixels และ 60 pixels สำหรับมวลรวมที่มีขนาด 50,001 pixels ขึ้นไป และนำภาพที่ผ่านการกัฏกร่อนมาคำนวณวิเคราะห์หาขนาดต่อไปดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 การแยกภาพมวลรวมออกเป็นสี่ขนาด แล้วกัฏกร่อนตามขนาดของมวลรวม

แต่ในเทคนิคนี้มีการสูญเสียพื้นที่ของมวลรวมบางส่วนไป ในระหว่างการกัฏกร่อนภาพจึงต้องมีการคำนวณปรับแก้พื้นที่ที่ภาพมวลรวมดังแสดงในรูปที่ 3 โดยคำนวณตามสมการที่ (1) - (4)



รูปที่ 3 การปรับแก้ขนาดขนาดที่ถูกกัฏกร่อน

$$P_c = 2\pi R_c \quad (1)$$

$$R_a = R_c + H \quad (2)$$

$$P_a = 2\pi R_a \quad (3)$$

$$A_a = A_c + P_a H \quad (4)$$

โดยที่

P_c คือเส้นรอบรูปของภาพมวลรวมที่ถูกกัฏกร่อน

R_c คือรัศมีเทียบเท่า (equivalent radius) ของภาพมวลรวมที่ถูกกัฏกร่อน

H คือความหนาที่กัฏกร่อนหรือจำนวน pixels คูณด้วยค่า mm/pixel

R_a คือรัศมีเทียบเท่าปรับแก้ของภาพมวลรวม

P_a คือเส้นรอบรูปปรับแก้ของภาพมวลรวม

A_c คือพื้นที่ภาพมวลรวมที่ถูกกัฏกร่อน

A_a คือพื้นที่ภาพมวลรวมที่ปรับแก้

3. การทดลองเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การค้างบน

ตะแกรง

ในขั้นตอนการทดลองตามวัตถุประสงค์การศึกษา ผู้วิจัย ได้ผลิตชิ้นงานแอสฟัลต์คอนกรีตทรงกระบอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 100 มิลลิเมตร สูง 100 มิลลิเมตร

จำนวน 3 ก่อนตัวอย่าง ด้วยเครื่องบดอัดโรตารีเพื่อควบคุมความหนาแน่นให้เท่ากัน แล้วนำชิ้นงานมาตัดด้วยใบเลื่อยและสแกนภาพรอยตัดจำนวน 8 ภาพต่อก้อนตัวอย่าง ขนาดผลรวมและปริมาณแอสฟัลต์ที่ใช้ผลิตชิ้นงานได้ผ่านเกณฑ์ข้อกำหนดการออกแบบส่วนผสมด้วยวิธีมาเซลมาแล้วในงานวิจัยที่ผ่านมา[20] ซึ่งมีขนาดผลแบบ dense graded ตามกราฟขนาดผลในรูปที่ 4 และใช้แอสฟัลต์ 5.5% โดยน้ำหนักของส่วนผสม

ในขั้นตอนการเตรียมวัสดุผลรวมที่ใช้ผลิตชิ้นงาน ผู้วิจัยเตรียมผลรวมตามขนาดผลที่กำหนดโดยผ่านการวิเคราะห์ขนาดผลด้วยวิธีร่อนผ่านตะแกรงจำนวน 3 ชุด เพื่อนำผลขนาดผลด้วยวิธีร่อนตะแกรงจริงมาเปรียบเทียบกับสถิติกับผลขนาดผลจากวิธีประมวลผลภาพ จากนั้นนำภาพตัดมาประมวลผลภาพสองมิติด้วยวิธีการกักร่อนภาพตามขนาด และคำนวณข้อมูลด้านมิติ

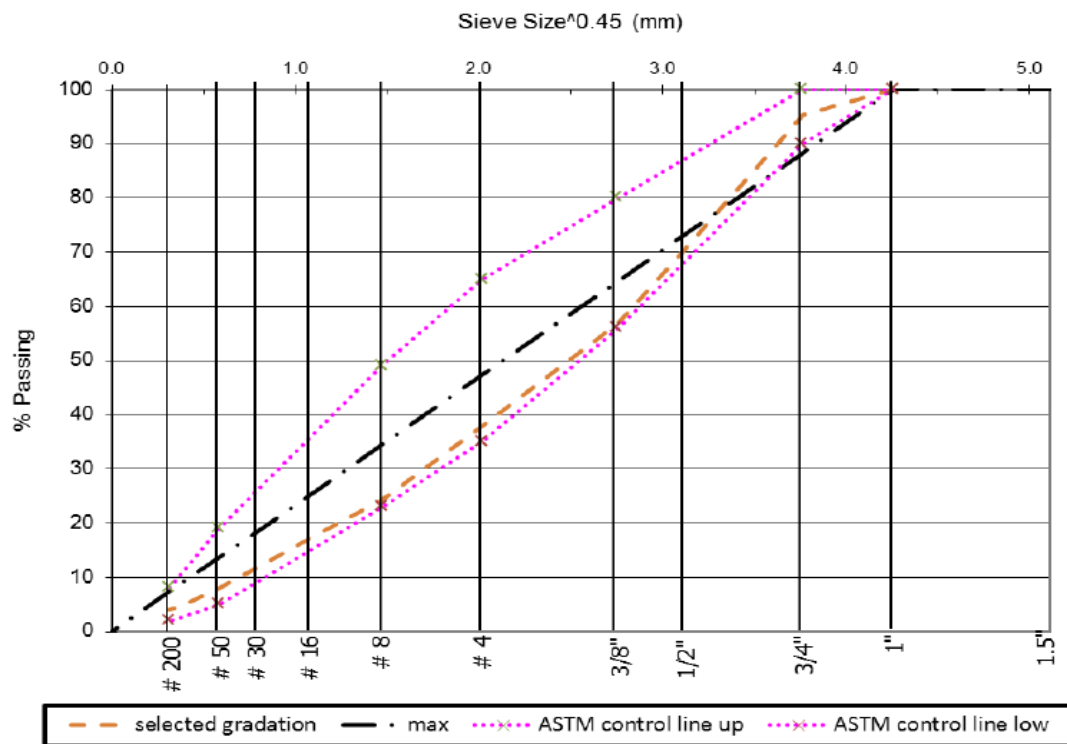
ขนาดของภาพผลรวมที่อยู่ในหนึ่งภาพตัดชิ้นงาน อันได้แก่ จำนวนก้อน เส้นรอบรูป ความกว้าง ความยาว และพื้นที่ของภาพผลรวมแต่ละก้อน [17]

การคำนวณขนาดผล ใช้ความกว้างของภาพผลรวมระบุขนาดตะแกรงที่ค้าง และคำนวณเปอร์เซ็นต์การค้าง (%Retained) ของขนาดตะแกรงที่ค้าง โดยใช้พื้นที่ภาพผลรวมมาคำนวณตามสมการที่ (5)

$$\% \text{Retained by area} = \frac{\sum_{i=1}^n a_i}{A_{\text{total}}} \times 100 \quad (5)$$

โดยที่ a_i คือพื้นที่ภาพผลรวมก้อนที่ i ที่ค้างบนขนาด

ตะแกรง $\sum_{i=1}^n a_i$ คือผลรวมของพื้นที่ที่ผลรวมทุกก้อนที่ค้างบนขนาดตะแกรง A_{total} คือพื้นที่ภาพตัดชิ้นงาน



รูปที่ 4 กราฟแสดงขนาดผลของก้อนตัวอย่างผลรวมแอสฟัลต์คอนกรีต[20]

4. ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

สำหรับการวิเคราะห์ผลเปอร์เซ็นต์การค้าง ผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์ไว้เป็นสามประเด็น คือ

- 1) เปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างวิธีประมวลผลภาพกับวิธีการร่อนตะแกรงในห้องปฏิบัติการ
- 2) วิเคราะห์อิทธิพลของพื้นที่หน้าตัดว่าส่งผลต่อการคำนวณเปอร์เซ็นต์การค้าง หรือไม่

3) วิเคราะห์อิทธิพลของจำนวนหน้าตัดว่าส่งผลต่อการคำนวณเปอร์เซ็นต์การค้ำหรือไม่

4.1 เปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างวิธีประมวลผล

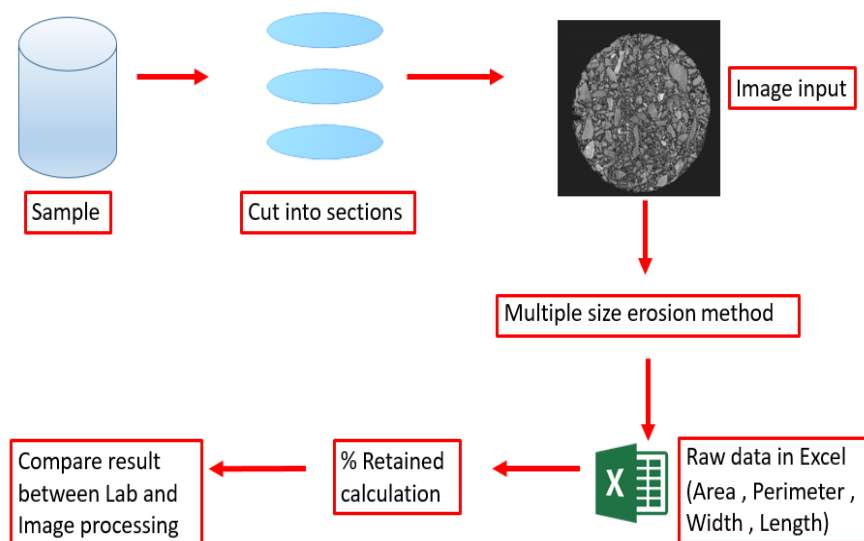
ภาพกับวิธีร้อนตะแกรงในห้องปฏิบัติการ

ในส่วนนี้ผู้วิจัยได้นำค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์การค้ำด้วยวิธีร้อนตะแกรงของก้อนตัวอย่างทั้งสามก้อนจากห้องปฏิบัติการ มาเทียบกับค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์การค้ำที่วิเคราะห์จากหน้าตัดของก้อนตัวอย่างทั้งหมดสามก้อน โดยใช้ 8 หน้าตัดในหนึ่งก้อนตัวอย่าง ทำให้ได้ภาพหน้าตัดทั้งหมด 24 หน้าตัด ซึ่งค่าเปอร์เซ็นต์การค้ำบน

