



KASETSART ENGINEERING JOURNAL

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

50 ถนนงามวงศ์วาน เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900

โทรศัพท์ : 0 2797 0905

โทรสาร : 0 2579 2775

E-mail : journal.eng@ku.th

www.tci-thaijo.org/index.php/kuengj/index

01 กลุ่มปัจจัยสำหรับการประเมินการพัฒนา โครงการก่อสร้างซึ่งสอดคล้องตามหลักของปรัชญาเศรษฐกิจพอเพียง
Group of factors for assessing the development of construction projects in line with the principles of the Sufficiency Economy Philosophy

13 ความสัมพันธ์ของกลุ่มปัจจัยสำหรับการประเมินการพัฒนาโครงการก่อสร้างซึ่งสอดคล้องตามหลักของปรัชญาเศรษฐกิจพอเพียงที่มีอิทธิพลต่อการสร้างเสริมคุณภาพชีวิตของประชาชน
The relationship between groups of factors for assessing the development of construction projects in accordance with the Sufficiency Economy Philosophy influencing people's quality of life enhancement

25 ผลกระทบจากอาคารกีดขวางด้านหน้าต่อแรงดันลมที่กระทำต่ออาคารสูง โดยใช้โปรแกรมทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ
Interference Effects by the in front obstructing building on Wind Pressure Acting on a Tall Building Using CFD Software

47 ผลกระทบจากการบดบังของอาคารคู่ต่อแรงดันลมที่กระทำต่ออาคารสูง โดยใช้โปรแกรมทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ
Interference Effects of Double buildings on Wind Pressure Acting on a Tall Building Using CFD Software

70 สาเหตุความล่าช้าของงานก่อสร้างในทัศนะของวิศวกรโยธา
The Causes of Construction Delays in Perspective of Civil Engineers

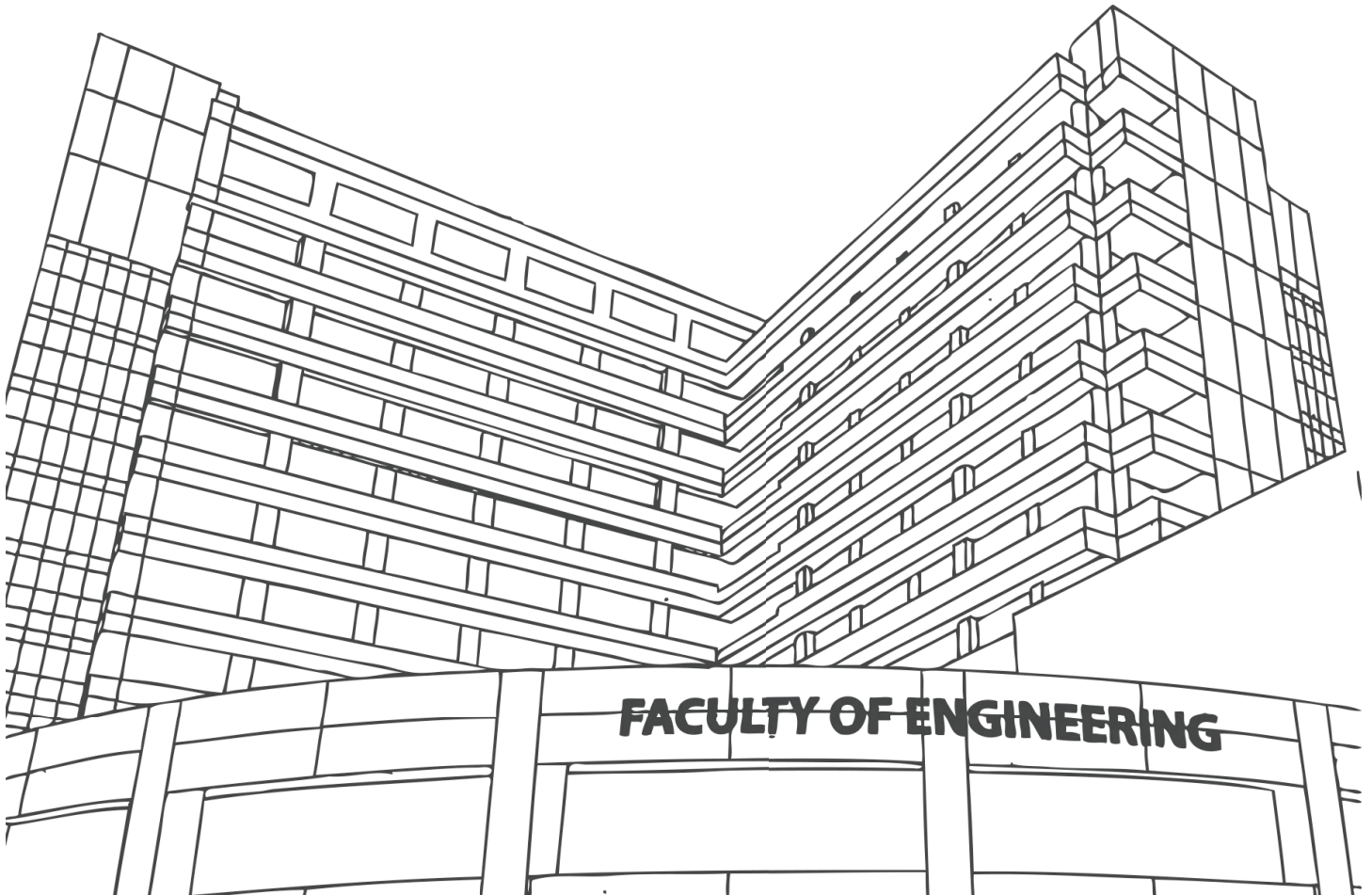
85 ผลของรูปแบบและขนาดรูเจาะที่มีต่อการชะลอรอยร้าวความล้าในเหล็กแผ่นภายใต้แรงดัด
Effect of Stop-hole Arrangement and Diameter on Crack Growth Retardation of Steel Plate under Flexural Loading

103 การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดในการจัดหาและการจัดการสินค้าคงคลังของผู้ผลิตทุเรียนแช่เยือกแข็ง
Procurement and Inventory Optimization of a Frozen Durian Manufacturer

116 การออกแบบวงจรวัดสัญญาณส่วนหน้าอัตราากินพลังงานต่ำและสัญญาณรบกวนต่ำที่มีความสามารถในการต้าน การเคลือบแผงแบบปรับได้ทางอิเล็กทรอนิกส์ สำหรับการวัดสัญญาณคลื่นไฟฟ้าหัวใจ
Design of A Low-Power Low-Noise Analog Frontend with Electronically Tunable Anti-Aliasing Capability for Electrocardiogram Recording

130 การประเมินเศรษฐศาสตร์ของการผลิตน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพเชิงพาณิชย์จาก น้ำมันพืช
Economic assessment of commercial bio-lubricant production from vegetable oils

KASETSART ENGINEERING JOURNAL



คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ที่ปรึกษา

ศาสตราจารย์เกียรติคุณ ดร.ทวี ดันมศิริ
 ศาสตราจารย์ ดร.ปารเมศ ชูติมา
 ศาสตราจารย์ ดร.ปราโมช รังสรรค์วิจิตร
 ศาสตราจารย์ ดร.ประสิทธิ์ ประพัฒน์มงคล
 ศาสตราจารย์ ดร.สุภา ทารหนองบัว
 ศาสตราจารย์ ดร.ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์
 ศาสตราจารย์ ดร.พงศ์ชนัน เหลืองโพบูลย์

คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
 คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
 วิทยาลัยปิโตรเลียมและปิโตรเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
 สำนักงานกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ
 คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
 คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
 คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

บรรณาธิการ

รองคณบดีฝ่ายวิจัยและนวัตกรรม

คณะกรรมการที่ปรึกษาบรรณาธิการ

คณะกรรมการฝ่ายวิจัย

กองบรรณาธิการ

- | | |
|--|---|
| 1. ศาสตราจารย์ ดร.สุเชษฐ์ ลิขิตเลอสรวง | คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย |
| 2. รองศาสตราจารย์ ดร.จิรยุทธ ไชยจารุณิช | คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ |
| 3. รองศาสตราจารย์ ดร.ชาคริต สุวรรณจำรัส | คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล |
| 4. รองศาสตราจารย์ ดร.ฉวีวรรณ เพ็ชรศิริ | วิทยาลัยนวัตกรรมด้านเทคโนโลยีและวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์ |
| 5. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สรวิชัย เยาวสุวรรณไชย | บัณฑิตวิทยาลัยการจัดการและนวัตกรรม
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี |

ผู้ประสานงาน

1. ผู้ปฏิบัติภารกิจหัวหน้างานบริการวิชาการและวิจัย
2. นางสาวสุทัตตา พาหุมนโต

วัตถุประสงค์

1. เพื่อเผยแพร่ความรู้พื้นฐานและการประยุกต์ในทางวิศวกรรมสาขาต่างๆ
2. เพื่อส่งเสริมให้นักวิชาการและนักวิจัยได้เสนอผลงานทางวิชาการและสิ่งประดิษฐ์
3. เพื่อเผยแพร่ข่าวสารทางวิชาการของคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เจ้าของ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (วิทยาเขตบางเขน)

50 ถนนงามวงศ์วาน แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900

โทรศัพท์ 0 2797 0905 โทรสาร 0 2579 2775

Email: journal.eng@ku.th

ออกแบบและจัดพิมพ์โดย

หจก. สำนักพิมพ์ฟิลิกส์เซ็นเตอร์

52 หมู่ 4 ถนนศาลายา-บางภาษี ตำบลคลองโยง

อำเภอพุทธมณฑล จังหวัดนครปฐม 73170

โทรศัพท์ : 0 2024 9156-57 โทรสาร 0 2024 9158

กรรมสิทธิ์ของบทความที่ได้รับการตีพิมพ์ ถือเป็นของคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผู้สนใจสามารถเข้าดูและดาวน์โหลดบทความได้ที่ www.tci-thaijo.org/index.php/kuengj/index
กรรมสิทธิ์ของบทความที่ได้รับการตีพิมพ์ ถือเป็นของคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผู้สนใจสามารถเข้าดูและดาวน์โหลดบทความได้ที่ www.tci-thaijo.org/index.php/kuengj/index

สารบัญ Contents

วิศวกรรมสาร **นท.**

ฉบับที่ 113 ปีที่ 35 มกราคม-มิถุนายน 2565

กลุ่มปัจจัยสำหรับประเมินการพัฒนา
โครงการก่อสร้างซึ่งสอดคล้องตามหลัก
ของปรัชญาเศรษฐกิจพอเพียง

นิชาภา จันดีมา
ปัญนุช เวทย์วิวัฒน์
สุธาริน สถาปัตตานนท์

01

ความสัมพันธ์ของกลุ่มปัจจัยสำหรับประเมิน
การพัฒนาโครงการก่อสร้างซึ่งสอดคล้อง
ตามหลักของปรัชญาเศรษฐกิจพอเพียงที่มี
อิทธิพลต่อการสร้างเสริมคุณภาพชีวิต
ของประชาชน

นิชาภา จันดีมา
ปัญนุช เวทย์วิวัฒน์
สุธาริน สถาปัตตานนท์

13

ผลกระทบจากอาคารกีดขวางด้านหน้าต่อ
แรงดันลมที่กระทำต่ออาคารสูง โดยใช้
โปรแกรมทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

มานพ เจริญยุทธ
ทรงพล จารุวิศิษฐ์

25

ผลกระทบจากการบดบังของอาคารคู่ต่อ
แรงดันลมที่กระทำต่ออาคารสูง โดยใช้
โปรแกรมทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

มานพ เจริญยุทธ
ทรงพล จารุวิศิษฐ์

47

สาเหตุความล่าช้าของงานก่อสร้างในทัศนะ
ของวิศวกรโยธา

วัชรินทร์ แก้วใจจง
วชรภูมิ เบนญอโฬาร

70

ผลของรูปแบบและขนาดรูเจาะที่มีต่อ
การชะลอรอยร้าวความล้าในเหล็กแผ่น
ภายใต้แรงดัด

สัจจา จันทรักษา
ณัฏฐ์ สุขพลัมพลา
ปิยะ โชติทโกไร

85

การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดในการจัดหาและ
การจัดการสินค้าคงคลังของผู้ผลิตทุเรียน
แช่เยือกแข็ง

ธนพงษ์ ร่วมสุข
พรธิภา องค์กรคุณาธิษ
ทวีพันธ์ เลียงพิบูลย์

103

การออกแบบวงจรวัดสัญญาณส่วนหน้า
อัตราการกินพลังงานต่ำและสัญญาณ
รบกวนต่ำที่มีความสามารถในการต้าน
การเคลื่อนที่แบบปรับได้ทางอิเล็กทรอนิกส์
สำหรับการวัดสัญญาณคลื่นไฟฟ้าหัวใจ

อินทวิช ยงพานิชย์
วรรณ วัฒนพานิช

116

การประเมินเศรษฐศาสตร์ของการผลิต
น้ำมันหล่อลื่นชีวภาพเชิงพาณิชย์จาก
น้ำมันพืช

เนติพล สกุลชาห์
พรปวีณ์ พหลพลญาณ
||พรวรา มณี
กฤษฎ์พรปวีณ์ ปิ่นดิษฐ
ณัชพล เจริญสำราญ
เมธี สายศรีหยุด
อนุสิษฐ์ ธนะพิมพ์เมธา
เพ็ญจิตร ศรินพคุณ

130

A decorative graphic on the right side of the page features a series of interlocking gears of different sizes. A horizontal line with a stepped profile on the left side extends from the left margin towards the gears.

KASETSART ENGINEERING JOURNAL

A horizontal line composed of a series of small, overlapping squares or rectangles, located below the main title.



กลุ่มปัจจัยสำหรับประเมินการพัฒนาโครงการก่อสร้าง ซึ่งสอดคล้องตามหลักของปรัชญาเศรษฐกิจพอเพียง

Group of factors for assessing the development of construction projects in line
with the principles of the Sufficiency Economy Philosophy

นิชาภา จันตะมา* ปิยนุช เวทย์วิวัฒน์ และ สุธาริน สถาปิตานนท์
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
E-mail: miu.nichapa@gmail.com, fengpyv@ku.ac.th, fengsrp@ku.ac.th

* ผู้ประพันธ์บรรณกิจ (corresponding author)



บทคัดย่อ

โครงการก่อสร้างมีส่วนสำคัญต่อการพัฒนาชีวิตความเป็นอยู่ของประชาชน หากสามารถประยุกต์หลักเศรษฐกิจพอเพียงมาช่วยพิจารณาในขั้นตอนการพัฒนาโครงการ จะส่งผลให้การจัดสรรงบประมาณมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบของตัวชี้วัดการพัฒนาโครงการก่อสร้างตามหลักปรัชญาเศรษฐกิจพอเพียง โดยเก็บข้อมูลจากวิศวกร 138 คน ผ่านการสัมภาษณ์พร้อมแบบสอบถาม พบว่า องค์ประกอบของตัวชี้วัดทั้ง 38 ตัว ประกอบไปด้วย 7 กลุ่มปัจจัย โดยกลุ่มที่ 1 การมีส่วนร่วมของผู้เกี่ยวข้องและผู้ด้อยโอกาส 7 ปัจจัยย่อย กลุ่มที่ 2 การพิจารณาความจำเป็นและความเหมาะสมทางเศรษฐกิจ 10 ปัจจัยย่อย กลุ่มที่ 3 การพิจารณาลดผลกระทบจากโครงการ 4 ปัจจัยย่อย กลุ่มที่ 4 การพิจารณาอย่างรอบด้านเพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุด 6 ปัจจัยย่อย กลุ่มที่ 5 การต่อยอดการพัฒนาสู่ชุมชนอย่างยั่งยืน 4 ปัจจัยย่อย กลุ่มที่ 6 การรวบรวมข้อมูลอย่างเป็นระบบและพัฒนาทางเลือกที่เป็นไปได้ทั้งหมด 4 ปัจจัยย่อย และสุดท้าย กลุ่มที่ 7 การทำงานร่วมกันด้วยทีมที่รอบรู้และสามัคคี 3 ปัจจัยย่อย ทั้ง 7 กลุ่ม สามารถอธิบายความแปรปรวนของตัวแปรรวมได้ร้อยละ 61.860 โดยกลุ่มตัวอย่าง ปฏิบัติสอดคล้องในเรื่องของการพิจารณาลดผลกระทบจากโครงการมากที่สุด (4.23) ส่วนในเรื่องการพิจารณาความจำเป็นและความเหมาะสมทางเศรษฐกิจ (3.65) และการต่อยอดสู่การพัฒนาชุมชนอย่างยั่งยืน (3.23) นั้น กลุ่มตัวอย่างให้ความสำคัญน้อยที่สุด โดยเฉพาะการแก้ไขปัญหาความเดือดร้อนในการประกอบอาชีพทำกินของผู้มีรายได้น้อย (3.23) และการพัฒนาองค์ความรู้เกี่ยวกับโครงการให้กับชุมชนในท้องถิ่น สร้างความเข้าใจ ให้ประชาชนต่อยอดความรู้ได้ (2.75)



คำสำคัญ: ปรัชญาเศรษฐกิจพอเพียง; การพัฒนาโครงการก่อสร้าง; การจัดสรรงบประมาณ; การวิเคราะห์องค์ประกอบ



Abstract

Construction Projects contribute significantly to the development of people's lives. If sufficiency economy philosophy can be used to assess the construction project during development stage, allocation of budget can be more efficient. The study aims to factor analyzed construction project development indicators in accordance with the sufficiency economy philosophy. Data was collected through interview with questionnaire with 138 engineers in Thai construction industry. The results revealed that the 38 initial indicators were divided into 7 groups: Group 1 Accurate problem identification focusing on the underprivileged group with 7 factors, Group 2 Securing economy necessity for the underprivileged group with 10 factors, Group 3 Sincere mitigation of development impact with 4 factors, Group 4 Maximize utilities through comprehensive consideration with 6 factors, Group 5 Extended value of development to a sustainable community with 4 factors, Group 6 Systematically alternatives develop with comprehensive knowledge with 4 factors, and Group 7 Strong teamwork and team spirit with 3 factors. The total variance explained is 61.860%. The respondents emphasized most on Sincere mitigation of development impact (4.23). However, they do not give importance as much on Securing economy necessity for the underprivileged group (3.65) and Extended value of development to a sustainable community (3.23) especially on solving underprivileged group's problems of making a living (3.23) and also developing the project knowledge for local people to understand and further extend the project benefits (2.75).

Keywords: sufficiency economy philosophy; construction project development; budget allocation; Factor Analysis

1. บทนำ

อุตสาหกรรมก่อสร้างมีบทบาทสำคัญในการเติบโตของเศรษฐกิจท้องถิ่นและเศรษฐกิจของประเทศโดยเฉพาะอย่างยิ่งในประเทศกำลังพัฒนา [10, 12] คุณภาพชีวิตของผู้คนสามารถปรับปรุงได้ด้วยการก่อสร้างโครงการโครงสร้างพื้นฐานสาธารณะ

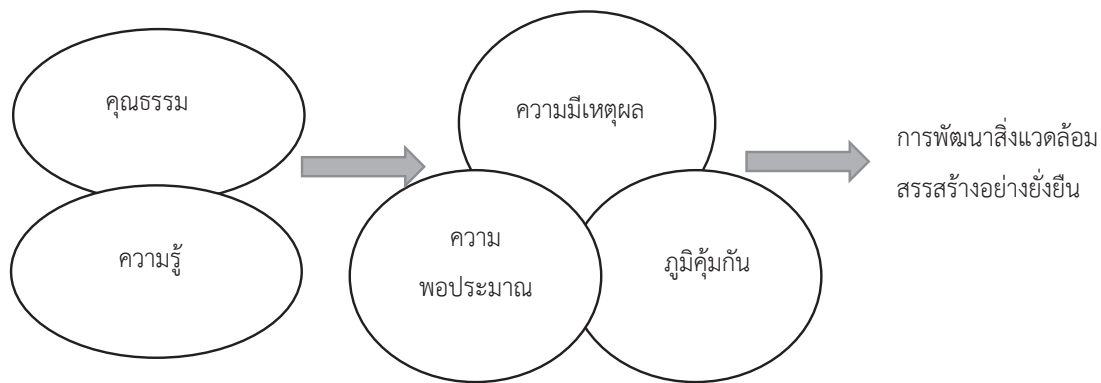
ใหม่หรือการขยายปรับปรุงและปรับปรุงสิ่งอำนวยความสะดวกที่มีอยู่เพื่อให้บรรลุเป้าหมายระดับโลก นั่นคือเป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืน 17 ประการ (SDG17) และในปี 2030 อุตสาหกรรมการก่อสร้างจะมีบทบาทสำคัญในการสนับสนุนโครงสร้างพื้นฐาน

ในการบรรลุเป้าหมายเหล่านี้ได้ [2, 3] ยิ่งไปกว่านั้น ประเทศกำลังพัฒนาอย่างเช่นประเทศไทย เราพบว่าในช่วงปี 2009-2018 มีมูลค่าการลงทุนก่อสร้าง มีสัดส่วนเฉลี่ยร้อยละ 8.1 ของผลิตภัณฑ์มวลรวมในประเทศ (Gross Domestic Product: GDP) โดยส่วนใหญ่เป็นโครงการลงทุนโครงสร้างพื้นฐานของภาครัฐ คิดเป็นสัดส่วนเกือบร้อยละ 80 ของมูลค่าก่อสร้างงานภาครัฐทั้งหมด [9] และการพัฒนาในระดับประเทศเป็นการสร้างความสามารถในการแข่งขัน เพื่อเร่งให้ประเทศมีการเติบโตทางเศรษฐกิจอย่างต่อเนื่อง และคำนึงถึงผลกำไรเป็นสำคัญ ประเทศต้องพัฒนาหลายเรื่องพร้อมกันเพื่อยกระดับการพัฒนาประเทศแบบก้าวกระโดด ส่งผลให้เกิดความไม่สมดุลทั้งทางด้านเศรษฐกิจ สังคม และสิ่งแวดล้อม [16] ดังเช่นตัวอย่างการเกิดวิกฤติเศรษฐกิจในปี 2540 และในปลายเดือนพฤศจิกายนปี 2540 พระบาทสมเด็จพระปรมินทรมหาภูมิพลอดุลยเดช เป็นพระมหากษัตริย์ไทย รัชกาลที่ 9 ได้ทรงเมตตาพระราชทานแนวคิดปรัชญาเศรษฐกิจพอเพียงเพิ่มในแผนพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ ซึ่งมีความสำคัญในการพัฒนาประเทศ ทั้งทางด้านเศรษฐกิจ สังคมและสิ่งแวดล้อม โดยมีเป้าหมายระยะยาวที่ยั่งยืน [14] ปรัชญาของเศรษฐกิจพอเพียงเป็นทั้งหลักคิดและหลักปฏิบัติที่เป็นประโยชน์ต่อการดำรงชีวิตของประชาชนทุกระดับ รวมทั้งภาครัฐและหน่วยงานต่าง ๆ ก็สามารถนำปรัชญานี้ไปประยุกต์และใช้ในการบริหารและพัฒนาประเทศด้านต่าง ๆ ได้อย่างกว้างขวาง [4] ซึ่งได้ถูกนำมาไปประยุกต์ใช้ในการดำเนินชีวิต และการทำงาน ทั้งในระดับบุคคล ชุมชน ธุรกิจขนาดกลาง ธุรกิจขนาดย่อม

ธุรกิจขนาดใหญ่ และองค์กรภาครัฐ ในส่วนกลางและภูมิภาค ซึ่งประสบความสำเร็จและได้รับรางวัลการประกวดผลงานตามแนวคิดปรัชญาเศรษฐกิจพอเพียง ร่วมจัดขึ้นโดยสำนักงานคณะกรรมการพิเศษเพื่อประสานงานโครงการอันเนื่องมาจากพระราชดำริ และหน่วยงานต่าง ๆ เริ่มตั้งแต่ปี 2550 จนถึงปัจจุบัน [11] จึงเห็นความสำคัญที่จะนำแนวคิดปรัชญาเศรษฐกิจพอเพียง มาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรม การก่อสร้าง โดยวิจัยนี้จะนำตัวชี้วัดที่พัฒนาขึ้นมาวิเคราะห์หาค่าประกอบ (Factor Analysis) [13] ของปัจจัยสำหรับประเมินการพัฒนาโครงการก่อสร้าง ซึ่งสอดคล้องตามหลักของปรัชญาเศรษฐกิจพอเพียง ซึ่งผลการวิจัยจะช่วยให้เข้าใจถึงกลุ่มปัจจัยที่ส่งต่อการพัฒนาโครงการก่อสร้างซึ่งสอดคล้องตามหลักของปรัชญาเศรษฐกิจพอเพียงมากยิ่งขึ้น และจะเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่ออุตสาหกรรม การก่อสร้าง ซึ่งเป็นอุตสาหกรรมหนึ่งที่ช่วยขับเคลื่อน และพัฒนาประเทศทั้งในปัจจุบัน และในอนาคตอย่างเป็นระบบ ที่สุดในแนวทางของเศรษฐกิจพอเพียง เพื่อนำไปสู่ความยั่งยืน

2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

ดัชนีตัวชี้วัดพัฒนาโดยใช้กรอบของหลักปรัชญาเศรษฐกิจพอเพียง ประกอบด้วย 3 องค์ประกอบหลัก และสองเงื่อนไขพื้นฐาน [7] โดยองค์ประกอบหลักทั้ง 3 ประกอบไปด้วย ความพอประมาณ ความมีเหตุผล และภูมิคุ้มกันในตัว ในส่วนของเงื่อนไขพื้นฐานที่จะทำให้บรรลุความพอเพียงได้แก่ ความรู้ และคุณธรรม ดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 ปรัชญาเศรษฐกิจพอเพียงนำไปสู่การพัฒนาสภาพแวดล้อมที่สร้างขึ้นอย่างยั่งยืน

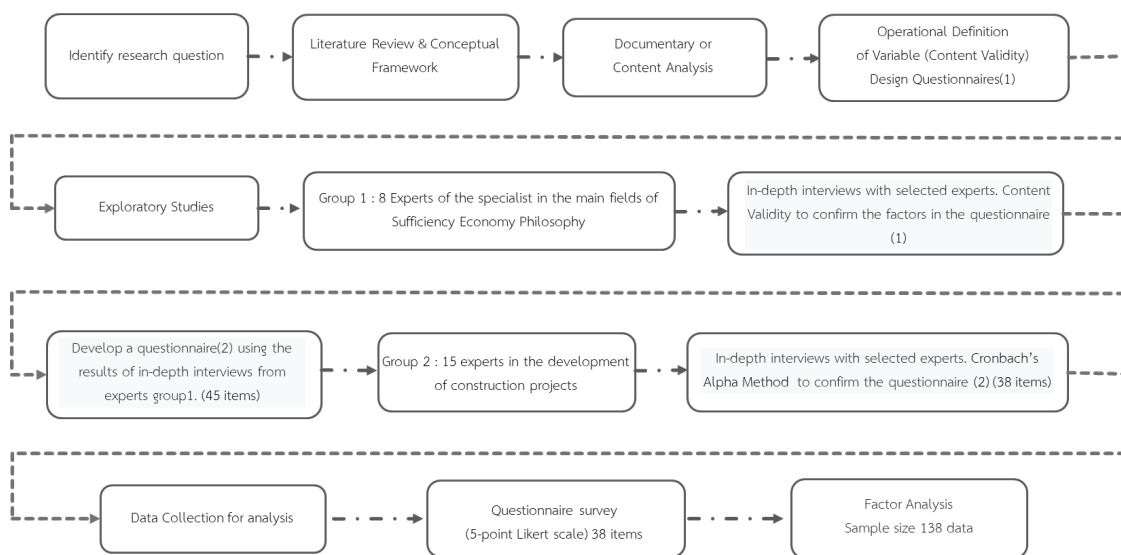
จากการรวบรวมทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา ตัวชี้วัดของหลักปรัชญาของเศรษฐกิจพอเพียง โครงการในพระราชดำริ พระบรมราโชวาท โครงการภาครัฐ และเกณฑ์ปฏิบัติทั้งในประเทศ และต่างประเทศ ผู้วิจัยวิเคราะห์ข้อมูลโดยการวิเคราะห์เนื้อหา (content analysis) ผ่านการสัมภาษณ์เชิงลึก (in-depth interview) [5, 15] จากผู้เชี่ยวชาญโดยใช้ผู้เชี่ยวชาญที่มีประสบการณ์การทำงานมากกว่า 10 ปี จำนวน 6 คน และสามารถเก็บข้อมูลเพิ่มเติมจากผู้เชี่ยวชาญได้อีก 2 คน รวมผู้เชี่ยวชาญในการวิเคราะห์เนื้อหาครั้งแรก จำนวน 8 คน [6] ซึ่งแบ่งเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มที่ 1 ผู้เชี่ยวชาญด้านการปฏิบัติงานด้านวิศวกรรม และกลุ่มที่ 2 ผู้เชี่ยวชาญด้านปรัชญาของเศรษฐกิจพอเพียง รวบรวมข้อคำถามได้ทั้งหมด 45 ข้อ ซึ่งจำแนกจำนวนข้อคำถามในแต่ละด้านได้ดังนี้ ด้านความพอประมาณ 11 ข้อ ด้านความมีเหตุผล 6 ข้อ ด้านการมีภูมิคุ้มกันในตัว 5 ข้อ ด้านความรู้ 7 ข้อ ด้านคุณธรรม 16 ข้อ [1] และข้อคำถามทั้งหมด 45 ข้อ ผู้วิจัยวิเคราะห์ข้อมูล

โดยการวิเคราะห์เนื้อหาครั้งที่ 2 ผ่านการสัมภาษณ์เชิงลึก จากวิศวกรผู้ปฏิบัติงานที่ทำงานเกี่ยวข้องกับโครงการก่อสร้างที่มีประสบการณ์การทำงานมากกว่า 10 ปีขึ้นไป จำนวนทั้งหมด 15 คน พบว่าในความหมายสำหรับผู้ปฏิบัติงานมีข้อคำถามบางข้อคำถามที่มีความหมายโดยรวมเหมือนกันในภาคปฏิบัติ จึงมีข้อคำถามเหลือเพื่อการเก็บข้อมูลงานวิจัยนี้เพียง 38 ข้อ

งานวิจัยนี้ได้เก็บข้อมูลจากจากวิศวกรผู้ปฏิบัติงานที่ทำงานเกี่ยวข้องกับโครงการก่อสร้างที่มีประสบการณ์การทำงานมากกว่า 5 ปีขึ้นไป จากภาครัฐจำนวน 73 คน ภาคเอกชนจำนวน 33 คน และรัฐวิสาหกิจจำนวน 32 คน รวมกลุ่มตัวอย่างจำนวน 138 คน และใช้แบบสอบถามที่พัฒนาขึ้นซึ่งประกอบด้วยข้อคำถามทั้งหมด 38 ข้อ ด้านความพอประมาณ 11 ข้อ (M19-29) ด้านความมีเหตุผล 6 ข้อ (R30-35) ด้านการมีภูมิคุ้มกันในตัว 3 ข้อ (S36-38) ด้านความรู้ 7 ข้อ (K1-7) ด้านคุณธรรม 11 ข้อ (Mor8-18) เก็บข้อมูลจากการสัมภาษณ์เชิงลึกเพื่อให้ได้ข้อมูล

เชิงคุณภาพ ผ่านแบบสอบถามที่เป็นลิเกิร์ตสเกล (Likert scale) 1-5 ระดับ เพื่อเก็บข้อมูลของแนวทางการปฏิบัติงานของกลุ่มตัวอย่างมาวิเคราะห์องค์ประกอบของตัวชี้วัดการพัฒนาโครงการก่อสร้างตามหลักปรัชญาเศรษฐกิจพอเพียง โดยการตรวจสอบและวิเคราะห์ข้อมูลด้วย SPSS เพื่อให้ได้กลุ่มปัจจัย

จากข้อความที่มีความสอดคล้องกับทฤษฎี ขั้นตอนการวิจัยแสดงรายละเอียดขั้นตอนดังภาพที่ 2 โดยจำนวนข้อมูลในการวิเคราะห์องค์ประกอบของปัจจัยอยู่ระหว่าง 3-20 เท่าของจำนวนตัวแปร [8] ซึ่งถือว่าจำนวนข้อมูลในงานวิจัยนี้เหมาะสมในการนำมาวิเคราะห์องค์ประกอบ



ภาพที่ 2 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3. ผลและวิจารณ์ผลการศึกษา

การวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อการพัฒนาโครงการก่อสร้างตามหลักปรัชญาเศรษฐกิจพอเพียงตัวแปรที่มีผลต่อการพัฒนาโครงการก่อสร้างตามหลักปรัชญาเศรษฐกิจพอเพียงที่ผู้วิจัยได้นำมาทำการศึกษา มีจำนวนทั้งหมด 38 ตัวแปร มีรายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 3 ซึ่งผู้วิจัยได้ทดสอบค่า KMO and Bartlett's Test พบว่า ค่า Kaiser-Meyer-Olkin

เท่ากับ 0.720 ซึ่งมีค่ามากกว่า 0.5 แสดงว่า ข้อมูลมีความเหมาะสมที่จะใช้เทคนิค Factor Analysis ในการวิเคราะห์ข้อมูล และพบว่า Bartlett's Test of Sphericity มีค่านัยสำคัญเท่ากับ 0.000 ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 0.05 แสดงว่าตัวแปรต่าง ๆ มีความสัมพันธ์กันสามารถใช้เทคนิค Factor Analysis ในการวิเคราะห์ผลได้ ดังแสดงค่าในตารางที่ 1



ตารางที่ 1 ตารางแสดงค่า KMO and Bartlett's Test

Kaiser-Meyer-Olkin Measure of Sampling Adequacy.		0.720
Bartlett's Test of Sphericity	Approx. Chi-Square	3273.830
	df	703
	Sig.	0.000

จากนั้นจึงนำข้อมูลมาวิเคราะห์องค์ประกอบ (Component) ซึ่งโดยรวมทั้ง 11 กลุ่มปัจจัยนี้พบว่า วิศวกรที่ทำงานที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับการพัฒนาโครงการก่อสร้างทั้ง ภาครัฐ ภาคเอกชน และ รัฐวิสาหกิจ จำนวน 138 คน มีค่าน้ำหนักปัจจัยย่อย (Factor loading) เมื่อหมุนแกนปัจจัยโดยวิธี Varimax สามารถแบ่งปัจจัยได้ทั้งหมด 11 กลุ่มปัจจัย สามารถอธิบายความแปรปรวนของตัวแปรได้เท่ากับ ร้อยละ 73.662 ซึ่งกลุ่มปัจจัย ที่ 1-11 เท่านั้นที่มีค่า Eigenvalues มากกว่า 1 จึงควรมีทั้งหมด 11 กลุ่มปัจจัย ดังแสดงผลในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ตารางแสดงค่าความแปรปรวนรวม (Total Variance Explained)

Component	Initial Eigenvalues			Extraction Sums of Squared Loadings		
	Total	% of Variance	Cumulative %	Total	% of Variance	Cumulative %
1	9.547	25.123	25.123	9.547	25.123	25.123
2	4.306	11.332	36.455	4.306	11.332	36.455
3	2.493	6.561	43.016	2.493	6.561	43.016
4	2.432	6.401	49.417	2.432	6.401	49.417
5	1.908	5.020	54.437	1.908	5.020	54.437
6	1.500	3.946	58.383	1.500	3.946	58.383
7	1.321	3.477	61.860	1.321	3.477	61.860
8	1.280	3.369	65.229	1.280	3.369	65.229
9	1.116	2.937	68.166	1.116	2.937	68.166
10	1.076	2.833	70.998	1.076	2.833	70.998
11	1.012	2.663	73.662	1.012	2.663	73.662
12	0.937	2.467	76.129			



แต่พบว่ามีย่อยในกลุ่มปัจจัยที่ 8-11 ซึ่งสามารถแบ่งกลุ่มปัจจัยได้ทั้งหมด 7 กลุ่มปัจจัย ที่ไม่สามารถจัดกลุ่มโดยรวมปัจจัยมากกว่า 3 ปัจจัย ดังแสดงได้ในตารางที่ 3 และโดยรวมทั้ง 7 กลุ่ม ย่อยใน 1 กลุ่มปัจจัยได้ ผู้วิจัยจึงพิจารณาจัดกลุ่ม ปัจจัยนี้ สามารถอธิบายความแปรปรวนของปัจจัย ตัวแปรโดยอ้างอิงตามการทบทวนวรรณกรรม และ ย่อยได้ประมาณร้อยละ 61.680 ดังแสดงได้ใน การวิเคราะห์เชิงเนื้อหาจากงานวิจัยก่อนหน้านี้ [1] ตารางที่ 2