ตะแกรงของก้อนตัวอย่างแต่ละก้อนจากห้องปฏิบัติการ ได้ถูกแสดงไว้ในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 เปอร์เซ็นต์การค้ำที่ได้จากการร้อนตะแกรงในห้องปฏิบัติการของแต่ละก้อนตัวอย่าง

Sieve size	Sample 1	Sample 2	Sample 3
1/2in	7.73	7.66	5.61
3/8in	6.36	8.12	6.89
4#	17.80	17.82	20.50
8#	20.41	18.73	18.38



รูปที่ 5 กระบวนการหาเปอร์เซ็นต์การค้ำด้วยวิธีประมวลผลภาพ

ตารางที่ 2 แสดงผลการวิเคราะห์ความแตกต่างระหว่างค่าของเปอร์เซ็นต์การค้ำบนตะแกรงระหว่างการทดสอบในห้องปฏิบัติการและการคำนวณด้วยเทคนิคการประมวลผลภาพ โดยใช้ก้อนตัวอย่างสามก้อน โดยมีสมมติฐานว่าในที่นี้คือค่าเปอร์เซ็นต์การค้ำด้วยวิธีร้อนตะแกรงในห้องปฏิบัติการมีค่าเท่ากับค่าเปอร์เซ็นต์การค้ำที่คำนวณด้วยวิธีประมวลผลภาพ

ผลการวิเคราะห์ได้ค่าดังนี้ สำหรับมวลรวมขนาด 1/2 นิ้ว 3/8 นิ้ว เบอร์ 4# และเบอร์ 8# มีค่า p-value มากกว่า

4.2 วิเคราะห์อิทธิพลของขนาดพื้นที่หน้าตัดที่ใช้ในการคำนวณ

ผู้วิจัยได้เปรียบเทียบระหว่างเปอร์เซ็นต์การค้ำด้วยวิธีร้อนตะแกรงในห้องปฏิบัติการกับเปอร์เซ็นต์การค้ำ

0.05 ทำให้ยอมรับสมมติฐานว่าง ซึ่งหมายความว่าค่าเปอร์เซ็นต์การค้ำด้วยวิธีร้อนตะแกรงในห้องปฏิบัติการไม่มีความแตกต่างกันกับค่าเปอร์เซ็นต์การค้ำที่คำนวณด้วยวิธีประมวลผลภาพในทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% จากผลการวิเคราะห์ในส่วนนี้จึงสรุปได้ว่าเปอร์เซ็นต์การค้ำที่วิเคราะห์จากการประมวลผลภาพหน้าตัดไม่มีความแตกต่างกับเปอร์เซ็นต์การค้ำตะแกรงที่คำนวณได้จากสามก้อนตัวอย่างในห้องปฏิบัติการ

ที่คำนวณจากการประมวลผลภาพ โดยใช้ภาพหน้าตัดขนาด 60x60 mm ที่มีพื้นที่ 3,600 mm² กับภาพหน้าตัดวงกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 mm คิดเป็นพื้นที่ 7,854 mm² ทำให้ผลต่างจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการน้อยที่สุด ผลการวิเคราะห์ในตารางที่ 3 แสดงให้เห็นว่าหน้า

ัดขนาด 60x60 mm ให้ผลของค่าความแตกต่างกำลังสองเป็น 152 ส่วนหน้าตัดวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 mm ให้ผลของค่าความแตกต่างกำลังสอง

เป็น 30 จึงสรุปได้ว่า การใช้พื้นที่ขนาดใหญ่กว่าในการคำนวณให้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกับวิธีร้อนตะแกรงในห้องปฏิบัติการได้ดีกว่า

ตารางที่ 2 แสดงผลการวิเคราะห์ความแตกต่างสำหรับ 4 ขนาดตะแกรง ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การค้ำด้วยการร้อนตะแกรงในห้องปฏิบัติการและ เปอร์เซ็นต์การค้ำที่คำนวณด้วยเทคนิคการประมวลผลภาพ

1/2 inch			3/8 inch			#4			#8		
	LAB	IMAGE		LAB	IMAGE		LAB	IMAGE		LAB	IMAGE
Mean	7.00	7.88	Mean	7.12	5.87	Mean	18.7	16.39	Mean	19.17	17.97
Variance	1.45	37.09	Variance	0.82	7.05	Variance	2.39	14.93	Variance	1.18	6.45
Observations	3	24	Observations	3	24	Observations	3	24	Observations	3	24
Hypothesized Mean	0		Hypothesized Mean	0		Hypothesized Mean	0		Hypothesized Mean	0	
df	19		df	8		df	6		df	5	
t Stat	-0.62		t Stat	1.66		t Stat	1.94		t Stat	1.47	
P(T<=t) one-tail	0.27		P(T<=t) one-tail	0.07		P(T<=t) one-tail	0.05		P(T<=t) one-tail	0.1	
t Critical one-tail	1.73		t Critical one-tail	1.86		t Critical one-tail	1.94		t Critical one-tail	2.02	
P(T<=t) two-tail	0.54		P(T<=t) two-tail	0.14		P(T<=t) two-tail	0.1		P(T<=t) two-tail	0.2	
t Critical two-tail	2.09		t Critical two-tail	2.31		t Critical two-tail	2.45		t Critical two-tail	2.57	

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์การค้ำด้วยวิธีร้อนตะแกรงในห้องปฏิบัติการและวิธีประมวลผลภาพที่ใช้ภาพสองขนาดหน้าตัด

Sieve size	60x60 mm ²			Diameter 100 mm		
	IMAGE	LAB	ERROR ²	IMAGE	LAB	ERROR ²
1/2in	4.80	7.73	8.50	4.10	7.73	12.90
3/8in	0.40	6.36	35.60	5.00	6.36	2.00
#4	9.60	17.8	67.20	13.90	17.8	15.10
#8	14.00	20.41	41.30	19.60	20.41	0.60
SUM SQUARE ERROR			152.6	SUM SQUARE ERROR		30.5

60x60 mm² หมายถึง พื้นที่หน้าตัดสี่เหลี่ยมขนาด 60mm x 60 mm

Diameter 100 mm หมายถึง ภาพหน้าตัดวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 mm

IMAGE หมายถึง เปอร์เซ็นต์การค้ำเฉลี่ยที่คำนวณได้จากการประมวลผลภาพ

LAB หมายถึง เปอร์เซ็นต์การค้ำด้วยวิธีร้อนตะแกรงจากตัวอย่างก้อนที่ 1

4.3 วิเคราะห์อิทธิพลของจำนวนหน้าตัดที่ใช้ในการประมวลผลภาพ

สำหรับการวิเคราะห์อิทธิพลของจำนวนพื้นที่หน้าตัดที่ใช้ในการประมวลผลภาพ ผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์การค้ำด้วยการประมวลผลภาพโดยใช้ภาพสองหน้าตัด สี่หน้าตัด และหกหน้าตัด เปรียบเทียบกับค่าเปอร์เซ็นต์การค้ำด้วยวิธีร้อนตะแกรงโดยใช้ค่าความแตกต่างกำลังสองของค่าเปอร์เซ็นต์การค้ำ (Square Error) เป็นตัวเปรียบเทียบ ผลการ

เปรียบเทียบแสดงในตารางที่ 4 พบว่าการใช้ภาพจำนวนสองหน้าตัดมีค่า Sum Square Error เท่ากับ 54 จำนวนสี่หน้าตัดมีค่าเท่ากับ 18 และจำนวนหกหน้าตัดมีค่าเท่ากับ 15 จึงกล่าวได้ว่าการใช้ภาพหน้าตัดจำนวนมากขึ้นในการประมวลผลภาพทำให้ได้ผลค่าเปอร์เซ็นต์การค้ำใกล้เคียงกับวิธีร้อนตะแกรงในห้องปฏิบัติการมากขึ้น

5.สรุป

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการวิเคราะห์หาขนาดผลของมวลรวมในวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตโดยใช้วิธีประมวลผลภาพหน้าตัดสองมิติของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยเทคนิคการกัดกร่อนภาพหลายขนาด ซึ่งสามารถให้ผลลัพธ์เป็นค่าเปอร์เซ็นต์การค้ำตามขนาดเบอร์ตะแกรงมาตรฐาน ผลการวิเคราะห์ทางสถิติเปรียบเทียบกับค่าเปอร์เซ็นต์การค้ำด้วยวิธีร่อนตะแกรงในห้องปฏิบัติการ ซึ่งเป็นวิธีหาขนาดผลดั้งเดิมพบว่า เทคนิคการประมวลผลภาพที่ใช้ในงานวิจัยสามารถให้ค่าเปอร์เซ็นต์การค้ำของมวลรวมได้ไม่แตกต่างจากการหาค่าเปอร์เซ็นต์การค้ำด้วยวิธีร่อนตะแกรง นอกจากนี้ผู้วิจัยยังพบว่าขนาดพื้นที่ภาพหน้าตัด และจำนวนภาพหน้าตัดที่ใช้ประมวลผลภาพ ยังส่งผลต่อความแม่นยำของผลการคำนวณเปอร์เซ็นต์การค้ำ โดยขนาดพื้นที่ภาพหน้าตัดที่มีขนาดใหญ่กว่าจะมีความแม่นยำที่ดีกว่า และจำนวน