ตารางที่ 3 ตารางแสดงผลกลุ่มปัจจัยสำหรับประเมินการพัฒนาโครงการก่อสร้างซึ่งสอดคล้องตามหลัก
ของปรัชญาเศรษฐกิจพอเพียง

items		factor Loading	Mean	Private mean	SE Mean	Public mean
ปัจจัยกลุ่มที่ 1 การมีส่วนร่วมของผู้เกี่ยวข้องและผู้มีรายได้น้อย (X1)			4.07	3.13	4.61	4.27
X1.1	ไม่ขัดต่อกฎหมาย ปฏิบัติตามกฎหมาย รักษาระเบียบ วินัย กฎข้อบังคับ	0.368	4.58	4.24	4.81	4.64
X1.2	สอดคล้องกับแผนพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ หรือ ยุทธศาสตร์ชาติ	0.635	4.47	3.72	4.93	4.60
X1.3	เข้าพูดคุยรับฟังปัญหา ความเดือดร้อน ของประชาชนทุกภาคส่วน	0.825	4.12	2.97	4.81	4.34
X1.4	คำนึงถึงความถูกต้องเป็นธรรม เกิดประโยชน์กับประเทศชาติ และประชาชน	0.813	3.99	2.60	4.81	4.26
X1.5	ไม่เอาประโยชน์ของผู้พัฒนาโครงการเป็นใหญ่ เต็มใจเสียสละเพื่อประโยชน์ของส่วนรวม	0.662	3.93	3.00	4.68	4.02
X1.6	พูดคุยแลกเปลี่ยนความรู้และประสบการณ์ภายในทีม หน่วยงาน นักวิชาการ และ ชาวบ้าน	0.829	3.82	2.63	4.46	4.08
X1.7	ร่วมกันตัดสินใจเลือกแนวทางในการแก้ไขปัญหา ให้ชาวบ้านได้มีส่วนร่วมในการประชุม	0.429	3.60	2.72	3.75	3.93
ปัจจัยกลุ่มที่ 2 การพิจารณาความจำเป็นและความเหมาะสมทางเศรษฐกิจ (X2)			3.65	3.16	3.94	3.75
X2.1	ออกแบบก่อสร้าง บริหารจัดการ บำรุงรักษาได้โดยคนภายในหน่วยงาน หรือคนไทย	0.437	4.18	3.75	4.37	4.28
X2.2	แก้ไขปัญหาความเดือดร้อนที่เป็นภัยอันตรายต่อชีวิตและทรัพย์สินของคนในพื้นที่	0.791	3.97	3.60	4.28	4.01
X2.3	ใช้งบประมาณอย่างประหยัด ไม่ฟุ้งเฟ้อ สร้างหนี้เงินกู้ยืม แบ่งโครงการเป็นระยะๆ	0.769	3.79	3.27	4.21	3.83
X2.4	ยกระดับคุณภาพชีวิต เพิ่มศักยภาพและโอกาสในการพัฒนาชุมชน สังคม ประเทศชาติ	0.674	3.71	2.87	4.00	3.95
X2.5	ออกแบบพัฒนาให้สอดคล้องกับวิถีชีวิตความเป็นอยู่ตามวัฒนธรรมและประเพณีของ ชุมชน	0.441	3.69	3.21	4.03	3.76
X2.6	คำนึงถึงผลกระทบด้านเศรษฐกิจที่จะเกิดขึ้นกับประชาชนในพื้นที่พัฒนาอย่างเหมาะสม	0.565	3.63	3.12	4.15	3.63
X2.7	เลือกใช้วัสดุและเทคโนโลยีที่พัฒนาขึ้นในประเทศ หรือบัญชีนวัตกรรมไทย	0.372	3.60	3.36	3.71	3.67
X2.8	ออกแบบพัฒนาให้เหมาะสมกับเศรษฐกิจในพื้นที่	0.471	3.37	2.60	3.68	3.58
X2.9	คำนึงถึงการจ้างคน เพื่อให้เกิดการจ้างงานและเพื่อพัฒนาคน ลดเครื่องจักร	0.675	3.33	3.33	3.59	3.21
X2.10	แก้ไขปัญหาความเดือดร้อนในการประกอบอาชีพทำกิน	0.866	3.23	2.45	3.34	3.53
ปัจจัยกลุ่มที่ 3 การพิจารณาผลกระทบจากโครงการ (X3)			4.26	4.07	4.76	4.13
X3.1	ไม่บิดเบือนข้อเท็จจริงกับประชาชน ไม่ปกปิดจุดประสงค์โครงการ ไม่โกงง่าย	0.707	4.41	4.24	4.78	4.32
X3.2	คำนึงถึงผู้ที่ได้รับผลกระทบ ช่วยเหลือดูแลให้ได้รับการชดเชยที่เป็นธรรม	0.835	4.23	4.09	4.78	4.06
X3.3	ตั้งใจระดมทุนสนับสนุนโครงการที่จะพัฒนาขึ้น ให้ทราบอย่างต่อเนื่องและจริงใจ	0.809	4.23	3.93	4.68	4.16
X3.4	ข้อดีสูงสุดจริงในการออกแบบพัฒนา มีความบริสุทธิ์ใจ ปราศจากอคติต่อประเทศชาติ	0.475	4.18	4.03	4.81	3.98
ปัจจัยกลุ่มที่ 4 การพิจารณาอย่างรอบด้านเพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุด (X4)			4.06	3.88	4.47	3.97
X4.1	มีการจัดทำแผนการบริหารจัดการโครงการ เพื่อให้สามารถใช้งานได้จริงตามวัตถุประสงค์	0.520	4.26	4.15	4.75	4.09



X4.2	มีการพิจารณาต้นทุนตลอดอายุขัยของโครงการ (Whole-Life Cost)	0.785	4.19	3.90	4.71	4.09
X4.3	ออกแบบให้สอดคล้องกับสภาพแวดล้อม ตามลักษณะทางกายภาพของพื้นที่ภูมิประเทศ	0.691	4.12	3.78	4.40	4.15
X4.4	สนับสนุนให้มีการพัฒนากำลังคนให้มีความรู้ความสามารถและทักษะต่างๆ ที่จำเป็น	0.570	4.08	3.72	4.65	3.98
X4.5	พิจารณาลดรายจ่าย เพื่อให้เกิดความคุ้มค่า (Value engineering)	0.800	3.97	4.00	4.09	3.91
X4.6	ออกแบบให้มีการต่อขยายโครงการ หรือการปรับโครงการไปใช้งานอื่นในอนาคต	0.583	3.76	3.72	4.21	3.57
ปัจจัยกลุ่มที่ 5 การต่อยอดการพัฒนาสู่ชุมชนอย่างยั่งยืน (X5)		3.22	2.75	3.91	3.13	
X5.1	คำนึงถึงผลกระทบที่มีต่อสิ่งแวดล้อม ไม่ทำลายทรัพยากรธรรมชาติโดยไม่จำเป็น	0.664	3.60	3.72	4.40	3.20
X5.2	ให้องค์กรส่วนท้องถิ่น หรือชุมชนได้มีส่วนร่วม ในการดูแลร่วมกับหน่วยงานที่รับผิดชอบ	0.675	3.31	2.42	4.40	3.24
X5.3	โครงการแก้ปัญหาหนึ่ง และตอบสนองความต้องการอื่นๆของชุมชนไปพร้อมๆกัน	0.763	3.22	2.66	3.50	3.35
X5.4	พัฒนาองค์ความรู้เกี่ยวกับโครงการให้กับชุมชนในท้องถิ่น เพื่อให้เข้าใจ ต่อยอดความรู้ได้	0.744	2.74	2.21	3.34	2.72
ปัจจัยกลุ่มที่ 6 การรวบรวมข้อมูลอย่างเป็นระบบและพัฒนาทางเลือกที่เป็นไปได้ทั้งหมด (X6)		4.14	3.93	4.51	4.07	
X6.1	สำรวจพื้นที่ที่จะพัฒนาโครงการให้รอบด้าน เผื่อสังเกต เก็บข้อมูลโดยละเอียดในทุกมิติ	0.637	4.37	4.15	4.81	4.27
X6.2	มีความตั้งใจที่จะรับฟัง และประสานข้อมูลอันเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาโครงการ	0.527	4.18	4.06	4.53	4.08
X6.3	พัฒนาทางเลือกในการแก้ไขปัญหาให้รอบด้าน เน้นใช้องค์ความรู้เรียบง่าย ไม่ซับซ้อน	0.690	4.02	3.90	4.31	3.95
X6.4	รับฟังและบันทึกแนวทางในการแก้ไขปัญหาจากทุกภาคส่วนอย่างเป็นระบบ	0.721	3.98	3.60	4.40	3.97
ปัจจัยกลุ่มที่ 7 การทำงานร่วมกันด้วยทีมที่รอบรู้และสามัคคี (X7)		4.18	3.91	4.38	4.21	
X7.1	ออกแบบพัฒนาโครงการอย่างเต็มกำลังความสามารถ ไม่ย่อท้อต่อปัญหาและอุปสรรค	0.573	4.32	3.84	4.62	4.41
X7.2	ทำงานเป็นทีม ช่วยกันแก้ปัญหา ด้วยความสามัคคี ไม่หาเฉพาะหน้าที่ของแต่ละคน	0.826	4.24	4.36	4.28	4.17
X7.3	พัฒนาขึ้นด้วยความเคารพในความรู้ ความคิด ประสบการณ์ของผู้ที่เกี่ยวข้อง	0.479	3.98	3.54	4.25	4.06

จากตารางที่ 3 ในภาพรวมมีระดับความคิดเห็นเกี่ยวกับปัจจัยอธิบายโดยใช้ค่าเฉลี่ย (Mean) ที่มากที่สุดไปน้อยที่สุดตามลำดับ พบว่าภาครัฐ และรัฐวิสาหกิจ จะมีค่าเฉลี่ยมากกว่าภาคเอกชนในทุกกลุ่มปัจจัย นั่นคือปัจจัยกลุ่มที่ 3 การพิจารณาผลกระทบจากโครงการ (X3) มีความสำคัญต่อการพัฒนาโครงการก่อสร้างตามหลักปรัชญาเศรษฐกิจพอเพียงอยู่ในระดับสูงที่สุด มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.26 เนื่องด้วยภาครัฐมีระบบการทำงานที่มีขั้นตอนในการขออนุญาตตั้งแต่ระดับล่างขึ้นสู่ระดับบน และต้องแสดงถึงความชัดเจน โปร่งใสให้กับประชาชน เพื่อให้เห็นถึงความก้าวหน้าในการพัฒนาโครงการอย่างต่อเนื่อง เกิดปัญหาและอุปสรรคน้อยที่สุด การพยายามลดผลกระทบอย่างรอบด้านจึงมีความสำคัญต่อขั้นตอนการทำงานของระบบงานภาครัฐ

เป็นอย่างมาก ซึ่งต่างจากภาคเอกชนที่ไม่จำเป็นต้องสื่อสารประชาสัมพันธ์กับประชาชนอย่างต่อเนื่อง การลดผลกระทบที่จะเกิดจากโครงการค่อนข้างน้อย เพราะเป็นการทำในพื้นที่ของตนเอง และแจ้งประชาชนโดยรอบพื้นที่ให้ทราบ และหากมีผลกระทบที่ก่อความเสียหาย จะมีการชดเชยให้อย่างเต็มกำลัง และเมื่อพิจารณาปัจจัยกลุ่มที่ 7 การทำงานร่วมกันด้วยทีมที่รอบรู้และสามัคคี (X7) มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.18 ซึ่งสูงเป็นลำดับที่ 2 พบว่าในการทำงานอย่างเต็มกำลังความสามารถทุกกลุ่มตัวอย่างให้ความสำคัญมากพอ กันเนื่องจากแนวทางในการปฏิบัติงานสู่ความสำเร็จนั้นต้องอาศัยความมุ่งมั่น อดทน ไม่ย่อท้อต่ออุปสรรค แต่สาเหตุที่ทำให้ค่าเฉลี่ยภาคเอกชนต่ำนั้น จะเป็นปัจจัยย่อยเกี่ยวกับการใช้ประสบการณ์ของประชาชนมาช่วยในการพัฒนาโครงการ หากแต่ภาคเอกชน

จะรับฟังแต่ยังคงดำเนินการตามแผนงานเดิมที่ได้ตั้งไว้แล้วเท่านั้น ประสพการณ์ และแนวคิดของประชาชน ไม่ได้ถูกให้ความสำคัญเลยในภาคเอกชน นอกจากนี้ ปัจจัยกลุ่มที่ 6 การรวบรวมข้อมูลอย่างเป็นระบบ และพัฒนาทางเลือกที่เป็นไปได้ทั้งหมด (X6) เป็นกลุ่มปัจจัยที่สำคัญเป็นลำดับที่ 3 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.14 เนื่องจากภาคเอกชนสามารถเลือกวิธีที่เกิดประโยชน์ต่อผลกำไร แม้จะลงทุนมากแต่ผลกำไรต้องคุ้มค่า เน้นให้ระยะเวลาเดินโครงการสั้นที่สุดโดยไม่จำเป็นต้องใช้ความเรียบง่ายขององค์ความรู้และเทคโนโลยี แต่หากภาครัฐและรัฐวิสาหกิจยังเป็นจำเป็นต้องควบคุมงบประมาณในโครงการให้ใช้อย่างประหยัดและเกิดประโยชน์ต่อประชาชนอย่างมากที่สุด จึงต้องมีการเก็บข้อมูลอย่างรอบด้าน รับฟังความคิดเห็นจากทุกภาคส่วน ก่อนตัดสินใจเลือกทางเลือกหนึ่งๆ ซึ่งมีผลต่อเนื้อหาปัจจัยกลุ่มที่ 1 การมีส่วนร่วมของผู้เกี่ยวข้องและผู้มีรายได้น้อย (X1) เป็นกลุ่มปัจจัยที่มีความสำคัญเป็นลำดับที่ 4 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.07 เพราะการพูดคุยแลกเปลี่ยนความรู้และประสบการณ์ภายในทีม หน่วยงาน นักวิชาการ และชาวบ้าน เป็นข้อมูลสำคัญที่จะนำมาพิจารณาเลือกโครงการพัฒนาที่ตรงตามความต้องการของประชาชนบนความถูกต้องตามหลักวิชาการ มุ่งเน้นประโยชน์ที่จะเกิดกับประชาชนเป็นหลัก และสามารถพัฒนาโครงการเพื่อให้ใช้งานโครงการได้ตามวัตถุประสงค์ที่แท้จริง และโครงการไม่ถูกทิ้งร้างอย่างไร้ประโยชน์ ซึ่งเป็นการใช้งบประมาณอย่างสิ้นเปลือง และในปัจจัยกลุ่มที่ 4 การพิจารณาอย่างรอบด้านเพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุด (X4) มีความสำคัญเป็นลำดับที่ 5 ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.06 ในการพัฒนา

โครงการทุกภาคส่วนปฏิบัติตามกลุ่มปัจจัยนี้ทั้งหมด แต่ค่าเฉลี่ยภาคเอกชนน้อยกว่าเพราะการพิจารณาต้นทุนตลอดอายุขัยของโครงการก็ไม่ได้เป็นสิ่งสำคัญ เนื่องจาก หากมีการส่งมอบโครงการแล้ว ภาระส่วนนี้จะเป็นของเจ้าของกรรมสิทธิ์ ภาคเอกชนไม่จำเป็นต้องดูแลโครงการในระยะยาว และแม้จะพิจารณาวิธีการที่ประหยัดและใช้ต้นทุนน้อย แต่ก็สามารถเพิ่มหรือเปลี่ยนแปลงได้หากเป็นความต้องการของลูกค้า ดังนั้นแล้วภาคเอกชนไม่จำเป็นต้องใช้ต้นทุนให้ต่ำที่สุด เป็นต้น และปัจจัยกลุ่มที่ 2 การพิจารณาความจำเป็นและความเหมาะสมทางเศรษฐกิจ (X2) มีความสำคัญเป็นลำดับที่ 6 ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 3.65 พบว่าการแก้ไขปัญหาความเดือดร้อนในการประกอบอาชีพทำกิน หรือความเดือดร้อนที่เป็นภัยอันตรายต่อชีวิตและทรัพย์สินของคนในพื้นที่เป็นเป้าประสงค์หลักของนโยบายภาครัฐไม่มุ่งเน้นผลกำไร มุ่งประโยชน์เพื่อส่วนร่วมเป็นสำคัญ ปัจจัยย่อยนี้จึงทำให้ภาคเอกชนมีค่าเฉลี่ยต่ำกว่า เพราะภาคเอกชนมุ่งเน้นการพัฒนาด้านเศรษฐกิจ และเพิ่มผลกำไร ไม่ได้มีวัตถุประสงค์ในการพัฒนาเศรษฐกิจเพื่อประชาชนแต่อย่างใด และปัจจัยกลุ่มที่ 5 การต่อยอดการพัฒนาสู่ชุมชนอย่างยั่งยืน (X5) พบว่ามีความสำคัญต่อการพัฒนาโครงการก่อสร้างตามหลักปรัชญาเศรษฐกิจพอเพียงอยู่ในระดับต่ำที่สุด มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 3.22 เนื่องจากโครงการภาครัฐจะอยู่ต่อเนื่องไปกับสังคมและประชาชนในระยะยาว ภาครัฐจึงมีฝ่ายที่ลงพื้นที่ให้ความรู้เกี่ยวกับโครงการที่จะพัฒนากับประชาชน รวมถึงวิธี การใช้ดูแลรักษา และร่วมกันสอดส่องและแจ้งปัญหาเกี่ยวกับหน่วยงานที่เกี่ยวข้องได้ทุกช่องทาง รวมถึงการตั้งศูนย์การเรียนรู้ กลุ่มสหกรณ์ เพื่อให้



โครงการดำเนินต่อไปด้วยการบริหารที่มีประชาชนร่วมด้วย แต่การต่อยอดการพัฒนาสู่ชุมชนนั้น ไม่ได้เป็นวัตถุประสงค์หลักของโครงการที่พัฒนาโดยภาคเอกชน ซึ่งภาคเอกชนนั้นมุ่งเน้นการสร้างผลกำไรให้กับองค์กร จึงส่งผลให้ค่าเฉลี่ยของภาคเอกชนต่ำ และมีผลให้ค่าเฉลี่ยรวมในปัจจัยกลุ่มนี้ขององค์กรทุกภาคส่วนมีค่าต่ำลง และต่ำที่สุดจากทั้งหมด 7 กลุ่มปัจจัย

4. สรุปผลการศึกษา

องค์ประกอบของตัวชี้วัดการพัฒนาโครงการก่อสร้างตามหลักปรัชญาเศรษฐกิจพอเพียง ประกอบไปด้วยองค์ประกอบ 7 กลุ่มปัจจัย มีการจัดกลุ่มเป็นไปตามหลักทฤษฎีของเศรษฐกิจพอเพียง 5 กลุ่มปัจจัย นั่นคือ ความพอประมาณ ความมีเหตุผล และภูมิคุ้มกันในตัว ในส่วนของเงื่อนไขพื้นฐานที่จะทำให้บรรลุความพอเพียงได้แก่ ความรู้ และคุณธรรม โดยมีบางปัจจัยย่อยที่ถูกแยกกลุ่มออกจากกลุ่มปัจจัยเดิม แต่ยังคงมีความสอดคล้องกันตามการแนวทางการปฏิบัติงานและการทบทวนวรรณกรรม สรุปได้ว่าปัจจัยกลุ่มที่ 1 การมีส่วนร่วมของผู้เกี่ยวข้องและผู้ด้อยโอกาส (X1) ประกอบด้วย คุณธรรม (Mor14-16) ความรู้ (K1, K3, K6) และความมีเหตุผล (R33) ปัจจัยกลุ่มที่ 2 การพิจารณาความจำเป็นและความเหมาะสมทางเศรษฐกิจ (X2) ประกอบด้วย ความพอประมาณ (M19-22, M24, M26) และความมีเหตุผล (R30-32, R34) ปัจจัยกลุ่มที่ 3 การพิจารณาลดผลกระทบจากโครงการ (X3) ประกอบด้วย คุณธรรม (Mor11, Mor13, Mor17-18) ปัจจัยกลุ่มที่ 4 การพิจารณาอย่างรอบด้านเพื่อให้เกิดประโยชน์

สูงสุด (X4) ประกอบด้วย ความพอประมาณ (M23, M25, M28-29) และ ภูมิคุ้มกันในตัว (S36, S38) ปัจจัยกลุ่มที่ 5 การต่อยอดการพัฒนาสู่ชุมชนอย่างยั่งยืน (X5) ประกอบด้วย ความพอประมาณ (M27) ความมีเหตุผล (R35) ภูมิคุ้มกันในตัว (S37) และความรู้ (K7) ปัจจัยกลุ่มที่ 6 การรวบรวมข้อมูลอย่างเป็นระบบและพัฒนาทางเลือกที่เป็นไปได้ทั้งหมด (X6) ประกอบด้วย ความรู้ (K2, K4, K5) และคุณธรรม (Mor12) และกลุ่มปัจจัยสุดท้าย ปัจจัยกลุ่มที่ 7 การทำงานร่วมกันด้วยทีมที่รอบรู้และสามัคคี (X7) ประกอบด้วย คุณธรรม (Mor8-10)

อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้สามารถสรุปองค์ความรู้ เพื่อให้เห็นถึงความสำคัญในการปฏิบัติตามแต่ละกลุ่มปัจจัยของกลุ่มตัวอย่างทั้งภาครัฐ รัฐวิสาหกิจ และเอกชน ซึ่งจะช่วยให้สามารถประเมินได้ว่าการปฏิบัติงานขององค์กรเรานั้น ปฏิบัติสอดคล้องไปตามหลักปรัชญาของเศรษฐกิจพอเพียงได้มากน้อยเพียงใด และทางองค์กรเองสามารถที่จะปรับแก้และพัฒนาการปฏิบัติงานเพื่อการพัฒนาโครงการให้เป็นไปในแนวทางของหลักปรัชญาของเศรษฐกิจพอเพียงมากขึ้น อันนำไปสู่ประโยชน์สูงสุดในทุกมิติต่อประชาชนและประเทศชาติ อย่างยั่งยืนในระยะยาวต่อไป และกลุ่มปัจจัยจากงานวิจัยนี้สามารถนำไปพัฒนางานวิจัยใหม่เพื่อหาความสัมพันธ์ของกลุ่มปัจจัย ซึ่งอาจจะเกิดความชัดเจนในการพัฒนาโครงการอย่างเป็นลำดับขั้นตอนต่อไปในอนาคตได้

5. เอกสารอ้างอิง

[1] Chantama N, Wethyavivorn P (2021). Sufficiency economy indicators for built

environment projects development in Thailand, Proceeding of the 59th KU Annual Conference, Bangkok, Thailand, 43-P457 ISBN: 978-616-278-617-4.

[2] Fei W, Opoku A, Agyekum K, Oppon J, Ahmed V, Chen C, and Lok K (2021). The Critical Role of the Construction Industry in Achieving the Sustainable Development Goals (SDGs): Delivering Projects for the Common Good by Sustainability 2021, 13(16), 9112; <https://doi.org/10.3390/su13169112>

[3] Goubran S (2019). On the Role of Construction in Achieving the SDGs. Journal of Sustainability Research. J Sustain Res.2019;1: e190020; <https://doi.org/10.20900/jsr20190020>

[4] Khaemmani T (2015). Deciphering the philosophy of sufficiency economy to teach thinking processes: Chulalongkorn University Press.

[5] Lincharearn A (2555). Qualitative Data Analysis Techniques. Journal of Educational Measurement, Faculty of Education, Naresuan University, 17(1), July 2012, 17-29.

[6] Macmillan T (1971). The Delphi Technique. Paper Presented at the annual meeting of the California Junior Colleges Associations Committee on Research and Development.

[7] Marome W (2017). A KNOWLEDGE ASSESSMENT ON SUSTAINABLE CITIES IN THAILAND; Sustainable City. Nakhon Pathom: Industrial Ecology Research and Training Center Faculty of Environment and Mahidol University Resource Center. P 144. ISBN 978-616-443-033-4.

[8] Mundfrom D, Shaw D, and Ke T (2009). Minimum Sample Size Recommendations for Conducting Factor Analyses. International Journal of Testing, Volume 5, 2005 - Issue 2 P159-168. https://doi.org/10.1207/s15327574ijt0502_4

[9] NESDB (2019). NESDB ECONOMIC REPORT (pp. 1-32) https://www.nesdc.go.th/ewt_dl_link.php?nid=8429

[10] Oladinrin T, Ogunsemi D, and Aje I (2012). Role of construction sector in economic growth: Empirical evidence from Nigeria. Journal of the Environment, ISSN: 1597-8826.

[11] ORDPB (2011). Sufficiency Economy Contests 2nd round. Bangkok: Office of the Royal Development Projects Board.

[12] Osei V (2013). The Construction Industry and its Linkages to the Ghanaian Economy-Polices Improve the Sector's Performance. International Journal of Development and Economic Sustainability, 56-72



[13] Rummel R (1970). Applied Factor Analysis. Evanston: Northwestern University Press 1970, 73-78327 SBN 8101-0254-4, Printed in the United States of America.

[14] Thailand, U. N. (2558). Sustainable Development Goals (SDGs). [https://www.](https://www.un.or.th/globalgoals/th/the-goals/)

[un.or.th/globalgoals/th/the-goals/](https://www.un.or.th/globalgoals/th/the-goals/).

[15] Thorne S (2008). Data analysis in qualitative research. <http://dx.doi.org/10.1136/ebn.3.3.68>

[16] Yudelso n J (2010). Sustainable Retail Development: New Success Strategies.

**ความสัมพันธ์ของกลุ่มปัจจัยสำหรับประเมินการพัฒนาโครงการก่อสร้างซึ่งสอดคล้องตาม
หลักของปรัชญาเศรษฐกิจพอเพียงที่มีอิทธิพลต่อการสร้างเสริมคุณภาพชีวิตของประชาชน**

**The relationship between groups of factors for assessing the development of
construction projects in accordance with the Sufficiency Economy Philosophy
influencing people's quality of life enhancement**

นิชภา จันดีมา* ปิยนุช เวทย์วิวรรณ และ สุธาริน สถาปัตตานนท์

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

E-mail: miu.nichapa@gmail.com, fengpyv.ku.ac.th fengsrp@ku.ac.th

* ผู้ประพันธ์บรรณกิจ (corresponding author)



บทคัดย่อ

บทความฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของกลุ่มปัจจัยในการพัฒนาโครงการก่อสร้างที่สอดคล้องตามหลักปรัชญาของเศรษฐกิจพอเพียงที่มีอิทธิพลต่อการสร้างเสริมคุณภาพชีวิตของประชาชนที่สอดคล้องไปตามหลักของเป้าหมายการพัฒนาประเทศที่ยั่งยืน 17 ประการ (SDGs17) ดำเนินการวิจัยเชิงปริมาณ ด้วยการเก็บข้อมูลแบบลิเคิร์ต 5 ระดับ จากวิศวกรที่ปฏิบัติงานเกี่ยวข้องกับโครงการก่อสร้างในประเทศไทย และมีประสบการณ์การทำงานมากกว่า 5 ปี ทั้งในหน่วยงานภาครัฐ ภาคเอกชน และรัฐวิสาหกิจ จำนวน 138 คน วิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติด้วยวิธีการถดถอยเชิงซ้อน (Multiple Regression Analysis) โดยใช้กลุ่มปัจจัยที่ประกอบด้วย ตัวแปรอิสระ 7 กลุ่มปัจจัย และตัวแปรตาม 4 กลุ่มปัจจัย ผลการวิจัยพบว่า มีเพียง 5 กลุ่มปัจจัย ที่มีความสัมพันธ์ทางตรงต่อการสร้างเสริมคุณภาพชีวิตของประชาชน ได้แก่ การมีส่วนร่วมของผู้เกี่ยวข้องและผู้ด้อยโอกาส การพิจารณาความจำเป็นและความเหมาะสมทางเศรษฐกิจ การพิจารณาลดผลกระทบจากโครงการ การพิจารณาอย่างรอบด้านเพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุด และการต่อยอดการพัฒนาสู่ชุมชนอย่างยั่งยืน และมีกลุ่มปัจจัยที่เหลืออีก 2 กลุ่มปัจจัยที่ไม่มีความสัมพันธ์ทางตรงต่อการสร้างเสริมคุณภาพชีวิตของประชาชน ได้แก่ การรวบรวมข้อมูลอย่างเป็นระบบและพัฒนาทางเลือกที่เป็นไปได้ทั้งหมด และการทำงานเป็นทีมอย่างมีจริยธรรม ซึ่ง 2 กลุ่มปัจจัยนี้จะนำไปสู่ความสัมพันธ์ที่ต้องอาศัยตัวแปรส่งผ่าน (Mediator variable) ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีความสัมพันธ์ของหลักปรัชญาของเศรษฐกิจพอเพียง โดยความสัมพันธ์ที่สรุปได้จากการศึกษาครั้งนี้สามารถนำไปวิเคราะห์ในงานวิจัยต่อไปได้ เพื่อให้การพัฒนาโครงการก่อสร้างสามารถดำเนินการไปได้อย่างมีประสิทธิภาพ และสอดคล้องไปตามหลักของปรัชญาของเศรษฐกิจพอเพียง ซึ่งจะนำไปสู่ความยั่งยืนในระยะยาว ส่งผลถึงประชาชนในประเทศที่จะสามารถใช้ประโยชน์จากโครงการที่พัฒนาขึ้นได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ และได้รับประโยชน์สูงสุดจากการพัฒนาโครงการก่อสร้างตามการขยายตัวของเมืองในอนาคต



คำสำคัญ: การพัฒนาโครงการก่อสร้าง; ปรัชญาของเศรษฐกิจพอเพียง; วิธีการถดถอยเชิงซ้อน



Abstract

The purpose of this article is to study the relationship of a group of factors in the development of a construction project in accordance with the philosophy of sufficiency economy influencing on enhancing people's quality of life in accordance with the Sustainable Development Goal 17 (SDG17). The quantitative research was conducted by collecting data with a Likert scale at 5 levels from 138 engineers working on construction projects with over 5 years of work experience in public sectors, private sectors, and state enterprises. Then statistical data were analyzed by multiple regression analysis using a group of factors consisting of 7 independent variables and 4 dependent variables. The result found that there were only 5 groups of factors directly related to enhancing people's quality of life and the remaining two groups of factors were not directly related to enhancing people's quality of life. These two groups of factors will lead to a relationship that relies on the mediator variable, which is in accordance with the theory of the relationship of the sufficiency economy philosophy. The relationship concluded from this study can be analyzed in further research. This will enable the development of construction projects to proceed efficiently and in accordance with the sufficiency economy philosophy which will lead to long-term sustainability. As a result, the people in the country will be able to take full advantage of the developed projects and get the most benefit from the development of construction projects according to future urban expansion.

Keywords:

Construction project development; Sufficiency Economy Philosophy; Multiple regression method

1. บทนำ

โครงการโครงสร้างพื้นฐาน หมายถึง โครงการ
สาธารณะประเภทหนึ่งที่มีนโยบายของรัฐบาลมีบทบาท
สำคัญที่จะมีอิทธิพลต่อผลกระทบของโครงการต่อ
การพัฒนาเศรษฐกิจและความต้องการทางสังคม

โครงสร้างพื้นฐานครอบคลุมบริการต่าง ๆ ตั้งแต่ระบบ
สาธารณูปโภค เช่น ไฟฟ้า โทรคมนาคม น้ำประปา
สุขาภิบาลและท่อน้ำทิ้ง การรวบรวมและกำจัด
ขยะมูลฝอย และท่อส่งก๊าซ ไปจนถึงงานสาธารณะ

เช่น ถนน เขื่อนและคลอง รถไฟ ท่าเรือขนส่งในเมือง
ท่าเรือและทางน้ำ และสนามบิน [21] อุตสาหกรรม
ก่อสร้างซึ่งมีความสำคัญต่อการพัฒนาโครงสร้าง
พื้นฐานที่จำเป็นสำหรับการพัฒนาทั้งทางด้านเศรษฐกิจ
และสังคมของทุกประเทศ โดยเฉพาะอย่างยิ่งใน
ประเทศกำลังพัฒนาอย่างประเทศไทย อย่างไรก็ตาม
อุตสาหกรรมก่อสร้างนี้เองที่มีสัดส่วนการใช้พลังงาน
และทรัพยากรธรรมชาติสูงที่สุดเมื่อเทียบกับทุก
อุตสาหกรรม [1] ดังนั้น ในประเทศไทยการจัดตั้ง
พัฒนา และดูแลโครงสร้างพื้นฐานเป็นสิ่งสำคัญยิ่ง
ต่อการพัฒนาคุณภาพชีวิตของประชาชน และ
โครงสร้างพื้นฐานนั้นยังเป็นพื้นฐานต่อการพัฒนา
เมืองและเชื่อมต่อการพัฒนานี้สู่ชนบท ด้วยศักยภาพ
ของโครงสร้างพื้นฐาน ประชาชนจะสามารถทำงาน
หรือทำกิจกรรมอย่างมีประสิทธิภาพเพื่อการสร้าง
รายได้เลี้ยงตนเอง ซึ่งนอกจากจะเป็นการลดอัตรา
การว่างงานแล้ว โครงสร้างพื้นฐานยังช่วยสนับสนุน
การพึ่งพาตนเองและนำไปสู่การพัฒนาเศรษฐกิจ
ของชาติอีกด้วย [3] และจากการศึกษาของสำนักงาน
สภาพัฒนาการเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติในช่วง
ปี 2009-2018 มูลค่าการลงทุนก่อสร้างมีสัดส่วน
เฉลี่ยร้อยละ 8.1 ของผลิตภัณฑ์มวลรวมในประเทศ
(Gross Domestic Product: GDP) โดยส่วนใหญ่
เป็นโครงการลงทุนโครงสร้างพื้นฐานของภาครัฐ
คิดเป็นสัดส่วนเกือบ 80% ของมูลค่าก่อสร้างงาน
ภาครัฐทั้งหมด [14] เพื่อเร่งให้ประเทศมีการเติบโต
ทางเศรษฐกิจอย่างต่อเนื่อง และคำนึงถึงผลกำไร
เป็นสำคัญ ประเทศต้องพัฒนาหลายเรื่องพร้อมกัน
เพื่อการพัฒนาประเทศแบบก้าวกระโดด ส่งผลให้

เกิดความไม่สมดุลทั้งทางด้านเศรษฐกิจ สังคม และ
สิ่งแวดล้อม [23] ดังเช่นตัวอย่างการเกิดวิกฤติเศรษฐกิจ
ในปี 2540 และพระบาทสมเด็จพระปรมินทรมหา
ภูมิพลอดุลยเดช เป็นพระมหากษัตริย์ไทย รัชกาล
ที่ 9 ได้ทรงเมตตาพระราชทานแนวคิดปรัชญา
เศรษฐกิจพอเพียงเพิ่มในแผนพัฒนาเศรษฐกิจและ
สังคมแห่งชาติ ซึ่งมีความสำคัญในการพัฒนาประเทศ
โดยมีเป้าหมายที่ยั่งยืนในระยะยาว [19] ปรัชญา
ของเศรษฐกิจพอเพียงเป็นทั้งหลักคิดและหลักปฏิบัติ
ที่เป็นประโยชน์ต่อการดำรงชีวิตของประชาชนทุก
ระดับ รวมทั้งภาครัฐและหน่วยงานต่างๆ ก็สามารถ
นำปรัชญานี้ไปประยุกต์และใช้ในการบริหารและ
พัฒนาประเทศได้อย่างกว้างขวาง [10] ซึ่งถูกนำไป
ประยุกต์ใช้ในการดำเนินชีวิต การทำงาน และได้รับ
รางวัลการประกวดผลงานตามแนวคิดปรัชญาเศรษฐกิจ
พอเพียงมาจนถึงปัจจุบัน [14] จึงเห็นความสำคัญ
ที่จะนำแนวคิดปรัชญาเศรษฐกิจพอเพียง มาประยุกต์
ใช้ในอุตสาหกรรมก่อสร้าง โดยใช้กรอบของหลัก
ปรัชญาเศรษฐกิจพอเพียง ประกอบด้วย 3 องค์ประกอบ
หลักและสองเงื่อนไขพื้นฐาน [11] โดยองค์ประกอบ
หลักทั้ง 3 ประกอบไปด้วย ความพอประมาณ ความ
มีเหตุผล และภูมิคุ้มกันในตัว ในส่วนของเงื่อนไขพื้น
ฐานที่จะทำให้บรรลุความพอเพียงได้แก่ ความรู้ และ
คุณธรรม โดยเป็นการประยุกต์จากรูปแบบความสัมพันธ์
ตามหลักของปรัชญาเศรษฐกิจพอเพียง [2] วิจัยนี้
จึงมีวัตถุประสงค์ที่จะศึกษาความสัมพันธ์ของตัว
ชี้วัดสำหรับประเมินการพัฒนาโครงการก่อสร้างซึ่ง
สอดคล้องตามหลักของปรัชญาเศรษฐกิจพอเพียง
ของโครงการก่อสร้างในประเทศไทยที่มีอิทธิพล