ภาพหน้าตัดที่มากขึ้นจะส่งผลให้ค่าผลการคำนวณเปอร์เซ็นต์การค้ำที่แม่นยำมากขึ้น ดังนั้นจึงน่าจะมีความเป็นไปได้ที่จะนำเทคนิคการประมวลผลภาพมาใช้หาขนาดผลของมวลรวมต่อไป

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณในการสนับสนุนทุนวิจัยจาก “ทุน 90 ปี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย” กองทุนรัชดาภิเษกสมโภช จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และ “ทุนโครงการพัฒนานักวิจัยและงานวิจัยเพื่ออุตสาหกรรม(พวอ.)” สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย(สกว.) และขอขอบคุณ คุณสมพงษ์ ขำแจ้ง ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในงานห้องปฏิบัติการ

ตารางที่ 4 ผลการเปรียบเทียบค่าผลต่างกำลังสองของเปอร์เซ็นต์การค้ำตะแกรงแบบสองหน้าตัดสี่หน้าตัดและหกหน้าตัด

SIZE	2sect	4sect	6sect	LAB	2sect_error ²	4sect_error ²	6sect_error ²
1/2in	8.30	6.50	6.00	5.61	7.20	0.80	0.20
3/8in	7.40	7.10	6.40	6.89	0.20	0.10	0.20
#4	13.80	16.40	16.70	20.50	44.90	16.80	14.70
#8	16.90	17.90	18.00	18.38	2.30	0.30	0.10
SUM SQUARE ERROR					54.60	18.00	15.20

SIZE หมายถึง ขนาดตะแกรงที่พิจารณา

2sect หมายถึง เปอร์เซ็นต์การค้ำจากการวิเคราะห์ด้วยภาพจำนวนสองหน้าตัด

4sect หมายถึง เปอร์เซ็นต์การค้ำจากการวิเคราะห์ด้วยภาพจำนวนสี่หน้าตัด

6sect หมายถึง เปอร์เซ็นต์การค้ำจากการวิเคราะห์ด้วยภาพจำนวนหกหน้าตัด

LAB หมายถึง เปอร์เซ็นต์การค้ำด้วยวิธีร่อนตะแกรงจากตัวอย่างอย่างก๊อที่ 3

2sect_error² หมายถึง ผลต่างกำลังสองของเปอร์เซ็นต์การค้ำตะแกรงที่ได้จากสองหน้าตัดและห้องปฏิบัติการ

4sect_error² หมายถึง ผลต่างกำลังสองของเปอร์เซ็นต์การค้ำตะแกรงที่ได้จากสี่หน้าตัดและห้องปฏิบัติการ

6sect_error หมายถึง ผลต่างกำลังสองของเปอร์เซ็นต์การค้ำตะแกรงที่ได้จากหกหน้าตัดและห้องปฏิบัติการ

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] F.L. Roberts, P.S. Kandhal, E.R. Brown, D.Y. Lee, and T.W. Kennedy, “Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design, and Construction, 2nd ed.” National Asphalt Pavement Association Education Foundation. Lanham, MD., 1996, pp. 121-172.
- [2] ASTM D2172 / D2172M-11, “Standard Test Methods for Quantitative Extraction of Bitumen From Bituminous Paving Mixtures”, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2011.
- [3] ASTM C136 / C136M-14, “Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates,” ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014.
- [4] A.K.H. Kwan, C.F. Mora and H.C. Chan, “Particle shape analysis of coarse aggregate using digital

- image processing,” *Cement and Concrete Research*, pp. 1403–1410, May, 1999.
- [5] K. Chen, J. Zaniewski, and P. Zhao. "2D Image based sieving for particle aggregate gradation." *Journal of Electronics (China)* 25.2 (2008): 277-282.
- [6] L. Bruno, G. Parla and . Celauro, "Image analysis for detecting aggregate gradation in asphalt mixture from planar images," Elsevier, Italy, pp. 21-30 Abbrev. October, 2011.
- [7] F.S. Barbosa, M.C.R. Farage a, A.-L. Beaucour and S. Ortola, "Evaluation of aggregate gradation in lightweight concrete via image processing," *Construction and Building Materials*, Elsevier, Brazil, pp. 7-11, November, 2011.
- [8] I. S. Bessa,. C. Branco and J. B. Soares, "Evaluation of different digital image processing software for aggregates and hot mix asphalt characterizations," *Construction and Building Materials*, pp. 370-378, September, 2012.
- [9] M. Vadood, M. S. Johari and A. R. Rahaei, "Introducing a simple method to determine aggregate gradation of hot mix asphalt using image processing," *International Journal of Pavement Engineering*, Iran, vol. 15, no. 2, pp. 142–150, 2013
- [10] K. H. Moon, A. C. Falchetto, M. P. Wistuba and J. H. Jeong, "Analyzing Aggregate Size Distribution of Asphalt Mixtures Using Simple 2D Digital Image Processing Techniques," *Arab J Sci Eng*, February, 2015.
- [11] D. L. Sahagian and A. A. Proussevitch, "3D particle size distributions from 2D observations: stereology for natural applications," *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, pp. 173–196, April, 1998.
- [12] J. C. Russ, "Practical Stereology 2nd Edition, Plenum Press, New York, NY, 1999
- [13] N. Chawla, R.S. Sidhu and V.V. Ganesh, "Three-dimensional visualization and microstructure-based modeling of deformation in particle-reinforced composites," Elsevier, Arizona state university, Tempe, pp. 1541-1548, Abbrev. November, 2005.
- [14] Z. You , S. Adhikari and M. E. Kutay, "Dynamic modulus simulation of the asphalt concrete using the X-ray computed tomography images," *Materials and Structures*, Elsevier, pp. 617-628, July, 2008.
- [15] A. Bhasin, A. Izadi and S. Bedgaker, "Three dimensional distribution of the mastic in asphalt composites," *Construction and Building Materials*, Elsevier, May, 2011.
- [16] Q. Guo, Y. Bian, L. Li, Y. Jiao, J. Tao and C. Xiang, "Stereological estimation of aggregate gradation using digital image of asphalt mixture," *Construction and Building Materials*, Elsevier, China, pp. 458–466, July, 2015.
- [17] K. Seansomboon, "Analysis of Dimensional Properties of Asphalt Concrete Using Image Processing Technique," M.Eng. thesis, Civil Eng. Dept., Chulalongkorn Univ., Bangkok, Thailand, 2015.
- [18] H. M. Zelelew, A. T. Papagiannakis, and E. Masad "Application of digital image processing techniques for asphalt concrete mixture images," In *The 12th International Conference of International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics (IACMAG)*, pp. 119-24. , October, 2008.
- [19] M. D. Abràmoff, P. J. Magalhães and S. J. Ram "Image processing with ImageJ," *Biophotonics international*, pp. 36-42. ,2004.
- [20] S. Unsiwilai, "Influences of Crumb Rubber Size in Aggregate Blend on Deformation Resistance Properties of Hot Mix Asphalt," M.Eng. thesis, Civil Eng. Dept., Chulalongkorn Univ., Bangkok, Thailand, 2013.

ผลกระทบต่อการโก่งตัวและความเค้นในสะพานคานยื่นสมดุล เนื่องจากการปรับแผนงานก่อสร้าง

Effects on Deflection and Stress in Balanced Cantilever Bridge due to Modification of Construction Plan

สุทธิพงษ์ ชมพิกุล ชรรมนัญ สุสำเภา
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา วิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรังสิต

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ใช้โปรแกรม SAP2000 ทำการวิเคราะห์ตามขั้นตอนการก่อสร้างของสะพานคอนกรีตอัดแรงแบบคานยื่นสมดุลประเภทหล่อในที่ ตามแบบมาตรฐานของกรมทางหลวง กรณีที่มีช่วงหลักยาว 80 เมตร ซึ่งในการออกแบบได้ใช้มาตรฐาน ASSTHO LRFD 2012 โดยกำหนดระยะเวลาในการหล่อแต่ละชิ้นส่วน (T_s) เท่ากับ 7 วัน และกำหนดให้ใช้แบบหล่อที่เคลื่อนที่ได้ซึ่งมีน้ำหนัก (CE) 450 กิโลนิวตัน เปรียบเทียบกับกรณีที่มีการปรับแผนงานก่อสร้างเป็นใช้ค่า T_s เป็น 10, 13 หรือ 16 วัน หรือใช้ค่า CE เป็น 517.5, 585 หรือ 675 กิโลนิวตัน

จากการวิเคราะห์ทำให้ได้ค่าการโก่งตัวและความเค้นที่จุดต่างๆ และที่เวลาต่างๆ โดยได้นำค่าที่สำคัญคือ การโก่งตัวที่ต่างกันของปลายยื่นของคานทั้งสองข้างที่บริเวณกลางสะพานก่อนทำการเชื่อมต่อกัน (Δ') และค่าความเค้นที่บริเวณหัวเสาและที่กลางสะพานหลังทำการเชื่อมต่อกันแล้ว 10,000 วัน (σ) จากกรณีที่มีการก่อสร้างเป็นไปตามแผนงาน และมีการปรับแผนงาน มาเปรียบเทียบกันและแสดงในรูปของกราฟ โดยสรุปค่า Δ' มากที่สุดเป็น 40.5% เมื่อค่า T_s เท่ากับ 16 วัน และค่า CE เป็น 675 กิโลนิวตัน และค่า σ มากที่สุดเป็น 20.1% เมื่อค่า T_s เท่ากับ 16 วัน และค่า CE เป็น 675 กิโลนิวตัน

คำสำคัญ : สะพานคานยื่นสมดุล, การวิเคราะห์ตามขั้นตอนการก่อสร้าง, การปรับแผนงานก่อสร้าง

Abstract

In this research, SAP2000 program were employed to analyze a cast-in-situ pre-stressed concrete balanced cantilever bridge. Construction stages were taken into account. The bridge main span is 80 m and was designed according to AASHTO LRFD 2012 standard with 7 days/segment construction duration (T_s) using movable formworks with 450 kN weight each (CE). This was compared to cases where construction plan was adjusted, i.e., $T_s = 10, 13$, or 16 days and/or CE = 517.5, 585 or 675 kN.