กับการเสริมสร้างคุณภาพชีวิตของประชาชนตามเป้าหมาย SDGs 17 [4], [5], [22] เพื่อให้หน่วยงานมีขั้นตอนการตัดสินใจที่ดีขึ้น มีการจัดทางงบประมาณสนับสนุนโครงการอย่างเหมาะสมและเป็นไปตามลำดับความสำคัญ ตรงตามความต้องการของประชาชนอย่างแท้จริง มีการพิจารณาใช้งบประมาณอย่างมีประสิทธิภาพ และมุ่งเน้นที่จะสร้างองค์ความรู้ในอุตสาหกรรมก่อสร้างไทยให้มีภูมิคุ้มกันที่ดี ส่งผลให้เกิดผลลัพธ์ที่ยั่งยืนในระยะยาวสำหรับการพัฒนาโครงการก่อสร้างของประเทศไทยในอนาคตต่อไป

2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

จะใช้การวิเคราะห์ทางสถิติด้วยวิธีการถดถอยเชิงซ้อน เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตามและตัวแปรอิสระ โดยใช้แบบสอบถามทั้งหมด 138 ชุด แบบมาตราส่วนลิเคิร์ต 5 ระดับ ข้อคำถามจำนวน 59 ข้อ ใช้วิธีการสัมภาษณ์เชิงลึก จากกลุ่มตัวอย่างวิศวกรที่มีประสบการณ์การทำงานมากกว่า 5 ปีขึ้นไป ในองค์กรภาครัฐ ภาคเอกชน และรัฐวิสาหกิจ ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ข้อมูลรายละเอียดกลุ่มตัวอย่างจำนวน 138 คน

กลุ่มตัวอย่าง	ประเภทหน่วยงาน	ประสบการณ์การทำงาน (ปี)	จำนวน
1	ภาครัฐ	> 5	73
2	ภาคเอกชน	> 5	33
3	รัฐวิสาหกิจ	> 5	32

3. ผลการศึกษา

การศึกษาความสัมพันธ์ของปัจจัยที่เป็นตัวชี้วัดสำหรับประเมินการพัฒนาโครงการก่อสร้างซึ่งสอดคล้องตามหลักของปรัชญาเศรษฐกิจพอเพียง การทบทวนวรรณกรรมสามารถรวบรวมตัวชี้วัดได้ทั้งหมด 59 ปัจจัย ซึ่งผู้วิจัยสามารถแบ่งกลุ่มปัจจัยด้วยวิธีการวิเคราะห์กลุ่มปัจจัย (Factor Analysis) ได้ทั้งหมด 11 กลุ่มปัจจัย โดยแบ่ง 7 กลุ่มปัจจัยแรก ซึ่งเป็นกลุ่มปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาโครงการก่อสร้างที่สอดคล้องตามหลักปรัชญาของเศรษฐกิจ

พอเพียง ประกอบไปด้วย กลุ่มปัจจัยที่ 1 การมีส่วนร่วมของผู้เกี่ยวข้องและผู้ด้อยโอกาส (X1) กลุ่มปัจจัยที่ 2 การพิจารณาความจำเป็นและความเหมาะสมทางเศรษฐกิจ (X2) กลุ่มปัจจัยที่ 3 การพิจารณาผลกระทบจากโครงการ (X3) กลุ่มปัจจัยที่ 4 การพิจารณาอย่างรอบด้านเพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุด (X4) กลุ่มปัจจัยที่ 5 การต่อยอดการพัฒนาสู่ชุมชนอย่างยั่งยืน (X5) กลุ่มปัจจัยที่ 6 การรวบรวมข้อมูลอย่างเป็นระบบและพัฒนาทางเลือกที่เป็นไปได้

ทั้งหมด (X6) กลุ่มปัจจัยที่ 7 การทำงานเป็นทีมอย่าง
มีจริยธรรม (X7) ดังแสดงในตารางที่ 2 และแบ่ง 4
กลุ่มปัจจัยสุดท้าย ซึ่งเป็นกลุ่มปัจจัยที่แสดงให้เหิน
ว่าโครงการก่อสร้างที่มีส่วนทำให้เกิดการสร้างเสริม
คุณภาพชีวิตของประชาชน ได้แก่ กลุ่มปัจจัยที่ 8
คุณภาพชีวิตและสังคมที่ยั่งยืน (Y1) กลุ่มปัจจัยที่ 9
การพึ่งพาตัวเองของชุมชน (Y2) กลุ่มปัจจัยที่ 10
สิ่งแวดล้อมที่ยั่งยืน (Y3) และกลุ่มปัจจัยที่ 11
เศรษฐกิจ และเมืองที่ยั่งยืน (Y4) ดังแสดงในตาราง
ที่ 3

ตารางที่ 2 ปัจจัยที่เป็นตัวชี้วัดสำหรับประเมินการพัฒนาโครงการก่อสร้างซึ่งสอดคล้องตามหลักของ ปรัชญาเศรษฐกิจพอเพียง 7 กลุ่มปัจจัย

items		Loading	Mean
การมีส่วนร่วมของผู้เกี่ยวข้องและผู้ด้อยโอกาส (X1)			4.0766
X1.1	ไม่ขัดต่อกฎหมายของประเทศและท้องถิ่น ปฏิบัติตามกติกา รักษาระเบียบ วินัย กฎข้อบังคับ	0.368	4.5870
X1.2	สอดคล้องกับแผนพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ หรือ ยุทธศาสตร์ชาติ	0.635	4.4710
X1.3	ก่อนที่จะออกแบบพัฒนาเข้าพูดคุยรับฟังปัญหา ความเดือดร้อน ของประชาชนทุกภาคส่วน	0.825	4.1232
X1.4	คำนึงถึงความถูกต้องเป็นธรรม เกิดประโยชน์กับประเทศชาติ และประชาชน	0.813	3.9928
X1.5	ไม่เอาประโยชน์/ความสะดวกของผู้พัฒนาโครงการเป็นใหญ่ เต็มใจเสียสละเพื่อส่วนรวม	0.662	3.9348
X1.6	พูดคุยแลกเปลี่ยนความรู้ประสบการณ์ภายในทีม นักวิชาการ และชาวบ้านในพื้นที่	0.829	3.8261
X1.7	ร่วมกันตัดสินใจเลือกแนวทางในการแก้ไขปัญหา ให้ชาวบ้านได้มีส่วนร่วมในการประชุม	0.429	3.6014
การพิจารณาความจำเป็นและความเหมาะสมทางเศรษฐกิจ (X2)			3.6536
X2.1	ออกแบบก่อสร้าง บริหารจัดการ บำรุงรักษาได้โดยคนภายในหน่วยงาน หรือคนไทย	0.437	4.1812
X2.2	แก้ไขปัญหาความเดือดร้อนที่เป็นภัยอันตรายต่อชีวิตและทรัพย์สินของคนในพื้นที่	0.791	3.9783
X2.3	ใช้งบประมาณอย่างประหยัด ไม่กู้ยืม สร้างหนี้จนเกินกำลัง โดยอาจแบ่งโครงการเป็นระยะๆ	0.769	3.7899
X2.4	ยกระดับคุณภาพชีวิต เพิ่มศักยภาพและโอกาสในการพัฒนา ในชุมชน สังคม และประเทศชาติ	0.674	3.7101
X2.5	ออกแบบพัฒนาให้สอดคล้องกับวิถีชีวิตความเป็นอยู่ตามวัฒนธรรมและประเพณีของชุมชน	0.441	3.6957
X2.6	คำนึงถึงผลกระทบด้านเศรษฐกิจที่จะเกิดขึ้นกับประชาชนในพื้นที่พัฒนาอย่างเหมาะสม	0.565	3.6304
X2.7	เลือกใช้วัสดุและเทคโนโลยีที่พัฒนาขึ้นในประเทศ หรือบัญชีนวัตกรรมไทย	0.372	3.6087
X2.8	ออกแบบพัฒนาให้เหมาะสมกับเศรษฐกิจในพื้นที่	0.471	3.3768
X2.9	คำนึงถึงการใช้แรงงาน เพื่อให้เกิดการจ้างงานและเพื่อพัฒนานคน ลดเครื่องจักร	0.675	3.3333
X2.10	แก้ไขปัญหาความเดือดร้อนในการประกอบอาชีพหากิน	0.866	3.2319
การพิจารณาผลกระทบจากโครงการ (X3)			4.2681
X3.1	ไม่บิดเบือนข้อเท็จจริงกับประชาชน ไม่ปกปิดจุดประสงค์ของโครงการ ไม่มั่วง่าย	0.707	4.4130
X3.2	คำนึงถึงผู้ที่ได้รับผลกระทบ ช่วยเหลือดูแลให้ได้รับการชดเชยที่เป็นธรรม	0.835	4.2391
X3.3	มีความตั้งใจประชาสัมพันธ์ถึงโครงการที่จะพัฒนาขึ้น ให้ทราบอย่างต่อเนื่องและจริงใจ	0.809	4.2319
X3.4	มีความซื่อสัตย์สุจริตในการออกแบบพัฒนา มีความบริสุทธิ์ใจ ปราศจากอคติต่อประเทศชาติ	0.475	4.1884
การพิจารณาอย่างรอบด้านเพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุด (X4)			4.0664
X4.1	มีการจัดทำแผนการบริหารจัดการโครงการ เพื่อให้สามารถใช้งานได้จริงตามวัตถุประสงค์	0.52	4.2609
X4.2	มีการพิจารณาด้านต้นทุนตลอดอายุของโครงการ (Whole-Life Cost)	0.785	4.1957
X4.3	ออกแบบให้สอดคล้องกับสภาพแวดล้อม ตามข้อมูลลักษณะทางกายภาพของพื้นที่ภูมิประเทศ	0.691	4.1232
X4.4	สนับสนุนให้มีการพัฒนากาลังคนให้มีความรู้ความสามารถและทักษะต่างๆ ที่จำเป็น	0.57	4.0797
X4.5	พิจารณาลดรายจ่าย เพื่อให้เกิดความคุ้มค่า (Value engineering)	0.8	3.9783
X4.6	ออกแบบให้มีการต่อขยายโครงการ หรือการปรับโครงการไปใช้งานอื่นในอนาคต	0.583	3.7609



การต่อยอดการพัฒนาสู่ชุมชนอย่างยั่งยืน (X5)			3.2246
X5.1	คำนึงถึงผลกระทบที่มีต่อสิ่งแวดล้อม หลีกเลี่ยงการทำลายทรัพยากรธรรมชาติโดยไม่จำเป็น	0.664	3.6087
X5.2	ให้องค์กรส่วนท้องถิ่น หรือชุมชนได้มีส่วนร่วม ในการดูแลร่วมกับหน่วยงานที่รับผิดชอบ	0.675	3.3188
X5.3	โครงการแก้ปัญหาหนึ่ง และตอบสนองความต้องการอื่นๆของชุมชนไปพร้อมๆกัน	0.763	3.2246
X5.4	พัฒนาองค์ความรู้เกี่ยวกับโครงการให้กับชุมชนในท้องถิ่น เพื่อให้เข้าใจ/ต่อยอดความรู้ได้	0.744	2.7464
การรวบรวมข้อมูลอย่างเป็นระบบและพัฒนาทางเลือกที่เป็นไปได้ทั้งหมด (X6)			4.1413
X6.1	สำรวจพื้นที่ที่จะพัฒนาโครงการให้รอบด้าน เฝ้าสังเกต เก็บข้อมูลโดยละเอียดในทุกมิติ	0.637	4.3696
X6.2	มีความตั้งใจที่จะรับฟัง และประสานข้อมูลอันเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาโครงการ	0.527	4.1812
X6.3	พัฒนาทางเลือกในการแก้ไขปัญหาให้รอบด้าน เน้นการใช้องค์ความรู้ที่เรียบง่าย ไม่ซับซ้อน	0.69	4.0290
X6.4	รับฟังและบันทึกแนวทางในการแก้ไขปัญหาจากทุกภาคส่วนอย่างเป็นระบบ	0.721	3.9855
การทำงานเป็นทีมอย่างมีจริยธรรม (X7)			4.1860
X7.1	ออกแบบพัฒนาโครงการอย่างเต็มกำลังความสามารถ ไม่ย่อท้อต่อปัญหาและอุปสรรค	0.573	4.3261
X7.2	ทำงานเป็นทีม ช่วยกันคิดแก้ปัญหา ด้วยความสามัคคี ไม่เพียงพาดูหน้าที่ของตนเอง	0.826	4.2464
X7.3	โครงการพัฒนาขึ้นด้วยความเคารพในความรู้ ความคิด ประสบการณ์ของผู้ที่เกี่ยวข้อง	0.479	3.9855

ตารางที่ 3 ตารางแสดงกลุ่มปัจจัยที่แสดงให้เห็นถึงโครงการสิ่งแวดล้อมสรรค์สร้างมีส่วนทำให้เกิดประโยชน์อย่างยั่งยืน ตอบสนองความต้องการ และสร้างเสริมคุณภาพชีวิตของประชาชน 4 กลุ่ม

items	Loading	Mean
คุณภาพชีวิตและสังคมที่ยั่งยืน (Y1) : SDG 3, 4, 8, 11		
Y1.1	ช่วยสร้างความปลอดภัยในการดำเนินชีวิตประจำวันให้ประชาชนในชุมชน มากยิ่งขึ้น	0.571 4.0507
Y1.2	ช่วยให้คนในชุมชนสามารถเข้าถึงบริการสาธารณะได้อย่างเหมาะสม ปลอดภัย และมีคุณภาพ	0.713 3.9783
Y1.3	ช่วยให้ประชาชนเข้าถึงระบบคมนาคมขนส่งที่มีความปลอดภัย ในราคาที่เหมาะสม	0.682 3.6594
Y1.4	ช่วยพัฒนา และส่งเสริมสถานที่แหล่งท่องเที่ยววัฒนธรรม	0.525 3.3551
Y1.5	ช่วยรักษา ลดการเสื่อมโทรมของที่อยู่อาศัย ให้ดำรงชีพได้อย่างปลอดภัย ตามสภาพเศรษฐกิจ	0.489 3.2246
Y1.6	ช่วยให้คนในชุมชนเข้าถึงแหล่งความรู้ที่สนับสนุนส่งเสริมให้พึ่งพาตนเองได้	0.651 3.1014
Y1.7	ช่วยให้สุขภาพแข็งแรงขึ้น พึ่งพาตนเองได้ ลดโรคภัยไข้เจ็บ คุณภาพชีวิตที่ดี ไม่พึ่งพาผู้อื่น	0.459 3.0797
Y1.8	ช่วยให้เข้าถึงอาคาร สถานศึกษา ห้องสมุด ศูนย์การเรียนรู้ ที่ปลอดภัย มีคุณภาพอย่างทั่วถึง	0.665 3.0725
การพึ่งพาตัวเองของชุมชน (Y2) : SDG 1, 2, 3, 4, 8, 10, 13		
Y2.1	ช่วยขับเคลื่อนเศรษฐกิจ ส่งเสริมอาชีพ เพิ่มรายได้ที่เหมาะสม มั่นคง ยั่งยืน ในระยะยาว	0.616 3.9710
Y2.2	ช่วยให้มีศักยภาพในการเพิ่มผลผลิตได้อย่างต่อเนื่อง เพียงพอต่อชุมชนไม่พึ่งพาชุมชนอื่น	0.812 3.2971
Y2.3	ช่วยในการมีส่วนร่วมของชุมชน ให้มีความรู้ในการพัฒนา รักษา และสืบทอดดูแล	0.657 3.2246
Y2.4	ช่วยให้ดำรงชีวิตได้อย่างปกติ พึ่งพาตนเองได้ เมื่อมีเปลี่ยนแปลงที่ไม่ได้วางแผนรองรับไว้	0.816 3.1014
Y2.5	ช่วยให้เข้าถึงอาหารที่ปลอดภัย และมีคุณภาพ	0.573 2.8768
สิ่งแวดล้อมที่ยั่งยืน (Y3) : SDG 7, 11, 12, 14, 15		
Y3.1	ช่วยรักษาแหล่งน้ำ เพื่อให้แหล่งน้ำใช้ในการดำรงชีพ และดำเนินชีวิตได้โดยปกติ	0.806 3.5362
Y3.2	ช่วยลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เพิ่มพื้นที่สีเขียวในพื้นที่สาธารณะ	0.732 3.4710
Y3.3	ช่วยให้การหมุนเวียนทรัพยากรอยู่ในสภาวะสมดุล เพื่อความยั่งยืนในระยะยาว	0.807 3.2174
Y3.4	ช่วยในการเข้าถึงการใช้ พลังงานหมุนเวียน	0.498 2.9493
Y3.5	ช่วยในการลดการเกิดขยะจากโครงการก่อสร้าง เพื่อลดการใช้ทรัพยากรธรรมชาติ	0.627 2.9348
เศรษฐกิจ และเมืองที่ยั่งยืน (Y4) : SDG 8, 9, 11		
Y4.1	ช่วยในการเชื่อมโยงทางเศรษฐกิจ สังคม และสิ่งแวดล้อม ระหว่างเมือง และชนบท	0.837 4.0145
Y4.2	ช่วยยกระดับการพัฒนาเมืองอย่างยั่งยืนทุกมิติ (เศรษฐกิจ สังคม สิ่งแวดล้อม และวัฒนธรรม)	0.757 3.6594
Y4.3	ช่วยปรับปรุงภาคอุตสาหกรรมให้เกิดความยั่งยืน	0.677 3.6449

เมื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกลุ่มปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาโครงการก่อสร้างทั้งหมด 7 กลุ่ม กับกลุ่มปัจจัยที่สร้างเสริมคุณภาพชีวิตของประชาชน 4 กลุ่มปัจจัย ซึ่งวิเคราะห์โดยวิธีการวิเคราะห์

การถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ (Multiple linear regression analysis: MRA) แสดงผลการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่ส่งผลต่อประโยชน์และความยั่งยืนในแต่ละกลุ่ม แสดงได้ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ตารางแสดงผลการวิเคราะห์โดยวิธีการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ (Multiple linear regression analysis: MRA)