From the analyses, deflections and stresses were obtained at various points and at various times. Important values are difference in deflections between cantilever ends of the beams at mid-span of the bridge before joining (Δ') and stresses in beams at pier segment and at mid-span at 10,000 days after joining (σ). The values in cases where construction was as planned and was adjusted were compared and shown in graphs. Δ' was maximal at 40.5% when T_s was 16 days and CE was 675 kN. σ was maximal at 20.1% when T_s was 16 days and CE was 675 kN.

Keywords : Balanced cantilever bridge, Analysis with construction stage, Modification of construction

1. บทนำ

การก่อสร้างสะพานข้ามลำน้ำ คลอง หรือแม่น้ำสายหลักที่มีความกว้างมาก โดยทั่วไปนิยมเลือกใช้วิธีการก่อสร้างแบบคานยื่นสมดุล (Balanced Cantilever Bridge)

พฤติกรรมของโครงสร้างสะพานแบบนี้ ขึ้นอยู่กับขั้นตอนการก่อสร้าง (Construction Stage) ในการออกแบบรายละเอียดจึงต้องกำหนดขั้นตอนการก่อสร้างแล้ววิเคราะห์โครงสร้างตามที่กำหนด เมื่อมาทำการก่อสร้างจริงอาจมีการปรับแผนงานก่อสร้าง แต่ผู้ทำการก่อสร้างมักจะไม่ทำการวิเคราะห์โครงสร้างตามขั้นตอนการก่อสร้างใหม่ เนื่องจากมีความยุ่งยาก ซับซ้อน และใช้เวลามาก ค่าการโก่งตัว (Deflection) และค่าความเค้น (Stress) ที่เกิดขึ้นในคานสะพานจึงแตกต่างจากที่เคยวิเคราะห์ไว้ และอาจทำให้เกิดความเสียหายแก่สะพานได้

Bishara and Papakonstantinou [1] ทำการวิเคราะห์โครงสร้าง 2 มิติ โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้นสำหรับการวิเคราะห์การหล่อที่เพิ่มขึ้นของคานคอนกรีตอัดแรงรูปกล่องที่มีความลึกแตกต่างกัน ต่อมา Chiu et. al. [2] เสนอวิธีการควบคุมการโก่งตัวของโครงสร้างคานสะพาน จำเป็นต้องทำการอัดแรงในช่วงระยะเวลาที่เหมาะสม

Mondorf et. al. [3] ทางเลือกในการก่อสร้างสะพานโดยใช้สะพานเครมเมอร์ (Kramer) และสะพาน โรเซครานส์ (Rosecrans) ซึ่งบริเวณที่ทำการก่อสร้างเต็มไปด้วยขยะอันตราย และแยกที่มีการจราจรวุ่นวาย รวมถึงมีปัญหาในการตอกเสาเข็ม ซึ่งได้สรุปว่าในการเลือกใช้วิธีการก่อสร้างสะพานคานยื่นสมดุลถือว่าเป็นวิธีที่เหมาะสมที่สุด ต่อมา Lglesias [4] ศึกษาพฤติกรรมในระยะยาวของสะพานโดยใช้ชิ้นส่วนสำเร็จรูป และได้นำเสนอกระบวนการในการวิเคราะห์ 3 วิธีคือ เพิ่มระยะเวลาที่แน่นอนในแต่ละขั้นตอน ใช้วิธีอย่างง่ายในการรวมผลกระทบช่วงเวลาของการคืบและการหดตัว และเปรียบเทียบทั้งสองวิธี

จะเห็นว่าวิธีการรวมถึงกระบวนการในการก่อสร้างสะพาน จะมีผลกระทบต่อพฤติกรรมของโครงสร้างสะพาน หากมีการปรับแผนการก่อสร้าง ดังนั้นจึงได้

ทำการศึกษาระดับของผลกระทบจากการปรับแผนงานก่อสร้าง

2. ขอบเขตการศึกษา

2.1 ศึกษาสะพานแบบคานยื่นสมดุลตามแบบมาตรฐานของกรมทางหลวง [5] ในกรณีที่มีสะพานที่มีช่วงหลัก (Main Span) จำนวน 1 ช่วงและมีความยาวช่วงหลัก 80 เมตร

2.2 วิเคราะห์ผลเมื่อการก่อสร้างเป็นไปตามแผนงานตามกำหนดดังนี้

- ระยะเวลาในการหล่อแต่ละชิ้นส่วน (T_s) เป็น 7 วัน
- ระยะเวลาในการย้ายชุดแบบหล่อที่เคลื่อนที่ได้ (T_M) เป็น 30 วัน

- น้ำหนักแบบหล่อที่เคลื่อนที่ได้ (CE) มีค่าเท่ากับ 450 kN

2.3 วิเคราะห์ผลเมื่อการก่อสร้างเบี่ยงเบนไปจากแผนงานกำหนดดังนี้

- T_s มีค่าเท่ากับ 10, 13 และ 16 วัน
- CE มีค่าเท่ากับ 1.15, 1.30 และ 1.50 เท่าของ 450 kN

2.4 ใช้ค่าความชื้นสัมพัทธ์ (Relative Humidity) โดยเฉลี่ยของประเทศไทย ซึ่งมีค่าเท่ากับ 75%

2.5 วิเคราะห์ผลของการโก่งตัว และค่าความเค้นที่เกิดขึ้นกับคานสะพาน

2.6 ใช้มาตรฐานการออกแบบสะพาน AASHTO LRFD ฉบับปี 2012 [6]

2.7 สะพานมี 3 ช่องการจราจร มีความกว้าง 14.5 เมตร

2.8 กำหนดให้มีชุดของ From Traveler ที่ใช้ในระหว่างการก่อสร้างมีจำนวน 2 ชุด

2.9 ใช้โปรแกรม SAP2000 ในการคำนวณและวิเคราะห์ผลในระหว่างการก่อสร้าง โดยโครงสร้างสะพานมีพฤติกรรมเป็นเชิงเส้น (Linear Analysis)

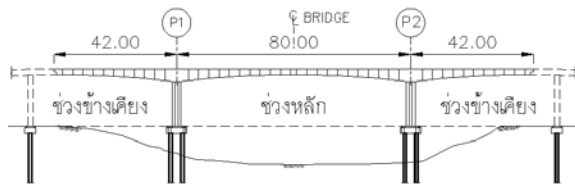
2.10 ไม่พิจารณาผลของแรงแผ่นดินไหว (Earthquake)

3. รายละเอียดการศึกษา

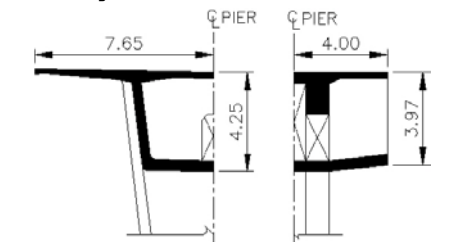
ประกอบด้วย 3 ส่วน คือ การพิจารณาลักษณะของสะพาน แรงที่กระทำต่อคานสะพานในระหว่างทำการก่อสร้าง (Construction Loads) และแผนงานการก่อสร้างคานสะพาน

3.1 ลักษณะของสะพาน

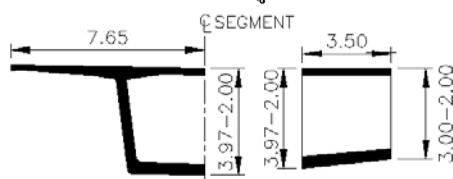
มีความยาวช่วงหลัก (Main Span) คือ 80 เมตร และช่วงข้างเคียง (Side Span) เป็น 42 เมตร ดังรูปที่ 1 และหน้าตัดของคานสะพานมีลักษณะ ดังรูปที่ 2 โดยการอัดแรงเป็นระบบอัดแรงภายใน (Internal Post-Tensioned) ดังรูปที่ 3



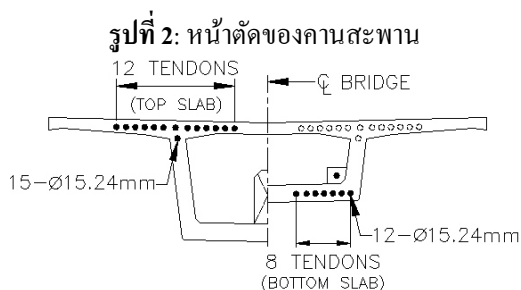
รูปที่ 1: ลักษณะของสะพาน



(ก): ชิ้นส่วนที่อยู่บนหัวเสา



(ข): ชิ้นส่วนอื่นๆ



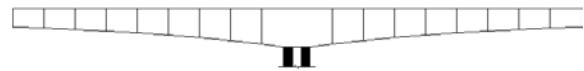
รูปที่ 3: ระบบลวดอัดแรงภายใน

โดยลวดอัดแรงด้านบนทำหน้าที่รับโมเมนต์ดัด ถูกดึงด้วยแรง 3900 kN/กลุ่มลวด และลวดอัดแรงด้านล่างทำหน้าที่รับโมเมนต์ดัด ถูกดึงด้วยแรง 3120 kN/กลุ่มลวด

สะพานใช้คอนกรีตที่มีกำลังรับแรงอัด (f_c') เท่ากับ 50 MPa และลวดอัดแรงเป็นลวดตีเกลียวอัดแรงชนิดคลายตัวต่ำ ชั้นคุณภาพ 1860

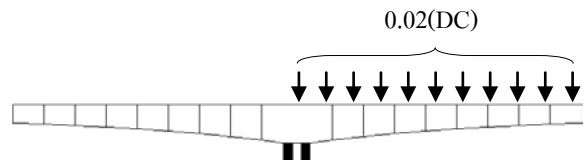
3.2 แรงที่กระทำต่อคานสะพานในระหว่างทำการก่อสร้าง

ก. น้ำหนักของโครงสร้างที่สร้างเสร็จแล้ว (DC) ใช้รองรับน้ำหนักส่วนที่กำลังก่อสร้าง ดังรูปที่ 4



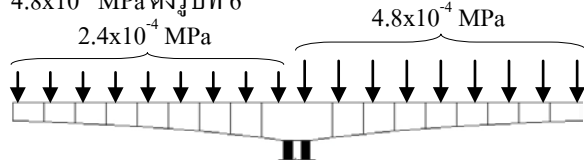
รูปที่ 4: น้ำหนักของโครงสร้างที่สร้างเสร็จแล้ว

ข. น้ำหนักบรรทุกคงที่ที่แตกต่างกัน (DIFF) คิดเป็นร้อยละ 2 ของน้ำหนักบรรทุกคงที่ ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5: น้ำหนักบรรทุกคงที่ที่แตกต่างกัน

ค. น้ำหนักบรรทุกจรจากการก่อสร้าง (CLL) เป็นน้ำหนักบรรทุกกระจายสม่ำเสมอมีค่าเท่ากับ 2.4×10^{-4} MPa หรือ 4.8×10^{-4} MPa ดังรูปที่ 6



รูปที่ 6: น้ำหนักบรรทุกจรกระจายสม่ำเสมอ

ง. น้ำหนักบรรทุกเนื่องจากเครื่องมือที่ใช้ก่อสร้าง (CE) มีค่าเท่ากับ 450 kN ดังรูปที่ 7



รูปที่ 7: น้ำหนักบรรทุกเนื่องจากเครื่องมือที่ใช้ก่อสร้าง

จ. แรงกระแทกเนื่องจากเครื่องมือที่ใช้ก่อสร้าง (IE) คิดเป็นร้อยละ 10 ของน้ำหนัก CE ดังรูปที่ 8



รูปที่ 8: แรงกระแทกเนื่องจากเครื่องมือที่ใช้ก่อสร้าง

ฉ. น้ำหนักบรรทุกตายตัวจากการหล่อคานไม่สมดุล (U) เนื่องมาจากการหล่อคานสะพานไม่เท่ากัน ดังรูปที่ 9



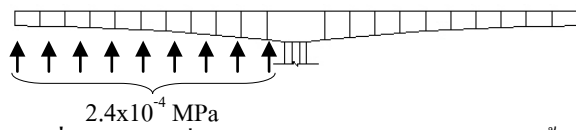
รูปที่ 9: น้ำหนักจากการหล่อคานสะพานไม่สมดุล

ช. แรงลมที่กระทำต่อเครื่องมือที่ใช้ก่อสร้าง (WE) มีค่าเท่ากับ 4.8×10^{-3} MPa ดังรูปที่ 10



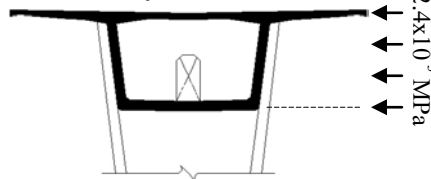
รูปที่ 10: แรงลมที่กระทำต่อเครื่องมือที่ใช้ก่อสร้าง

ข. แรงลมที่กระทำให้โครงสร้างคานสะพานยกขึ้น (WUP) มีค่าเท่ากับ 2.4×10^{-4} MPa ดังรูปที่ 11



รูปที่ 11: แรงลมที่กระทำให้โครงสร้างคานสะพานยกขึ้น

ณ. แรงลมที่กระทำต่อโครงสร้างคานสะพาน (WE) มีค่าเท่ากับ 2.4×10^{-3} MPa ดังรูปที่ 12



รูปที่ 12: แรงลมที่กระทำต่อโครงสร้างคานสะพาน

ญ. ผลกระทบอื่นๆ ดังนี้ ผลจากอุณหภูมิ (TU) การคืบ (CR) และการหดตัว (SH) ของคอนกรีต โดยพิจารณาตามมาตรฐานข้อกำหนด ASSTHO [6]

3.2.1 การรวมแรงเพื่อตรวจสอบโครงสร้าง

ผลรวมของแรงในสภาวะใช้งาน (Service, S) ดังนี้

$$S = 1.0(\text{DC}) + 1.0(\text{DIFF}) + 1.0(\text{CLL}) + 1.0(\text{CE}) + 1.0(\text{IE}) + 1.0(\text{CR}) + 1.0(\text{SH}) + 1.0(\text{TU}) \dots (1)$$

$$S = 1.0(\text{DC}) + 1.0(\text{U}) + 1.0(\text{CLL}) + 1.0(\text{CLL}) + 1.0(\text{IE}) + 1.0(\text{CR}) + 1.0(\text{SH}) + 1.0(\text{TU}) \dots (2)$$

$$S = 1.0(\text{DC}) + 1.0(\text{DIFF}) + 0.7(\text{WS}) + 0.7(\text{WUP}) + 1.0(\text{CR}) + 1.0(\text{SH}) + 1.0(\text{TU}) \dots (3)$$

$$S = 1.0(\text{DC}) + 1.0(\text{DIFF}) + 1.0(\text{CLL}) + 1.0(\text{CE}) + 1.0(\text{WUP}) + 0.7(\text{WS}) + 0.7(\text{WE}) + 1.0(\text{CR}) + 1.0(\text{SH}) + 1.0(\text{TU}) \dots (4)$$

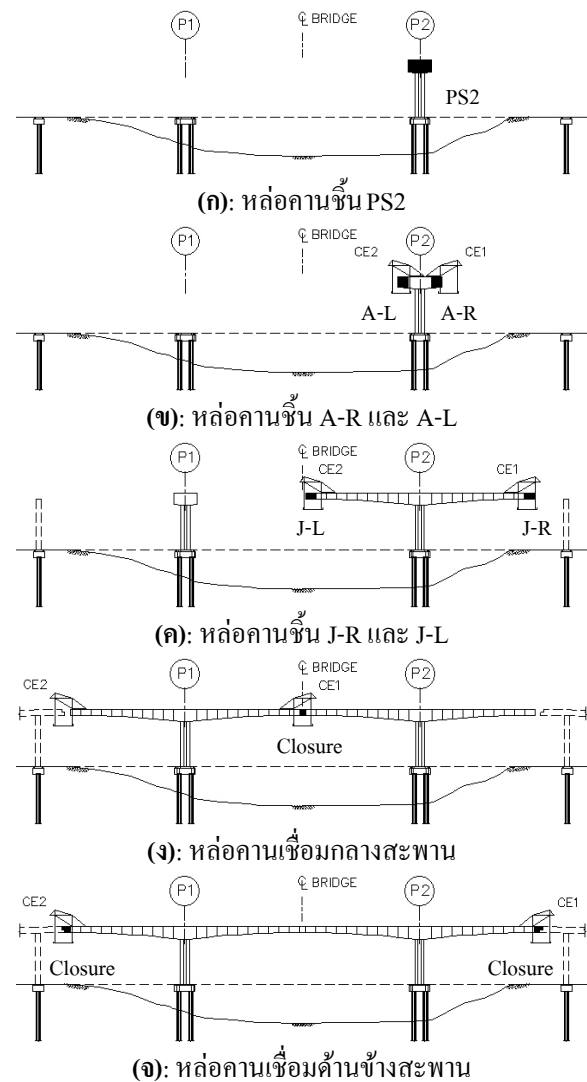
$$S = 1.0(\text{DC}) + 1.0(\text{U}) + 1.0(\text{CLL}) + 1.0(\text{CE}) + 1.0(\text{IE}) + 0.3(\text{WS}) + 0.3(\text{WE}) + 1.0(\text{CR}) + 1.0(\text{SH}) + 1.0(\text{TU}) \dots (5)$$

$$S = 1.0(\text{DC}) + 1.0(\text{CLL}) + 1.0(\text{CE}) + 1.0(\text{IE}) + 0.3(\text{WS}) + 0.3(\text{WE}) + 1.0(\text{CR}) + 0.3(\text{SH}) + 0.3(\text{TU}) \dots (6)$$

3.3 วิธีการก่อสร้างคานสะพาน

แยกการก่อสร้างคานสะพานออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ยื่นออกจากเสาด้านที่ 1 (P1) และส่วนที่ยื่นออกจากเสาด้าน

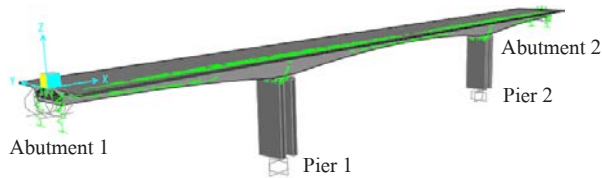
ที่ 2 (P2) พิจารณาขั้นตอนการก่อสร้างดังรูปที่ 13 โดยหล่อคานสะพานชั้นแรก (PS2) บนหัวเสา P2 ดังรูป (ก) ติดตั้งไม้แบบ CE1 หล่อคานสะพานด้านขวา (ชั้น A-R) เลื่อน CE1 ไปด้านขวา ติดตั้ง CE2 หล่อคานสะพานด้านซ้าย (ชั้น A-L) ทำการดึงลวดอัดแรงด้านบน ดังรูป (ข) เลื่อน CE1 และ CE2 แล้วหล่อคานสะพานทั้งสองด้านพร้อมกัน (ชั้น J-R และ J-L) ดึงลวดอัดแรงด้านบน ดังรูป (ค) จากนั้นเปลี่ยนการก่อสร้างไปที่เสาช่วง P1 โดยทำการก่อสร้างคานสะพานเหมือนกับเสาช่วง P2 จากนั้นทำการหล่อคานเชื่อมบริเวณกลางและด้านข้าง (Closure) ของสะพาน ดึงลวดอัดแรงด้านล่าง ดังรูป (ง) และรูป (จ) ตามลำดับ