Model	Name	Dependent variable	Adjust R square	Predictor (Constant)	Standardized coefficients Beta	t	sig
1	Quality of life/ Sustainable Society	Y1	0.329	X2	0.416	4.990	0.000
				X5	0.239	2.870	0.005
2	Self-reliance/ Resilience Community	Y2	0.442	X2	0.536	7.213	0.000
				X1	0.214	2.881	0.005
3	Sustainable environment (Biosphere)	Y3	0.382	X5	0.451	5.780	0.000
				X4	0.276	3.627	0.000
				X3	0.260	3.481	0.001
				X1	-0.251	-3.172	0.002
4	Sustainable Economic (Connecting & Smart City)	Y4	0.295	X4	0.397	5.284	0.000
				X1	0.283	3.759	0.000

จากตารางที่ 4 ผลของการวิเคราะห์การถดถอยเชิงซ้อน ผู้วิจัยใช้ 4 รูปแบบความสัมพันธ์ ดังนี้

ความสัมพันธ์ของรูปแบบที่ 1 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระที่มีอิทธิพลต่อคุณภาพชีวิตและสังคมที่ยั่งยืน พบว่าการพิจารณาความจำเป็นและความเหมาะสมทางเศรษฐกิจมีอิทธิพลต่อคุณภาพชีวิตและสังคมที่ยั่งยืนมากที่สุด เนื่องจากความเหมาะสมทางเศรษฐกิจมุ่งเน้นการพิจารณาแก้ไขปัญหาความเดือดร้อนในการประกอบอาชีพทำกินให้ประชาชนประกอบอาชีพและต่อยอดรายได้เพื่อให้สามารถพึ่งพาตนเองได้ เช่น มีการจัดสรรน้ำสำหรับ

การเพาะปลูกในพื้นที่เกษตรกรรม เพิ่มมูลค่าผลผลิตหรือผลิตภัณฑ์ให้กับชุมชนโดยการนำผลิตภัณฑ์เข้ามาใช้งานและนำมาขายในธุรกิจ และมุ่งเน้นการพิจารณาแก้ไขปัญหาความเดือดร้อนที่เป็นภัยอันตรายต่อชีวิตและทรัพย์สิน เพื่อให้เกิดความมั่นใจต่อการใช้ชีวิตประจำวันของประชาชน เช่น การติดตั้งไฟส่องสว่างในพื้นที่ที่ต้องใช้ในการเดินทางสัญจร การออกแบบก่อสร้างเพื่อรองรับแผ่นดินไหว มีอิทธิพลมากที่สุด ($\beta = 0.416$) รองลงมาคือ การต่อยอดการพัฒนาสู่ชุมชนอย่างยั่งยืน พบว่าโครงการต้องสามารถแก้ปัญหาหนึ่ง และตอบสนองความต้องการอื่นได้



อย่างเอนกประสงค์ เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด เช่น การสร้างสวนสาธารณะที่เป็นพื้นที่รับน้ำ หรือ การสร้างเขื่อนกั้นน้ำโดยมีพื้นที่ถนนเป็นพื้นที่ใช้สอยที่เป็นประโยชน์ ($\beta = 0.239$) และในรูปแบบที่ 1 การพิจารณาความจำเป็นและความเหมาะสมทางเศรษฐกิจ และการต่อยอดการพัฒนาสู่ชุมชนอย่างยั่งยืน มีประสิทธิภาพในมิติพิพัตต่อคุณภาพชีวิตและสังคม ที่ยั่งยืนคิดเป็นร้อยละ 32.9

ความสัมพันธ์ของรูปแบบที่ 2 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระที่มีอิทธิพลต่อการพึ่งพาตัวเองของชุมชน พบว่าการพิจารณาความจำเป็นและความเหมาะสมทางเศรษฐกิจ มีอิทธิพลต่อการพึ่งพาตัวเองของชุมชนมากที่สุด ($\beta = 0.536$) เนื่องจากการออกแบบพัฒนาโครงการอย่างเหมาะสมกับเศรษฐกิจ สอดคล้องไปตามวิถีชีวิตเดิมตามวัฒนธรรม และประเพณี และยกระดับคุณภาพชีวิต เพิ่มศักยภาพ และโอกาสให้กับประชาชนในพื้นที่ รองลงมาคือ การมีส่วนร่วมของผู้เกี่ยวข้องและผู้ด้อยโอกาส พบว่าการพูดคุยรับฟังปัญหาความเดือดร้อนของประชาชนเป็นขั้นตอนสำคัญที่จะช่วยให้ประชาชนมีส่วนร่วม และสามารถบอกความต้องการที่แท้จริง ซึ่งส่งผลให้การพัฒนาโครงการช่วยเหลือความเดือดร้อนนั้นได้ตรงตามความต้องการ ($\beta = 0.214$) และในรูปแบบที่ 2 การพิจารณาความจำเป็นและความเหมาะสมทางเศรษฐกิจ และการมีส่วนร่วมของผู้เกี่ยวข้องและผู้ด้อยโอกาส มีประสิทธิภาพในการทำนายความสัมพันธ์ที่มีต่อการพึ่งพาตัวเองของชุมชนได้ถูกต้อง คิดเป็นร้อยละ 44.2

ความสัมพันธ์ของรูปแบบที่ 3 เป็นความสัมพันธ์

ระหว่างตัวแปรอิสระที่มีอิทธิพลต่อสิ่งแวดล้อมที่ยั่งยืน พบว่าการต่อยอดการพัฒนาสู่ชุมชนอย่างยั่งยืน คือโครงการที่พัฒนาขึ้นสามารถตอบสนองความต้องการของชุมชนได้หลากหลาย เช่น พื้นที่ลาดจอดรถสามารถนำมาจัดเป็นพื้นที่ค้าขายเพื่อเพิ่มรายได้ให้กับชุมชน หน่วยงานที่เกี่ยวข้องกับโครงการส่งบุคลากรเข้าชุมชนเพื่อให้ความรู้แก่ประชาชนเกี่ยวกับโครงการ เพื่อร่วมกันดูแลรักษา และแจ้งหน่วยงานหากมีปัญหา หรือต้องการซ่อมแซม ($\beta = 0.451$) รองลงมาคือ การพิจารณาอย่างรอบด้าน เพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุด พบว่ามีการพิจารณาค่าใช้จ่ายในโครงการตามหลักการของ Value Engineering และการพิจารณาต้นทุนตลอดอายุขัยของโครงการเพื่อใช้ในการออกแบบให้สอดคล้องกับสภาพแวดล้อมตามลักษณะข้อมูลทางกายภาพ เพื่อที่สามารถเลือกวัสดุ และการวางแผนอาคารได้อย่างเหมาะสม เช่น การพิจารณาทิศทางลม ทิศทางของแสง วัสดุที่ช่วยป้องกันความร้อนแต่รับแสงมาใช้ในอาคารได้ เป็นต้น ($\beta = 0.276$) การพิจารณาดผลกระทบจากโครงการ พบว่าการพัฒนาโครงการจะต้องคำนึงถึงผู้ที่ได้รับผลกระทบหากมีความเสียหายที่เกิดจากการพัฒนาโครงการ จะมีการชดเชยความเสียหายให้ตามความจริง และมีการแสดงข้อมูลเกี่ยวกับการก่อสร้างให้คนในพื้นที่รับทราบอย่างต่อเนื่อง ($\beta = 0.260$) และการมีส่วนร่วมของผู้เกี่ยวข้องและผู้ด้อยโอกาส พบว่าก่อนออกแบบพัฒนาโครงการได้ให้ประชาชนเข้าร่วมชี้แจงปัญหาความเดือดร้อน และร่วมตัดสินใจทางเลือกในการแก้ไขปัญหา ซึ่งควรสอดคล้องไปตามกฎระเบียบข้อบังคับ และกฎหมาย ซึ่งรวมถึง

ข้อกำหนดเกี่ยวกับสิ่งแวดล้อมที่ต้องปฏิบัติตาม
เคร่งครัดตามการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อม
($\beta = -0.251$) และในรูปแบบที่ 3 การพิจารณาผล
กระทบจากโครงการ และการมีส่วนร่วมของ
ผู้เกี่ยวข้องและผู้ด้อยโอกาส คิดเป็นร้อยละ 38.2

ความสัมพันธ์ของรูปแบบที่ 4 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระที่มีอิทธิพลต่อเศรษฐกิจและเมืองที่ยั่งยืน พบว่าการพิจารณาอย่างรอบด้านเพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดนั้นคือ หากพิจารณาด้านเศรษฐกิจควรที่จะมีการจัดทำแผนการบริหารจัดการโครงการ เพื่อให้สามารถใช้จริงตามวัตถุประสงค์ได้ โดยมุ่งเน้นการลดรายจ่าย เพื่อให้เกิดความคุ้มค่า รวมถึงพิจารณาด้านทุนตลอดอายุขัยของโครงการ เพื่อให้โครงการใช้งบประมาณน้อยที่สุดแต่เกิดประโยชน์และความคุ้มค่าต่อประชาชนมากที่สุด และควรมีการออกแบบเพื่อการต่อขยายโครงการให้สอดคล้องไปกับการเติบโตของเมืองในอนาคต เช่น รถไฟฟ้าที่มีการเตรียมโครงสร้างเพื่อให้สามารถขยายเส้นทางเดินรถในอนาคตได้ การสร้างถนนที่วิเคราะห์ให้สอดคล้องไปความเจริญทางเศรษฐกิจในพื้นที่ ไม่สร้างถนนขนาดใหญ่เกินความจำเป็น หรือสร้างถนนเล็กจนไม่สามารถรองรับการใช้งานในพื้นที่ ส่งผลให้ต้องใช้งบประมาณจำนวนมากในการขยายถนน และยังกระทบกับผู้อยู่อาศัยภายในพื้นที่ก่อสร้างที่อาจจะถูกเวนคืนที่ดิน เป็นต้น ($\beta = 0.397$) แสดงว่ามีอิทธิพลต่อเศรษฐกิจ และเมืองที่ยั่งยืนมากที่สุด รองลงมาคือ การมีส่วนร่วมของผู้เกี่ยวข้องและผู้ด้อยโอกาส พบว่าการให้ออกาสประชาชนได้มีส่วนร่วมในการพัฒนาโครงการ ทำให้โครงการที่พัฒนาขึ้น

เกิดประโยชน์ต่อประชาชนมากที่สุด เนื่องจากการพัฒนาโครงการสามารถตอบสนองความเดือดร้อนที่แท้จริงของประชาชนได้ ส่งผลให้โครงการที่พัฒนาขึ้น ไม่ถูกทิ้งร้าง ซึ่งเป็นการใช้งบประมาณอย่างสิ้นเปลืองดังที่ผ่านมา ($\beta = 0.283$) และในรูปแบบที่ 4 การพิจารณาอย่างรอบด้านเพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุด และการมีส่วนร่วมของผู้เกี่ยวข้องและผู้ด้อยโอกาส คิดเป็นร้อยละ 29.5

4. วิเคราะห์ผลและสรุปผล

การศึกษาปัจจัยในการพัฒนาโครงการก่อสร้างที่สอดคล้องตามหลักปรัชญาของเศรษฐกิจพอเพียงที่มีอิทธิพลต่อการสร้างเสริมคุณภาพชีวิตของประชาชน มีกลุ่มปัจจัยในการพัฒนาโครงการก่อสร้างทั้งหมด 7 กลุ่มปัจจัย ที่มีอิทธิพลต่อการสร้างเสริมคุณภาพชีวิตของประชาชน ซึ่งมีกลุ่มปัจจัยทั้งหมด 4 กลุ่มปัจจัย พบว่า ปัจจัยในการพัฒนาโครงการก่อสร้างที่สอดคล้องตามหลักปรัชญาของเศรษฐกิจพอเพียงที่มีอิทธิพลต่อการสร้างเสริมคุณภาพชีวิตของประชาชน มีเพียง 5 กลุ่มปัจจัย ที่มีความสัมพันธ์ทางตรง ได้แก่ การมีส่วนร่วมของผู้เกี่ยวข้องและผู้ด้อยโอกาส การพิจารณาความจำเป็นและความเหมาะสมทางเศรษฐกิจ การพิจารณาลดผลกระทบจากโครงการ การพิจารณาอย่างรอบด้านเพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุด และการต่อยอดการพัฒนาสู่ชุมชนอย่างยั่งยืน

และมียังกลุ่มปัจจัยที่เหลืออีก 2 กลุ่มปัจจัยในการพัฒนาโครงการก่อสร้างที่สอดคล้องตามหลักปรัชญาของเศรษฐกิจพอเพียงที่ไม่มีความสัมพันธ์ทางตรงต่อการสร้างเสริมคุณภาพชีวิตของประชาชน

ได้แก่ การรวบรวมข้อมูลอย่างเป็นระบบและพัฒนาทางเลือกที่เป็นไปได้ทั้งหมด และการทำงานเป็นทีมอย่างมีจริยธรรม เนื่องจากกลุ่มปัจจัยทั้งสองนี้เป็นกลุ่มปัจจัยเริ่มต้น ที่ต้องอาศัยความสัมพันธ์ทางตรง กับกลุ่มปัจจัยทั้ง 5 กลุ่มปัจจัยข้างต้นที่มีอิทธิพลทางตรงต่อการสร้างเสริมคุณภาพชีวิตของประชาชน ซึ่งนำไปสู่ความสัมพันธ์ที่ต้องอาศัยตัวแปรส่งผ่าน (Mediator variable) โดยเป็นไปตามทฤษฎีความสัมพันธ์ของหลักปรัชญาของเศรษฐกิจพอเพียง

อย่างไรก็ตามทั้ง 2 กลุ่มปัจจัยที่ไม่มีความสัมพันธ์ทางตรงต่อการสร้างเสริมคุณภาพชีวิตของประชาชน คือ การรวบรวมข้อมูลอย่างเป็นระบบและพัฒนาทางเลือกที่เป็นไปได้ทั้งหมด ซึ่งการวิเคราะห์กลุ่มปัจจัยนี้ผู้วิจัย ได้รวบรวมเกี่ยวกับข้อมูลในด้านความรู้ และการวิเคราะห์ทางเลือกตามหลักวิชาการ จัดไว้ในกลุ่มความรู้ตามทฤษฎี [8], [9], [17], [19], [23] และการทำงานเป็นทีมอย่างมีจริยธรรม ซึ่งการวิเคราะห์กลุ่มปัจจัยนี้ได้รวบรวมเกี่ยวกับหลักการทำงานที่มีจริยธรรมต่อประชาชน องค์กร และประเทศชาติ จัดไว้ในกลุ่มคุณธรรมตามทฤษฎี [6], [7], [13], [16], [18]

การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ตามความสัมพันธ์ทางทฤษฎีของหลักปรัชญาของเศรษฐกิจพอเพียง ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ทางตรง สามารถนำไปวิเคราะห์ในงานวิจัยต่อไปได้ที่มีความสัมพันธ์ของกลุ่มตัวแปรที่ซับซ้อนขึ้น ยังจะส่งผลให้ทำให้การพัฒนาโครงการก่อสร้างสามารถดำเนินการไปได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น และสอดคล้องไปตามหลักของปรัชญาของเศรษฐกิจพอเพียง ดังเช่น โครงการทางคูขนานลอยฟ้า

ถนนบรมราชชนนี เป็นสะพานยกระดับ ความยาวประมาณ 13,878 กิโลเมตร เป็นโครงการในพระราชดำริที่เป็นตัวอย่างสำคัญ ซึ่งมีลักษณะการดำเนินโครงการสอดคล้องตามกลุ่มปัจจัยที่ใช้ประเมินความสอดคล้องตามหลักของปรัชญาเศรษฐกิจพอเพียง (X) เป็นโครงการก่อสร้างที่เป็นประโยชน์การดำเนินชีวิตของประชาชนซึ่งเป็นเป้าหมายของความยั่งยืน เนื่องจากช่วยให้การจราจรคล่องตัวขึ้น อีกทั้งยังเชื่อมต่อความเจริญทางด้านเศรษฐกิจ ทำให้ประชาชนมีคุณภาพชีวิต และสังคมที่ยั่งยืนปลอดภัย พึ่งพาตนเองได้ เป็นต้น อย่างไรก็ตาม การปฏิบัติตามความสัมพันธ์ที่ได้จากงานวิจัยนี้ เป็นเพียงแนวทางเลือกหนึ่ง แต่หากปฏิบัติได้จริงจะนำไปสู่ความยั่งยืนตามบริบทของหน่วยงานหรือองค์กรนั้นในอนาคตต่อไป

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] Asif M, Muneer T, and Kelly R (2007). Life cycle assessment: A case study of a dwelling home in Scotland. Journal of Building and Environment, 42(2007), 1391-1394
- [2] Avery, G C & Bergsteiner, H (2016). Practices for Enhancing Resilience and Performance, in Sufficiency Thinking: Thailand's Gift to an Unsustainable World, Avery & Bergsteiner (eds.) (pp. 235-247). Sydney: Allen & Unwin.
- [3] Charoenngam C, Posayanant S, Srivanich S, Orapan Khongmalai O, and Leungbootnak N (2003). KPIs for Infrastructure

Development in Tambol Administration Organization. Damrong Rajanubhab; Office of the Permanent Secretary for Interior Ministry of Interior and Asian Institute of Technology. 1st edition printed at Asian Institute of Technology Klongluang PathumThani.

[4] Fei W, Opoku A, Agyekum K, Oppon J, Ahmed V, Chen C and Lok K (2021). The Critical Role of the Construction Industry in Achieving the Sustainable Development Goals (SDGs): Delivering Projects for the Common Good by Sustainability 2021, 13(16), 9112; <https://doi.org/10.3390/su13169112r>

[5] Goubran S (2019). On the Role of Construction in Achieving the SDGs. Journal of Sustainability Research. J Sustain Res.2019;1:e190020; <https://doi.org/10.20900/jsr20190020>

[6] Harvey P (2012). AN INTRODUCTION TO BUDDHIST ETHICS. Publish by Cambridge University Press June 2012; (pp 8-59), (pp187-238); DOI: <https://doi.org/10.1017/CBO9780511800801>

[7] Harvey P (ed.) (2017). Common Buddhist text: guidance and insight from the Buddha. Mahachulalongkornrajavidyalaya University Press, Bangkok, Thailand.