รูปที่ 13: ขั้นตอนการก่อสร้างคานสะพาน

4. แบบจำลองโครงสร้างสะพาน

เนื่องจากจำนวนที่ทำการศึกษามีทั้งหมด 16 กรณี ดังตารางที่ 1 โดยใช้โปรแกรม SAP2000 เข้ามาช่วยในการวิเคราะห์และตรวจสอบโครงสร้างสะพาน ดังรูปที่ 14



รูปที่ 14: แบบจำลอง 3 มิติโดยโปรแกรม SAP2000

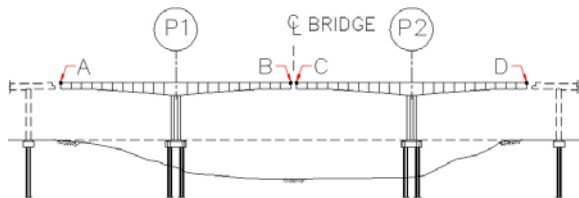
ตารางที่ 1 กรณีที่ทำการศึกษา

กรณี	ค่า CE (kN)	ค่า T _S (วัน)
ก) ตามแผนงาน	450.0	7
ข) มีการปรับ แผนงาน	450.0	10, 13, 16
	517.5	7, 10, 13, 16
	585.0	7, 10, 13, 16
	675.0	7, 10, 13, 16

5. ผลการศึกษา

5.1 ค่าการโก่งตัว

พิจารณาบริเวณปลายของคานสะพานก่อนจะทำการหล่อเชื่อมสะพานเข้าด้วยกัน (ยื่นยาวที่สุด) แบ่งการตรวจสอบเป็น 4 จุด คือ ที่จุด A, B, C และ D ดังรูปที่ 15



รูปที่ 15: จุดที่พิจารณาการโก่งตัว

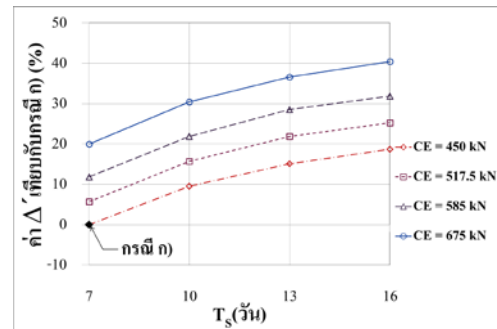
จากการวิเคราะห์ในกรณี ก) สามารถสรุปค่าการโก่งตัวที่เกิดขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่าการโก่งตัวในกรณี ก) มีหน่วยเป็นเมตร (m)

ที่จุด A	ที่จุด B	ที่จุด C	ที่จุด D
-0.047	-0.050	-0.071	-0.007

เนื่องจากการโก่งตัวที่จุด B และจุด C มีผลกระทบต่อ การหล่อเชื่อมคานสะพานช่วง P1 เข้ากับ P2 ดังนั้นจึงทำ การพิจารณาค่าการโก่งตัวที่ต่างกันของสองจุด (Δ') พบว่าค่า Δ' มีค่าเท่ากับ 0.021 เมตร

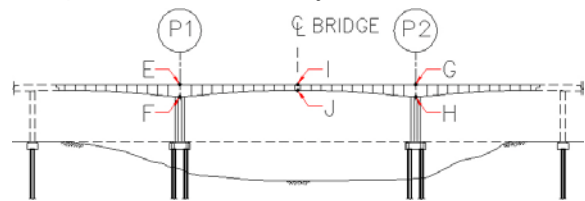
ได้เปรียบเทียบกับค่า Δ' ของกรณี ข) เทียบกับค่าในกรณี ก) เป็น % และแสดงเป็นกราฟในรูปที่ 16 ซึ่งเห็นได้ว่าเมื่อ ค่า CE หรือ T_S เพิ่มขึ้นค่า Δ' จะเพิ่มขึ้น โดยคลาดเคลื่อน ไปจากที่เคยวิเคราะห์ไว้ถึง 40.5% ในกรณีที่ CE = 675 kN และ T_S = 16 วัน



รูปที่ 16: เปรียบเทียบค่า Δ' เมื่อมีการปรับแผนงาน

5.2 ค่าความเค้น

ได้พิจารณาค่าความเค้น (σ) หลังเชื่อมคานสะพานเข้าด้วยกันแล้ว 10000 วัน ซึ่งมีผลของการคืบและหดตัวของ คอนกรีต รวมไปถึงการสูญเสียแรงดึงของลวดอัดแรง โดย พิจารณาที่ผิวบนและล่างของชิ้นส่วนคาน บริเวณหัวเสา P1, P2 และกลางสะพาน แบ่งการตรวจสอบออกเป็น 6 จุด คือที่จุด E, F, G, H, I และ J ดังรูปที่ 17



รูปที่ 17: จุดที่พิจารณาค่า σ

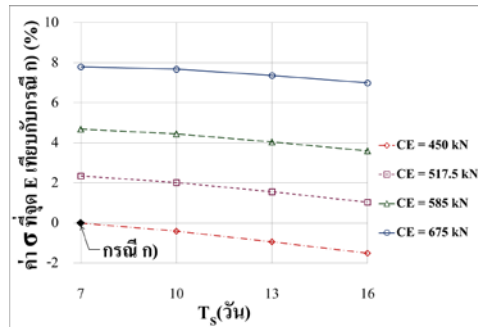
ผลจากการวิเคราะห์ในกรณี ก) สามารถสรุปค่า σ ดังแสดงในตารางที่ 3 โดยที่ค่า σ มีค่าเป็นบวก (+) จะเป็น หน่วยแรงดึง และมีค่าเป็นลบ (-) จะเป็นหน่วยแรงอัด

ตารางที่ 3 ค่า σ ในกรณี ก) หลังเชื่อมต่อแล้ว 10000 วัน มี หน่วยเป็นเมกะปาสกาล (MPa)

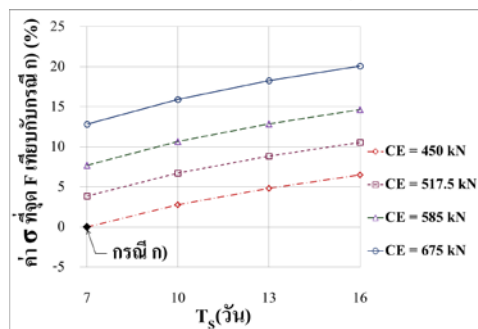
ที่จุด E	ที่จุด F	ที่จุด G	ที่จุด H	ที่จุด I	ที่จุด J
7.72	-28.67	7.83	-28.97	-11.48	6.48

ได้เปรียบเทียบกับค่า σ ของกรณี ข) เทียบกับค่าในกรณี ก) เป็น % และแสดงเป็นกราฟในรูปที่ 17 ซึ่งค่า σ ที่จุด E กับ G และ F กับ H มีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นจึงเลือก แสดงผล 4 จุดคือที่จุด E, F, I และ J

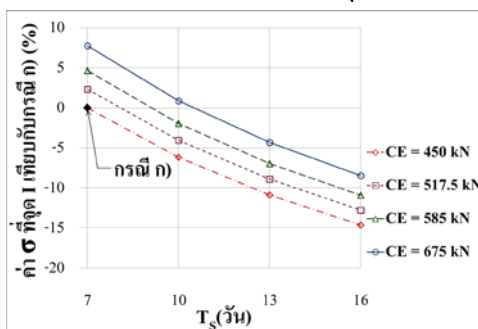
เมื่อค่า CE เพิ่มขึ้น ค่า σ จะเพิ่มขึ้นในทุกกรณี แต่เมื่อค่า T_s เพิ่มขึ้น ค่า σ ที่จุด E, I และ J จะลดลง แต่ค่า σ ที่จุด F จะเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาความคลาดเคลื่อนไปจากที่เคววิเคราะห์ไว้จะเห็นว่าค่ามากที่สุดเป็น 20.1% โดยเป็นค่า σ ที่จุด F ในกรณีที่ CE = 675 kN และ $T_s = 16$ วัน



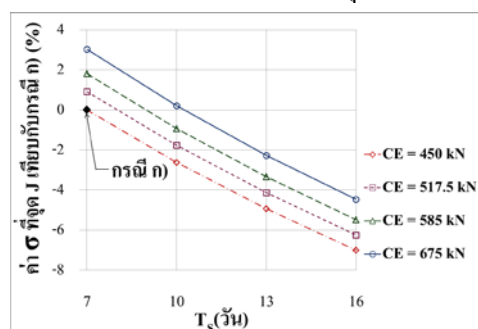
(ก): เปรียบเทียบค่า σ ที่จุด E



(ข): เปรียบเทียบค่า σ ที่จุด F



(ค): เปรียบเทียบค่า σ ที่จุด I



(ง): เปรียบเทียบค่า σ ที่จุด J

รูปที่ 17: เปรียบเทียบค่า σ ที่เกิดขึ้นหลังเชื่อมคานสะพานแล้ว 10000 วัน เมื่อมีการปรับแผนงาน

6. สรุปผลการศึกษา

การปรับแผนงานก่อสร้างทำให้พฤติกรรมของสะพานคานยื่นสมดุลเปลี่ยนแปลงไปจากค่าที่เคววิเคราะห์ไว้เมื่อออกแบบสะพาน เนื่องจากความเค้น และผลจากการคืบการหดตัว และการคลายตัวของลวดอัดแรงเปลี่ยนไป

ได้ศึกษาผลกระทบเมื่อต้องใช้เวลาในการหล่อแต่ละชิ้นส่วน (T_s) มากขึ้น หรือต้องใช้แบบหล่อที่เคลื่อนที่ได้ ซึ่งมีน้ำหนัก (CE) มากกว่าที่กำหนดไว้ โดยการโก่งตัวที่ต่างกันของปลายยื่นของคานทั้งสองข้างที่บริเวณกลางสะพานก่อนทำการเชื่อมต่อกันมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อ T_s หรือ CE เพิ่มขึ้น โดยคลาดเคลื่อนไปได้มากที่สุด 40.5% และค่าความเค้นหลังจากเชื่อมคานสะพานแล้ว 10000 วัน โดยทั่วไปมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อค่า CE เพิ่มขึ้น หรือ T_s ลดลง โดยคลาดเคลื่อนไปได้มากที่สุด 20.1%

หากต้องการจำกัดความคลาดเคลื่อนไม่ให้เกิน 10% จะต้องไม่ให้ค่า CE เกินกว่า 15% ของค่าที่ใช้ออกแบบ และไม่ให้ค่า T_s คลาดเคลื่อนเกิน 3 วัน หากเกินกว่าค่าดังกล่าวควรมีการวิเคราะห์โครงสร้างอีกครั้งหนึ่งโดยใช้ข้อมูลตามแผนงานที่ปรับเปลี่ยนไป

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] A. Bishara and N. Papakonstantinou, "Analysis of Cast-In-Place Concrete Segmental Cantilever Bridges," American Society of Civil Engineers, vol. 11, pp. 1247–1268, 1990.
- [2] H. Chiu, J. Chern and K. Chang, "Long-Term Deflection Control in Cantilever Prestressed Concrete Bridges," American Society of Civil Engineers, vol. 122, pp. 489–494, 1996.
- [3] P. Mondorf, J. Kuprenas and E. Kordahi, "Segmental Cantilever Bridge Construction Case Study," American Society of Civil Engineers, vol. 123, pp. 78–84, 1997.
- [4] C. Lglesias, "Long-Term Behavior of Precast Segment Cantilever Bridges," American Society of Civil Engineers, vol. 3, pp. 340–349, 2006.

- [5] Department of Highways, Kingdom of Thailand,
“Standard Drawings for Long Span Bridge,” June,
2006.
- [6] AASTHO, LRFD Bridge Design Specifications, 6th
ed., American Association of State Highway and
Transportation Officials, Washington, DC, 2012.

รายนามผู้ทรงคุณวุฒิผู้พิจารณาบทความฉบับนี้

ทางกองบรรณาธิการวิศวกรรมลาดกระบัง ขอขอบพระคุณท่านผู้ทรงคุณวุฒิทุกท่านที่ให้ความอนุเคราะห์ในการพิจารณาบทความด้วยความขอบคุณยิ่ง และหวังว่าคงได้รับความอนุเคราะห์จากท่านด้วยดีในโอกาสต่อไป

ศ.ดร.อิสระชัย งามหรุ	ผศ.ดร.ต้นคิด จันทรัมย์
ดร.ธีระภัทร จริยะนวิชัย	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและ
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า	การบินอวกาศ
คณะวิศวกรรมศาสตร์	คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า
รศ.วรฐ คุหิรัญ	พระนครเหนือ
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า	ดร.ณัฐวุฒิ ธนศรีสถิต
คณะวิศวกรรมศาสตร์	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์	คณะวิศวกรรมศาสตร์
ดร.สุสิทธิ์ ฉายประกายแก้ว	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอม
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา	เกล้าพระนครเหนือ
คณะวิศวกรรมศาสตร์	ดร.นที ทองอุ่น
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องมือวัด
ดร.ภาณุวัฒน์ จันทรัมย์	อิเล็กทรอนิกส์
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า	คณะวิศวกรรมศาสตร์
คณะวิศวกรรมศาสตร์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	พระนครเหนือ

ดร.วิบูลย์ ตั้งวัชรธรรมานุกุล

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

และระบบการผลิต

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า

ธนบุรี

รศ.ดร.ปกรณ์ แก้วตระกูลพงษ์

ภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุม

และเครื่องมือวัด

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า

ธนบุรี

ผศ.ดร.วิศนุรักษ์ เวชสถล

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า

ธนบุรี

ผศ.ดร.ชวิน จันทเสนาวงศ์

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า

ธนบุรี

รศ.ดร.อำพล การุณสุนทวงษ์

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า

ธนบุรี

รศ.ดร.กิตติชัย ชนทรัพย์สิน

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า

พระนครเหนือ

คำแนะนำในการเตรียมต้นฉบับบทความ

“บทความทางวิชาการ” หมายความว่า บทความที่เขียนขึ้นในลักษณะวิเคราะห์ วิจัย หรือเสนอแนวความคิดใหม่ ๆ จากพื้นฐานทางวิชาการที่ได้เรียบเรียงจากผลงานทางวิชาการของตนเอง หรือของผู้อื่น หรือเป็นบทความทางวิชาการที่เขียนขึ้นเพื่อเป็นความรู้ทั่วไป สำหรับประชาชน

“บทความวิจัย” หมายความว่า บทความที่มีลักษณะเป็นเอกสารที่มีรูปแบบของการวิจัยตามหลักวิชาการ เช่น มีการตั้งสมมติฐาน หรือมีการกำหนดปัญหาที่ชัดเจนสมเหตุสมผล โดยจะต้องระบุถึงวัตถุประสงค์ที่ชัดเจนแน่นอน มีการค้นคว้าอย่างมีระบบ มีการรวบรวมข้อมูลพิจารณาวิเคราะห์ ตีความ และสรุปผลการวิจัยที่สามารถให้คำตอบบรรลุวัตถุประสงค์ หรือหลักการบางอย่างที่จะนำไปสู่ความก้าวหน้าทางวิชาการ หรือการนำวิชาการนั้นมาประยุกต์ใช้

รูปแบบในการพิมพ์บทความ

บทความที่เสนอควรจัดพิมพ์ด้วย Microsoft Word (หรือซอฟต์แวร์อื่น ที่ขนาดตัวอักษรกำหนดได้ใกล้เคียงกัน) ขนาดกระดาษที่จัดพิมพ์จะเป็นขนาด A4 โดยกำหนดขอบ (Margins) ในการตั้งหน้ากระดาษ (Page Setup) ดังนี้

- ระยะบน (Top Margin) 1” หรือ 2.54 ซม.
- ระยะล่าง (Bottom Margin) 1” หรือ 2.54 ซม.
- กั้นซ้าย (Left Margin) 1” หรือ 2.54 ซม.
- กั้นขวา (Right Margin) 1” หรือ 2.54 ซม.

การแบ่งส่วน (Section) ควรแบ่งเป็นสองส่วน ส่วนแรก กำหนด (format) เป็นคอลัมน์เดียว ส่วนที่สองกำหนดเป็น 2 คอลัมน์ โดยระยะห่างระหว่างคอลัมน์เป็น 0.26” หรือ 0.7 ซม. เนื้อเรื่อง ผู้เขียนและผู้ร่วมงาน สถานที่ทำงาน และบทคัดย่อจะอยู่ในส่วนแรก ส่วนอื่น ๆ ที่เหลือของบทความจะอยู่ในส่วนที่สอง

ขนาดตัวอักษร

รูปแบบของตัวอักษรให้ใช้ Angsana UPC สำหรับบทความที่มีภาษาไทยปนกับภาษาอังกฤษ และให้ใช้รูปแบบตัวอักษร Times New Roman สำหรับบทความซึ่งเป็นภาษาอังกฤษล้วน ขนาด (Pica Size) ของแบบตัวอักษรแบบ Angsana UPC กำหนดดังนี้ (หากเป็นรูปแบบ Times New Roman ให้ใช้ขนาดของตัวอักษรที่มีความสูงเท่ากัน)

- ชื่อเรื่องทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ
ขนาด 26 ตัวหนา
- ชื่อผู้เขียนและผู้ร่วมงาน
ขนาด 14 ตัวปกติ
- สถานที่ทำงาน
ขนาด 12 ตัวปกติ
- คำว่า “บทคัดย่อ”
ขนาด 16 ตัวหนา
- ส่วนของเนื้อความในบทคัดย่อ
และส่วนของเนื้อความทั้งหมด
ขนาด 14 ตัวปกติ
- คำว่า “Abstract”
ขนาด 16 ตัวหนา
- ส่วนของเนื้อความใน Abstract
ให้ใช้ Angsana UPC ขนาด 16 ตัวปกติ

- หัวข้อและหมายเลขประจำหัวข้อ
ขนาด 16 ตัวหนา
- หัวข้อย่อยและหมายเลขประจำหัวข้อย่อย
ขนาด 14 ตัวหนา
- คำว่า “กิตติกรรมประกาศ” หรือ “Acknowledgement”
ขนาด 16 ตัวหนา
- คำว่า “เอกสารอ้างอิง” หรือ “Reference”
ขนาด 16 ตัวหนา

การพิมพ์บทความ

ให้ใช้ระยะห่างบรรทัดปกติ (Single space) เมื่อขึ้นหัวข้อใหม่ให้เว้น 1 บรรทัด ในกรณีเมื่อเอกสารจัดพิมพ์ด้วย Times New Roman ทั้งหมด ให้ใช้ระยะห่างบรรทัด เป็นหนึ่งบรรทัด (Single space) หรือ หนึ่งบรรทัดครึ่ง