[8] Horayangkura V, Pimonsathean Y, Weesakul U, Lertpocasombut K, Romratanapun W, Wongsawatgul E, and Klinmalai, S (2007).

“In Search of His Majesty the King’s Underlying Concepts in Royally-Initiated Urban, Community and Architecture Development.” Journal of Architectural/Planning Research and Studies, 5(3), 3-27. <https://doi.org/10.56261/jars.v5i3.169038>

[9] Jibladze G, Romelashvili E, Chkheidze A, Modebadze E, Mukeria M (2021). Assessing Public Participation in Policymaking Process; WeResearch: Tbilisi, Georgia, 2021; (pp. 1–52).

[10] Khaemmani T. (2015). Deciphering the philosophy of sufficiency economy to teach thinking processes: Chulalongkorn University Press.

[11] Marome W (2017). A KNOWLEDGE ASSESSMENT ON SUSTAINABLE CITIES IN THAILAND; Sustainable City. Nakhon Pathom: Industrial Ecology Research and Training Center Faculty of Environment and Mahidol University Resource Center. P 144. ISBN 978-616-443-033-4.

[12] NESDB (2019). NESDB ECONOMIC REPORT(pp. 1-32). https://www.nesdc.go.th/ewt_dl_link.php?nid=8429

[13] Office of the Civil Service Commission (2009). Civil Service Code of Ethics, Royal Gazette, Vol. 126, Special Section 162-4, 73-86.

[14] ORDPB. (2011). Sufficiency Economy Contests 2nd round. Bangkok: Office of the Royal Development Projects Board.



- [15] Pongvichai S. (2008). Computer analysis of statistical data. 19th edition Chulalongkorn University Press.
- [16] Queensland Government (1994). Public Sector Ethic Act 1994, Division 2 – The ethics values, Queensland Legislation.
- [17] Sonet U, Klufallah M, Peters M, and Dixon T (2021). Indicators of the Public Participation Exercise for Designing Public Parks in Malaysia: A Systematic Review. Sustainability 2021, 13(21), 12119; DOI: <https://doi.org/10.3390/su132112119>
- [18] State Services Commission (2005). New Zealand Public service code of conduct, published in pursuant to section 57 of the State Sector Act 1988, Reprint 2005, Crown Copyright, 32.
- [19] Terry L, Thomas N, and Skitmore M (2012). Public participation in infrastructure and construction projects in China: From an EIA-based to a whole-cycle process. Journal of Habitat International 36, 47-56.
- [20] Thailand U. N. (2558). Sustainable Development Goals (SDGs). <https://www.un.or.th/globalgoals/th/the-goals/>.
- [21] The World Bank (1994). World Development Report 1994 Infrastructure for Development, Published by Oxford University Press, Inc.
- [22] United Nations Office for Project Services, (2014). THE SUSTAINABILITY MARKER TO SUPPORT THE PROJECT SELECTION PROCESS: THE UNOPS CASE. Accepted for publication at PMI Global Congress 2014 – North America Phoenix – Arizona – USA – 2014
- [23] Yudelso J (2010). Sustainable Retail Development: New Success Strategies.

ผลกระทบจากอาคารกีดขวางด้านหน้าต่อแรงดันลมที่กระทำต่ออาคารสูง โดยใช้โปรแกรมทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

Interference Effects by the in front obstructing building on Wind Pressure Acting on a Tall Building Using CFD Software

มานพ เจริญยุทธ และ ทรงพล จารุวิศิษฐ์*

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

E-mail: manop_cha@hotmail.com, fengspc@ku.ac.th

* ผู้ประพันธ์บรรณกิจ (corresponding author)



บทคัดย่อ

การวิเคราะห์โครงสร้างภายใต้กระแสลมโดยใช้วิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics ,CFD) เพื่อศึกษาผลกระทบต่อโครงสร้าง เช่น การหาค่าสัมประสิทธิ์ของแรง ค่าสัมประสิทธิ์ของความดัน การเคลื่อนตัวของอาคาร แรงกระทำที่ฐาน (Base Shear & Moment) และความดันที่ผิวรอบอาคาร เป็นต้น มีการศึกษาอย่างกว้างขวางในต่างประเทศ ส่วนในประเทศไทยมักใช้วิธีการทดสอบอุโมงค์ลมซึ่งมีค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูง และการแก้ไขปรับเปลี่ยนแบบจำลองทำได้ยาก งานวิจัยนี้ได้จัดทำขึ้นเพื่อศึกษาผลของแรงลมที่กระทำกับอาคารสูงตามมาตรฐาน CAARC ด้วยการใช้การวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ, CFD, รวมถึงผลตอบสนองในทิศทางลมและทิศตั้งฉากกับลมเพื่อเป็นการตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรม และยังได้ศึกษาผลกระทบจากอาคารกีดขวางต่อแรงดันลมที่กระทำกับอาคารสูงอีกด้วย อีกทั้งพบว่ามีข้อจำกัดทางด้านความสามารถของเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ใช้งาน โดยหากคอมพิวเตอร์มีความสามารถที่สูงขึ้นจะช่วยให้ได้ผลการวิเคราะห์ที่ละเอียดถูกต้องมากขึ้น ในด้านผลการตอบสนองของโครงสร้างพบว่า เมื่อเทียบกับผลจากงานวิจัยก่อนหน้านี้ ค่าสัมประสิทธิ์ความดันรอบอาคารที่ระดับความสูง 2/3 ของอาคารให้ผลคลาดเคลื่อนประมาณ 7 % และค่าสัมประสิทธิ์ของแรงมีความคลาดเคลื่อนประมาณ 11 % ซึ่งถือได้ว่าให้ผลการวิเคราะห์สอดคล้องเป็นอย่างดีทั้งค่าแรงและในด้านพฤติกรรมการเคลื่อนตัวของตัวยอดอาคารในทิศทางตามกระแสลมและทิศทางตั้งฉากกับลม ส่วนการศึกษาผลกระทบจากสิ่งกีดขวางต่อแรงดันลมที่กระทำกับอาคารสูงพบว่า เมื่อมีอาคารมาบังที่ยะห่างการบังไว้หน่วย, $u = x/L$, น้อยกว่า 20 (20 เท่าของขนาดอาคารหลักตามทิศทางลม) ค่าแรงเฉือนที่กระทำต่อฐานอาคาร (Base Shear) จะยิ่งน้อยลง แต่สำหรับโมเมนต์ที่กระทำที่ฐานอาคาร (Base moment) จะมีค่าลดลงเมื่อระยะห่างการบังไว้หน่วย, u , ต่ำกว่า 17



คำสำคัญ: แรงลม; อาคารสูง; พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ; แรงกระทำที่ฐาน; โมเมนต์กระทำที่ฐาน



Abstract

The analysis of wind forces acting on a structure using Computational Fluid Dynamics (CFD) techniques is widely used in many countries to determine force and pressure coefficients, building top displacements, base shear and moment, surface pressure around the building, etc. This research was conducted using the CFD technique to study the wind effects on a tall building model according to the CARRC (Commonwealth Advisory Aeronautical Council) standard, including building responses in the along-wind and across-wind directions, to verify the applied software and analysis results. Additionally, the interference effects of an obstructing building on wind pressure acting on a tall building were studied. However, in Thailand, wind tunnel experiments are typically used to determine wind force acting on a building model, which is complex and requires expensive instruments. Furthermore, the wind tunnel test is not flexible for adjusting the model to study different experimental conditions and parameters. The accuracy of the analysis was verified by comparing the simulated results of a CFD model software with the results from wind tunnel experimental results of previous research. It was found that the pressure and force coefficients at the location of two-thirds height of the building were slightly different from the experimental results, about 7% and 11%, respectively. Nonetheless, the simulation results can be concluded to be in accordance with the vibration at the top of the building in both along-wind and across-wind directions. Regarding the study of interference effects by the obstructing building, it was found that, with the obstruct distance, u , less than 20, the closer the obstructing building was, the smaller the base shear of the main building could be observed. The same interference effect for the base moment of the main building can be observed since the reduced obstructing distance, $u = x/L$, is less than 17. Finally, a manual for performing CFD analysis using CFD commercial software for studying wind effects on a tall building has been prepared for further research. It is noted that the computer's performance is an important factor for the CFD analysis.

With higher computer performance, more accurate simulation results and faster computation can be obtained.

Keywords: Wind load; high-rises building; computational fluid dynamics; base shear; base moment

1. บทนำและการศึกษาวิจัยในอดีต

แรงลมนับว่ามีความสำคัญต่อการออกแบบอาคารสูงเป็นอย่างมาก นอกจากจะก่อให้เกิดหน่วยแรงต่าง ๆ ขึ้นกับส่วนของโครงสร้างแล้วยังก่อให้เกิดการโยกตัวและการสั่นไหวของโครงสร้างได้ การสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นอาจก่อให้เกิดการวิบัติเนื่องจากเกิดพฤติกรรมการสั่นแบบกำทอนที่ความถี่ของการสั่นของอาคารเนื่องจากแรงลมไปสอดคล้องกับความถี่ธรรมชาติของอาคารจนทำให้โครงสร้างเกิดความล้าของวัสดุส่วนโครงสร้าง นอกจากนี้การสั่นของอาคารหากมากเกินไปยังอาจทำให้ผู้ใช้อาคารรู้สึกไม่สบายในการใช้งานอาคารได้ จึงจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องทราบถึงผลกระทบของแรงลมที่กระทำต่อโครงสร้างอาคารเพื่อปรับปรุงทำให้องค์อาคารมีความแข็งแรงและสามารถต้านทานแรงลมที่กระทำต่อโครงสร้างได้ การศึกษาถึงผลกระทบของแรงลมที่กระทำต่ออาคารในประเทศไทย มักใช้การทดสอบอุโมงค์ลมเป็นหลักซึ่งจะมีข้อจำกัดในเรื่องการแก้ไขปรับเปลี่ยนแบบจำลองอาคารและการเปลี่ยนเงื่อนไขสภาพการทดสอบที่ทำได้ยาก ขาดความยืดหยุ่น และมีความใช้จำสูง การคำนวณโดยใช้หลักพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics, CFD) ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ถือเป็นอีกทางเลือก

หนึ่งที่ใช้ทำนายพฤติกรรมตอบสนองของโครงสร้างเมื่อถูกแรงลมกระทำแทนการทดสอบอุโมงค์ลมได้ ทำให้การวิเคราะห์การตอบสนองของอาคารมีความสะดวกรวดเร็วมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการแบบเดิมที่ทำการทดสอบในอุโมงค์ลม และใช้การคำนวณจากสูตรการประมาณอย่างง่าย ซึ่งเป็นผลทางสถิติศาสตร์เป็นหลัก นอกจากนี้ในปัจจุบันมีอาคารสูงต่าง ๆ ถูกสร้างขึ้นมากมาย ซึ่งบางกรณีอาจมีการบดบังจากอาคารสูงข้างเคียง จึงยิ่งทำให้มีความซับซ้อนในการคำนวณหาค่าแรงลมที่กระทำต่ออาคารมากขึ้น ในงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาจำลองอาคารสูงจำนวน 1 อาคารที่บดบังกระแสลมต่ออาคารหลักที่ถูกบดบังด้วยการวิเคราะห์ CFD เพื่อวิเคราะห์แรงกระทำที่ฐานอาคารหลัก (Base shear & moment) และแรงดันลมที่กระทำต่ออาคารหลักที่ความสูงระยะต่าง ๆ

ที่ผ่านมาได้มีการนำพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณมาใช้หาค่าความดันที่รอบผิวอาคาร [1] สมประสิทธิ์ของแรงลมและโมเมนต์สำหรับอาคารเดี่ยวโดยเลือกใช้แบบจำลองความปั่นป่วนขนาดใหญ่ (Large Eddy Simulation (LES)) ซึ่งพบว่าแบบจำลอง LES ให้ผลแรงลมที่กระทำกับตึกสูงเป็นที่น่าพอใจ โดย

การใช้เทคนิค CFD นี้ถือได้ว่าเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสำหรับวิศวกรผู้ออกแบบ ทำให้สามารถประเมินผลกระทบของแรงลมที่กระทำกับอาคารได้อย่างไรก็ตามยังไม่มีการศึกษาเป็นค่าแรงลัพท์กระทำที่ฐานอาคาร (Base shear and moment) ต่อมาได้มีการศึกษาโดยใช้การจำลองขนาดอาคารสูงตามมาตรฐาน CAARC [2-4] อาคารซึ่งมีขนาด ความสูง (H) = 180 เมตร ความยาว (L) = 30 เมตร ความกว้าง (w) = 45 เมตร และใช้การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค CFD โดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วนขนาดใหญ่ (Large Eddy Simulation Dynamic) เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ของแรง ค่าสัมประสิทธิ์ของความดัน การเคลื่อนตัวของอาคาร โดยเทียบผลกับงานวิจัยก่อนหน้าทำการทดสอบในอุโมงค์ลม และที่ใช้การจำลองเชิงตัวเลข พบว่าได้ผลสอดคล้องเป็นอย่างดี

ในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการเปรียบเทียบผลของงานวิจัยในอดีตกับผลการวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้ เพื่อเป็นการตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรม CFD ที่ใช้ และเพื่อศึกษาถึงพฤติกรรมของแรงลมที่เกิดขึ้นด้วย สำหรับกรณีที่มียอดอาคารมาดบังกระแสลม ได้มีการศึกษาผลกระทบของอาคารบดบังที่กระทำต่ออาคารสูง [5, 6] โดยสนใจศึกษาค่าสัมประสิทธิ์ของแรงดันลมที่กระทำต่ออาคารกับระยะห่างระหว่างอาคารที่เพิ่มมากขึ้น และผลของทิศทางลมที่แตกต่างกัน ซึ่งพบว่า กรณีที่แรงลมกระทำในทิศทาง 0° (ตั้งฉากกับตัวอาคารหลักและอาคารที่บดบัง) จะต้องมีระยะห่างระหว่างอาคารมากถึง 56 เท่าของความกว้างอาคาร ถึงจะไม่มีผลกระทบจากการบดบังอาคาร ส่วนกรณีที่แรงลมกระทำในทิศทาง 90°

(ขนานกับแนวอาคารหลักและอาคารบดบัง) จะต้องมียะยะห่างระหว่างอาคารประมาณ 10 เท่าของความกว้างอาคาร จึงจะไม่มีผลกระทบจากตำแหน่งของอาคารข้างเคียงต่อแรงลมที่กระทำกับอาคารหลัก อย่างไรก็ตามยังไม่มีผลการศึกษาในด้านค่าแรงกระทำที่ฐานอาคาร

มีการศึกษาแรงดันลมที่กระทำต่ออาคารสูง โดยทดสอบอุโมงค์ลมเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ [7-9] โดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วนขนาดใหญ่ (Large Eddy Simulation Dynamic) อุโมงค์ลมที่ใช้ในการทดสอบมีความกว้าง 2.59 เมตร, สูง 2.13 เมตร และแบบจำลองอาคารลดขนาด 1:400 จากอาคารจริงที่มีขนาดกว้าง 30.48 เมตร, ยาว 45.72 เมตร และสูง 182.88 เมตร ความเร็วลมที่ใช้ในการทดสอบคือ $U_H = 12.12 \text{ m/s}$ โดยทำการศึกษา 3 กรณีดังนี้ 1. อาคารเดี่ยว ไม่มีอาคารอื่นกีดขวาง 2. มีอาคารกีดขวางขนาดความสูงเท่ากัน และ 3. มีอาคารกีดขวางขนาดความสูงครึ่งหนึ่งของอาคารหลัก ผลการวิจัยพบว่าผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมและผลการทดสอบอุโมงค์ลมมีความสอดคล้องเป็นอย่างดี โดยมีค่าแตกต่างกันมากที่สุดประมาณ 16% นอกจากนี้ยังมีการศึกษาผลกระทบของอาคารบดบังต่อแรงลมที่กระทำต่ออาคารสูงที่มีขนาดความสูงบดบัง 20% - 50% ของความสูงอาคารหลัก [10-12] ด้วยการวิเคราะห์โปรแกรมสำเร็จรูปทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ และระยะบดบังของอาคารห่างไม่เกิน 1.75 เท่าของความสูงอาคารที่บดบัง ซึ่งได้ผลการวิจัยว่าค่าแรงดัน

ในส่วนที่ถูกอาคารบดบังจะน้อยกว่าส่วนที่ไม่ถูกอาคารบดบัง และเมื่ออาคารที่บดบังอยู่ใกล้จะยิ่งทำให้ค่าแรงดันลดลงเฉพาะในส่วนของอาคารที่ถูกบดบัง

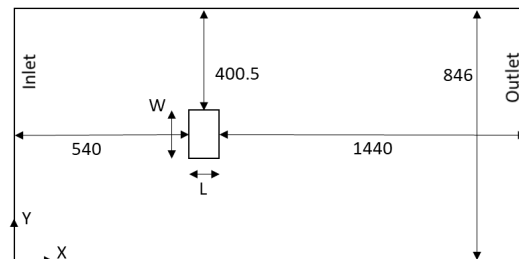
จากงานวิจัยในอดีตต่าง ๆ ที่นำเสนอ จะสังเกตได้ว่ายังไม่มีงานวิจัยที่พิจารณาค่าแรงเฉือนและโมเมนต์ที่ฐานของอาคารหลัก ซึ่งปกติแล้วจะเป็นค่าแรงสำคัญในการออกแบบอาคารเป็นลำดับแรก ๆ และสามารถนำไปเปรียบเทียบกับผลของการทดสอบอุโมงค์ลมได้โดยตรง งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นศึกษาถึงสัมประสิทธิ์ความดันที่ผิวรอบอาคาร สัมประสิทธิ์ของแรงเฉือนและโมเมนต์ที่กระทำต่ออาคารหลัก รวมถึงการเคลื่อนตัวที่ระดับยอดอาคารทั้งในทิศทางตามกระแสลมและตั้งฉากกับกระแสลม ที่ค่าความเร็วลมต่างๆ และศึกษาแรงกระทำที่ฐานอาคาร (Base shear & moment) ในกรณีที่มีอาคารมาบดบังด้านหน้าของอาคารหลักที่ระยะบดบังต่าง ๆ เพื่อสร้างความรู้ด้านแรงลมที่กระทำต่ออาคารกรณีที่ถูกบดบังและความรู้ทางด้านการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณในงานวิศวกรรมโครงสร้างอาคาร