ชื่อบทความ ชื่อผู้เขียน และสถานที่ทำงาน
ให้จัดพิมพ์ในตำแหน่งกลางหน้ากระดาษ

หัวข้อและหมายเลขหัวข้อ
ให้จัดพิมพ์แบบชิดซ้าย (Right Justified)

บทคัดย่อและเนื้อเรื่อง
ให้จัดพิมพ์แบบเต็มขอบ
(Left & Right Justified)

สมการ หรือ พจน์ทางคณิตศาสตร์ที่ซับซ้อน
ควรเขียนโดยใช้ Equation Editor
(รวมอยู่ใน Microsoft Word แล้ว)
โดยจัดแยกบรรทัด และมีเลขกำกับสมการ
ซึ่งอยู่ในวงเล็บเล็ก

คำสำคัญ (Keywords)
ให้ใส่คำสำคัญ 3 – 5 คำ ซึ่งเกี่ยวข้อง
กับบทความที่นำเสนอโดยให้จัดพิมพ์
ใต้บทคัดย่อภาษาอังกฤษ

การส่งบทความ

บทความที่จะส่งเปิดรับทั้งจากบุคคลภายในและภายนอกสถาบันฯ โดยเนื้อหาของบทความมีความยาวไม่เกิน 8 หน้า 2 คอลัมน์

ติดต่อขอส่งได้ที่ ส่วนวิศวกรรมลาดกระบัง คณะวิศวกรรมศาสตร์

E-mail : kmitl.eng.jnl@gmail.com

บทความจะได้รับการกลั่นกรองโดยผู้อ่านที่ทรงคุณวุฒิในสาขานั้น ๆ และเมื่อบทความได้รับการแก้ไข (หากมี) อย่างเหมาะสม ผู้เขียนต้องส่งต้นฉบับ 1 ชุด และซีดีข้อมูลบทความอีก 1 ชุด

ติดต่อสอบถามข้อมูลได้ที่

งานบริหารการวิจัย (วิศวกรรมลาดกระบัง)
ชั้น 2 อาคาร 6 ชั้น คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
โทรศัพท์ / โทรสาร 02-329-8317

แบบฟอร์มการส่งบทความ

เลขที่อ้างอิง.....

วันที่ส่ง.....

ชื่อบทความ (ภาษาไทย).....

.....

ชื่อบทความ(ภาษาอังกฤษ).....

.....

ประเภทบทความ



บทความวิชาการ



บทความวิจัย

Keywords (คำสำคัญ).....

.....

ชื่อ - นามสกุล ผู้เขียน (ภาษาไทย)

และ

(ภาษาอังกฤษ)

1..... 1.....

2..... 2.....

3..... 3.....

4..... 4.....

5..... 5.....

6..... 6.....

จำนวนหน้า.....หน้า

ชื่อและที่อยู่ผู้เขียนที่สามารถติดต่อได้

ชื่อ - นามสกุล.....

ที่อยู่.....

.....

เบอร์โทรศัพท์.....

E-mail.....

เอกสารประกอบการส่งบทความ

บทความต้นฉบับ 1 ชุด และ

สำเนา 3 ชุด (พร้อมลบชื่อผู้แต่งและที่อยู่)

แบบฟอร์มสั่งซื้อวัสดุสารลาดกระบัง และ สมัครสมาชิก

ชื่อ.....นามสกุล.....

สถานที่จัดส่งหนังสือ.....

จังหวัด.....รหัสไปรษณีย์.....โทรศัพท์.....

สมัครสมาชิกวัสดุสารลาดกระบัง

- | | |
|--|--|
| ☐ ปี 2555 ค่าสมัคร 200 บาท | ☐ ปี 2558 ค่าสมัคร 200 บาท |
| ☐ ปี 2556 ค่าสมัคร 200 บาท | ☐ ปี 2559 ค่าสมัคร 200 บาท |
| ☐ ปี 2557 ค่าสมัคร 200 บาท | ☐ ปี 2560 ค่าสมัคร 200 บาท |

หมายเหตุ ปีละ 4 ฉบับ (รวมค่าจัดส่ง)

ต้องการซื้อวัสดุสารลาดกระบัง

- | | |
|---|--|
| ☐ เล่มที่ 1 / 2558 ราคา 100 บาท | ☐ เล่มที่ 1 / 2559 ราคา 100 บาท |
| ☐ เล่มที่ 2 / 2558 ราคา 100 บาท | ☐ เล่มที่ 2 / 2559 ราคา 100 บาท |
| ☐ เล่มที่ 3 / 2558 ราคา 100 บาท | ☐ เล่มที่ 3 / 2559 ราคา 100 บาท |
| ☐ เล่มที่ 4 / 2558 ราคา 100 บาท | ☐ เล่มที่ 4 / 2559 ราคา 100 บาท |
| ☐ อื่น ๆ ปีที่.....ฉบับที่.....ประจำเดือน.....พ.ศ..... | |

รวมรายการทั้งหมด.....รายการ เป็นเงิน.....บาท

ชำระค่าสั่งซื้อโดย

- ☐ เงินสด แผนกตำรา วันที่.....เดือน.....พ.ศ.....
- ☐ ธนาณัติสั่งจ่ายในนาม แผนกตำรา
เลขที่ 1 ซอยฉลองกรุง 1 แขวงลาดกระบัง เขตลาดกระบัง
กรุงเทพมหานคร 10520 ที่ทำการเคาน์เตอร์บริการเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 00016
- ☐ ผ่านบัญชีออมทรัพย์ธนาคารไทยพาณิชย์ สาขาซอยเทคโนโลยีฯ เจ้าคุณทหาร
เลขที่ 1 ซอยฉลองกรุง 1 แขวงลาดกระบัง เขตลาดกระบัง
กรุงเทพมหานคร 10520
ชื่อบัญชี “แผนกตำราและประชาสัมพันธ์” เลขที่ 088 - 2 15272 - 2

ถ่ายสำเนาใบสั่งซื้อ และส่งเอกสารการชำระค่าสั่งซื้อมาที่ :

งานบริหารการวิจัย (วัสดุสารลาดกระบัง) ส่วนสนับสนุนวิชาการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เลขที่ 1 ซอยฉลองกรุง 1 แขวงลาดกระบัง เขตลาดกระบังกรุงเทพมหานคร 10520

โทร. 0-2329-8000 ต่อ 3464, 3465

(ท่านสามารถแฟกซ์ใบสั่งซื้อ และเอกสารการชำระค่าสั่งซื้อมาที่เบอร์แฟกซ์ : 0-2329-8317

การจัดส่งหนังสือจะรวดเร็วขึ้น)

Ladkrabang Engineering Journal

The Ladkrabang Engineering Journal is a technical journal belonging to the Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, (KMITL).

Contents:

The journal contains research reports, articles concerning development work and research activities carried out by the faculty staff. The objectives are to publicize and promote the research contributions and innovative works in the field of engineering.

Frequency:

The journal is published quarterly.

Policy:

Articles and reports should have engineering research values whether containing substantial supported theories, innovative works, substantial experiment results and/or fulfilled with useful and constructive discussions or reviews standardized to regional or international acceptance.

Manuscripts:

Four copies which are not exceed 8 pages with two-columns (one copy with author names, three copies without author names) of either Thai or English are to be submitted in camera ready form. The page charge from the 9th page is 500 Baht per page. To ensure that all papers are at the same standard, authors are asked to prepare their manuscripts in computerized format. Microsoft Word for windows[®] is recommended as a text processor. Others associated components such as graphs or figures should be prepared using windows-based packages.

Manuscripts are to be reviewed by at least 3 referees who are specialists in that fields. Comments and suggestions (if any) are summarized before they are passed to authors. Revised form of the manuscripts have to be resubmitted with a copy of the manuscript in a disk file.

For convenience in printing and to common standard in publication, submitted manuscripts should conform to the following orders.

Titles: Should be given in both Thai and English.

Author and co-authors: Are given without any title.

Correspondent address: Specify short address of authors. If authors are students, institution address (department, faculty and institution) is required.

Abstract: Should be given in both Thai and English.

Main theme: Should contain the following sections.

- 1.Introduction
- 2.Theory
- 3.Construction and experimental procedures
- 4.Experimental results and discussions
- 5.Conclusion or Summary

Acknowledgement: (if required)

References: Should follow the pattern given below.

- [1] P. Choeksuwan and S. Choomchuay, "The Economics Analysis of RFID Implementation in Logistic," Ladkrabang Engineering Journal, Vol.30, No.1, pp.7-12, March, 2556.
- [2] I. M. Filanovsky and H.P. Baltas, "Simple CMOS Analog Square-Rooting and Squaring Circuits," IEEE Trans. Circuits and Systems, Vol.39, No.4, pp.312-315, Sept., 1992.
- [3] R. E. Blahut, Theory and Practice of Error Control Codes, Addison-Wesley, Reading, MA, 1983.

Submission:

1. Submit two pdf files Manuscript with and without authors / affiliation at the first page.
 2. Submit the pdf file of the paper submission form.
- At E-mail : kmitl.eng.jnl@gmail.com

Published by

Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand.

Tel : (662) 329-8000 Ext 3464,3465

Fax : (662) 329-8317

Advisors

Dean of Engineering

Assoc.Prof. Dr.Komsan Maleesee

Editor-in-chief

Prof. Dr. Issarachai Ngamroo

Editorial Staff

Mr.Komol Wadkhean

Cover Design and Photo Books

Mrs.Atisuda Chanvikorn

Liaise & Member Relationships

Create Original Artwork & Proofreading

Distributed by

Faculty of Engineering,

Mrs.Atisuda Chanvikorn

Tel : (662) 329-8317