2. การทดสอบความถูกต้องของโปรแกรมสำเร็จรูป

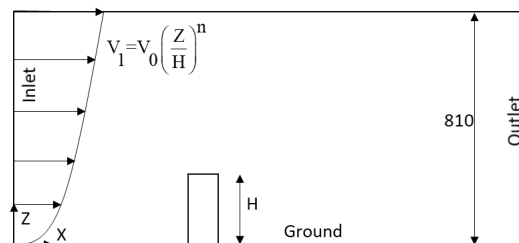
ทาง CFD

งานวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์ CFD ด้วยโปรแกรม Ansys CFX version 17.1 ซึ่งได้ทำการทดสอบความถูกต้องของโปรแกรมโดยเทียบผลการวิเคราะห์กับผลของงานวิจัยในอดีตที่เป็นการวิเคราะห์แรงลมที่กระทำต่ออาคารสูงเดี่ยวอาคารเดียวทั้งการทดสอบอุโมงค์ลมและการวิเคราะห์ simulation [1]

โดยใช้แบบจำลองอาคารขนาด 1:1 สูง (H) = 180 เมตร, กว้าง (W) = 45 เมตร, ยาว (L) = 30 เมตร ในขอบเขต (Computational domain) ขนาดสูง = 810 เมตร, กว้าง = 846 เมตร และยาว = 2010 เมตร ดังแสดงในภาพที่ 1



a) ภาพ plan อาคาร



b) ภาพ elevation อาคาร

ภาพที่ 1 ขนาดของแบบจำลองอาคารและ
ขอบเขตการจำลองที่ทำการศึกษา

2.1 คุณสมบัติแบบจำลองอาคาร

ในการวิเคราะห์ได้กำหนดสมบัติเชิงกลของโครงสร้างอาคารตามมาตรฐาน CAARC (Commonwealth Advisory Aeronautical Council) ดังนี้ Damping ratio 1%, ความหนาแน่นมวลอาคาร (Specific mass) 160 kg/m^3 , อัตราส่วนปัวซอง 0.25, Young's modulus $2.3 \times 10^8 \text{ N/m}^2$ แบบจำลองอาคารหลักถูกจำลองด้วย solid element



ชนิด hexahedral จำนวน $5 \times 8 \times 30 = 1,200$ ชิ้นส่วน (มาจากการกำหนดขนาดชิ้นส่วนเอลิเมนต์ที่ 6 เมตร ซึ่งเป็นค่าที่ยอมรับได้เนื่องจากเป็นส่วนของแบบจำลองอาคารที่ไม่ได้พิจารณาค่าแรงภายในอาคาร) โดยแบบจำลองอาคารหลักมีค่าความถี่ธรรมชาติจากการวิเคราะห์ของโปรแกรม CFD = 0.1788 Hz. และค่าความถี่ธรรมชาติจากการคิดจากโครงสร้างคานยื่นอย่างง่าย = 0.1793 Hz. ซึ่งถือว่ามีความใกล้เคียงกัน

2.2 คุณสมบัติแบบจำลองกระแสลม

กระแสลมที่ใช้ในการวิเคราะห์เป็นแบบชั้นขอบเขตความเร็ว (boundary layer velocity profile) เพื่อให้ใกล้เคียงกับสภาพความเป็นจริงโดยให้เป็นไปตามสมการกฎของกำลัง (Power law) ดังแสดงในสมการที่ (1)

$$V_{(Z_1)} = V_{(Z_2)} \left(\frac{Z_1}{Z_2} \right)^\alpha \quad (1)$$

เมื่อ $V_{(Z_1)}$ คือ ความเร็วลมเฉลี่ยที่ระดับความสูง Z_1 , $V_{(Z_2)}$ คือ ความเร็วลมเฉลี่ยที่ระดับความสูงอ้างอิง Z_2 , α คือ ค่าคงที่ซึ่งขึ้นกับลักษณะพื้นผิวและภูมิประเทศ และมีค่าคงที่ทางกายภาพของมวลอากาศดังนี้ Specific mass 1.25 Kg/m^3 , Dynamic viscosity $7.03 \times 10^{-2} \text{ Ns/m}^2$, $\alpha = 0.2$, ค่าความเร็วลมอ้างอิงใช้การอ้างอิงที่ตำแหน่งระดับสูงสุดของอาคาร ($Z=180 \text{ m}$) ซึ่งในการวิเคราะห์จะเปลี่ยนไปตามความเร็วลมลดรูป (Reduced Velocity) ที่ทำการศึกษาในแต่ละกรณีดังแสดงในตารางที่ 1 โดยความเร็วลมลดรูปนิยามด้วย $v = V/(nW)$ เมื่อ V = ความเร็วลมที่ตำแหน่งระดับยอดอาคาร, n คือ

ค่าความถี่ธรรมชาติ และ W คือ ความยาวอาคาร และใช้แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ Large Eddy Simulation (LES) จำลองมวลอากาศด้วยเอลิเมนต์แบบ tetrahedral จำนวนทั้งสิ้น 283,013 ชิ้นส่วน (มาจากการกำหนดขนาดชิ้นส่วนเอลิเมนต์ของอากาศที่ 3 เมตร อัตราการขยาย 1.125 ซึ่งได้ผลการวิเคราะห์แรงดันลมใกล้เคียงกับกรณีที่ทดลองใช้ขนาดเอลิเมนต์ที่เล็กกว่านี้แต่จะใช้เวลาในการวิเคราะห์ที่นานกว่ามากซึ่งติดข้อจำกัดของคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัย) ซึ่งให้ผลการวิเคราะห์เป็นที่น่าพอใจและยอมรับได้ในการวิเคราะห์ด้วย CFD จากงานวิจัยในอดีต [1]

ตารางที่ 1 ค่าความเร็วลมลดรูป (Reduced velocity)

ความเร็วลมลดรูป	2	4	6	10
$v \text{ (m/s.)}$	16.09	32.18	48.27	80.45

2.3 เงื่อนไขขอบเขตและการวิเคราะห์ผลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

เงื่อนไขขอบเขตมีผลโดยตรงต่อการศึกษาพฤติกรรมของไหล การกำหนดเงื่อนไขให้สอดคล้องกับสภาวะปัญหาการไหลจริงย่อมทำให้การใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขเพื่อศึกษาพฤติกรรมปัญหาของการไหลมีประสิทธิภาพมากขึ้น ประเภทเงื่อนไขของขอบเขตในงานวิจัยนี้ได้กำหนดให้ใกล้เคียงกับความเป็นจริงตามธรรมชาติคือ กำหนดให้มีแรงลมเข้าจากทางด้านหน้าอาคารในลักษณะของความเร็วลมเฉลี่ยแปรผันตามความสูง ($V_{(0)} - V_{(180)}$) ไหลผ่านอาคารออกไปโดยกำหนดเงื่อนไขขอบเขตความดันที่จุดไหลออก

เท่ากับศูนย์ ส่วนด้านข้างของขอบเขตแบบจำลอง ได้กำหนดให้มีความเร็วลมเฉลี่ยเช่นเดียวกับทางเข้า ในการวิเคราะห์ CFD ใช้ค่าระยะเวลา (Dt) = 0.2 วินาที ซึ่งพบว่าได้ผลการวิเคราะห์ที่ใกล้เคียงไม่ต่างกับการวิเคราะห์ด้วยค่าระยะเวลาที่ละเอียดกว่านี้ (0.1 วินาที) และใช้ระยะเวลาในการวิเคราะห์ผลของการจำลองทั้งหมดยาว 350 วินาที

เมื่อลมพัดเข้าหาโครงสร้างอาคาร ลมจะปะทะอาคารและแยกตัวออกไปรอบ ๆ โครงสร้าง ทำให้เกิดแรงทางอากาศพลศาสตร์กระทำกับโครงสร้าง เช่น แรงยก (lift force) แรงลาก (drag force) แรงด้านข้าง (side force) และโมเมนต์ (moment) ซึ่งสามารถแสดงค่าในรูปของ สัมประสิทธิ์ของแรง ต่างๆ ที่เป็นค่าแบบไร้หน่วย (normalized value) ที่ได้จากการหาร ค่าแรงต่างๆ ด้วยค่าแรงอ้างอิงที่ คำนวณจากค่าความเร็วม (velocity pressure) $= 1/2\rho\int_0^H V^2 dZ$ ดังนี้

$$C_{Fx} = \frac{\sum_{i=1}^N F_{Xi}}{1/2\rho W \int_0^H V^2 dZ}; C_{\sigma Fx} = \frac{\sum_{i=1}^N \sigma F_{Xi}}{1/2\rho V_H^2 WH} \quad (2)$$

$$C_{Fy} = \frac{\sum_{i=1}^N F_{Yi}}{1/2\rho W \int_0^H V^2 dZ}; C_{\sigma Fy} = \frac{\sum_{i=1}^N \sigma F_{Yi}}{1/2\rho V_H^2 WH} \quad (3)$$

$$C_{Mx} = \frac{\sum_{i=1}^N M_{Xi}}{1/2\rho V_H^2 WH^2}; C_{\sigma Mx} = \frac{\sum_{i=1}^N \sigma M_{Xi}}{1/2\rho V_H^2 WH^2} \quad (4)$$

$$C_{My} = \frac{\sum_{i=1}^N M_{Yi}}{1/2\rho V_H^2 WH^2}; C_{\sigma My} = \frac{\sum_{i=1}^N \sigma M_{Yi}}{1/2\rho V_H^2 WH^2} \quad (5)$$

$$C_{Pi} = \frac{P_i - P_0}{1/2\rho V_H^2} \quad (6)$$

เมื่อ F_x, F_y คือ ค่าแรงในแนวแกน x และ y ตามลำดับ, M_x, M_y คือ ค่าโมเมนต์รอบแกน x และ y ตามลำดับ, $\sigma F_x, \sigma F_y$ คือ ค่าแรงในแนวแกน x และ y แบบ rms (root mean square) ตามลำดับ ซึ่งแสดงถึงการกระจายของข้อมูลจากค่าเฉลี่ย, $\sigma M_x, \sigma M_y$ คือ ค่าโมเมนต์รอบแกน x และ y แบบ rms ตามลำดับ, C_{Fx} คือ สัมประสิทธิ์ของแรงในแนวแกน x, C_{Fy} คือ สัมประสิทธิ์ของแรงในแนวแกน y, C_{Mx} คือ สัมประสิทธิ์ของโมเมนต์รอบแกน x, C_{My} คือ สัมประสิทธิ์ของโมเมนต์รอบแกน y, C_p คือ สัมประสิทธิ์ของความดันบนผิวอาคารโดย, P_i คือ ความดันด้านหน้าที่พิจารณา, P_0 คือ ความดันที่ตำแหน่งอ้างอิง, $C_{\sigma Fx}, C_{\sigma Fy}, C_{\sigma Mx}$ และ $C_{\sigma My}$ คือ สัมประสิทธิ์ของแรงและโมเมนต์แบบ rms (root mean square) ซึ่งแสดงถึงการกระจายของข้อมูลจากค่าเฉลี่ย, ρ คือ ความหนาแน่นของอากาศ, V คือ ความเร็วลมเฉลี่ย, V_H คือ ความเร็วมเฉลี่ยอ้างอิงที่ระดับยอดอาคาร, W, L, H คือ ขนาดความกว้าง ความยาวและความสูงอาคารตามลำดับ, Z คือ ค่าระยะความสูงตามแกน Z

นอกจากนี้จากการที่กระแสลมเกิดการแยกตัวออกด้านข้างรอบ ๆ อาคาร จะทำให้เกิดระลอกลมขึ้น (Vortex shedding) ซึ่งจำนวนและขนาดระลอกลมขึ้นกับรูปร่างของอาคาร โดยสามารถคำนวณหาค่าความถี่ของการเกิดระลอกลมนี้ได้จากค่า frequency, f_s ซึ่งเท่ากับ

$$f_s = \frac{SV}{b} \quad (7)$$



เมื่อ S คือ Strouhal number มีค่าขึ้นกับรูปร่างของวัตถุ, b คือ ความกว้างด้านปะทะลม (typical cross flow dimension)

2.4 ผลการวิเคราะห์ CFD เทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมา

2.4.1 สัมประสิทธิ์ของค่าแรงและโมเมนต์

ตารางที่ 2, 3 แสดงค่าเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ของแรง ที่ได้จากการวิเคราะห์ CFD แรงลมที่กระทำต่ออาคารเดี่ยวในงานวิจัยนี้เทียบกับผลงานวิจัยในอดีต [1-3] พบว่าค่าแรงหลักที่กระทำต่ออาคารซึ่งประกอบด้วยแรง F_x และ M_y มีค่าแตกต่างจากงานวิจัยในอดีตประมาณ 1-19% สำหรับสัมประสิทธิ์แรงในแนวแกน x และประมาณ 19-28% สำหรับสัมประสิทธิ์ของโมเมนต์รอบแกน y (C_{My}) สำหรับค่าสัมประสิทธิ์ของแรงในแนวแกน y (C_{Fy}) และ ค่าสัมประสิทธิ์ของโมเมนต์รอบแกน x (C_{Mx}) จะมิต้าน้อยมาก ซึ่งสอดคล้องกับผลของงานวิจัยในอดีต เนื่องจากเป็นแกนรองที่ไม่มีกระแสลมกระทำต่ออาคารโดยตรง สำหรับค่าสัมประสิทธิ์แบบ rms พบว่ามีค่าเล็กน้อยเช่นเดียวกัน เนื่องจากการวิเคราะห์กรณีกระแสลมกระทำต่ออาคารเดี่ยว ซึ่งการกระจายตัวของข้อมูลหรือก็คือความปั่นป่วนของกระแสลมจะมีค่าน้อยมาก ภาพที่ 2 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ของแรงและโมเมนต์แบบประวัติเวลาจากเวลา 0-350 วินาที จากภาพที่ 2 จะเห็นได้ว่า ช่วง 50 วินาทีแรกข้อมูล จะมีความผันผวนมาก เนื่องจากเป็นสภาวะที่อาคารเริ่มถูกระแสลมกระทำเข้าโดยตรงจากภาวะหยุดนิ่ง และพบว่าเมื่อเวลาผ่านไป 50 วินาที จึงค่อยลดความผันผวนลง ในงานวิจัยนี้จึงได้ตัดข้อมูลในช่วงเวลา 50 วินาทีแรกออกไป

ตารางที่ 2 ค่าสัมประสิทธิ์ของแรง

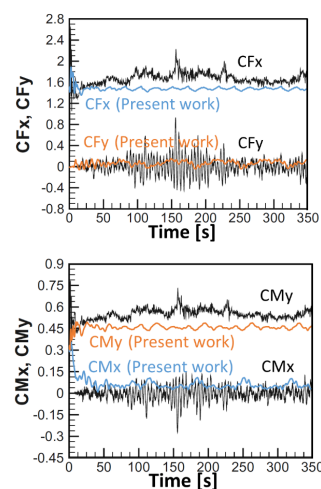
งานวิจัยที่เปรียบเทียบ	C_{Fx}		$C_{\sigma_{Fx}}$	C_{Fy}	$C_{\sigma_{Fy}}$
	value	error			
Braun A.L., Awruch A.M. [2]	1.660	11%	0.076	0.008	0.106
Obasaju [3] – smooth flow	1.490	0.94%	0.060	0.093	0.092
Huang et al. [1] – low turbulence	1.830	19%	0.060	0.006	0.134
Present work (time > 50 s.)	1.476		0.017	0.078	0.027

*ค่า error เทียบกับผลที่ได้จากงานวิจัยนี้ = (ค่าอ้างอิง-ค่าจากงานวิจัยนี้)/ค่าอ้างอิง

ตารางที่ 3 ค่าสัมประสิทธิ์ของโมเมนต์

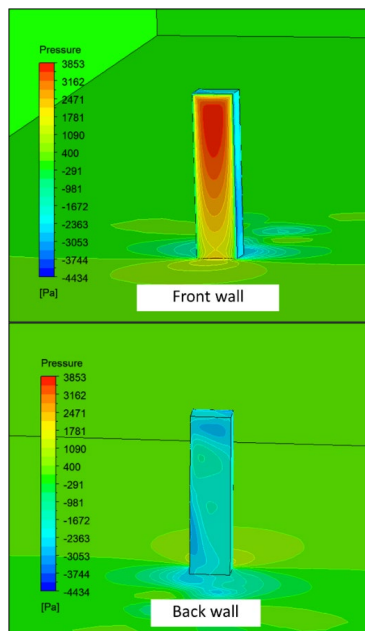
งานวิจัยที่เปรียบเทียบ	C_{Mx}	$C_{\sigma_{Mx}}$	C_{My}		$C_{\sigma_{My}}$
			value	error	
Braun A.L., Awruch A.M. [2]	0.004	0.048	0.570	19.3%	0.038
Obasaju [3] – smooth flow	0.000	0.043	0.640	28%	0.030
Present work (time > 50 s.)	0.052	0.017	0.460		0.012

*ค่า error เทียบกับผลที่ได้จากงานวิจัยนี้ = (ค่าอ้างอิง-ค่าจากงานวิจัยนี้)/ค่าอ้างอิง

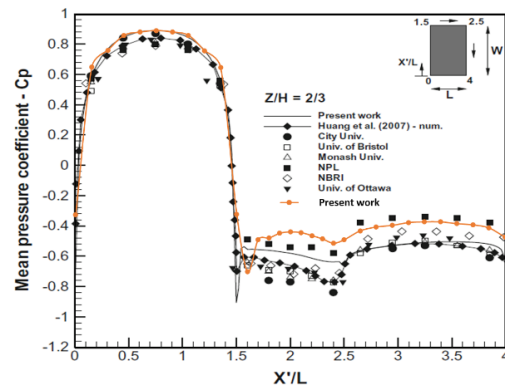


ภาพที่ 2 ประวัติเวลาค่าสัมประสิทธิ์ของแรงและโมเมนต์ที่กระทำต่ออาคารเดี่ยวอาคารเดี่ยว

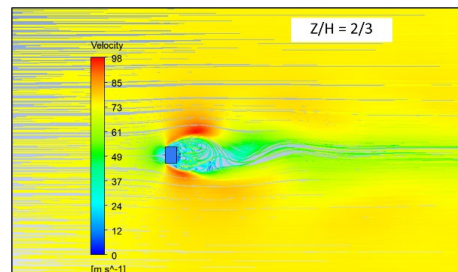
ภาพที่ 3 แสดงถึงแผนภาพเส้นชั้นความดันรอบผิวอาคาร ซึ่งจะเห็นได้ว่าความดันจะมีค่ามากที่บริเวณหน้าอาคาร และมีค่าสูงขึ้นตามความสูงของอาคาร ซึ่งสอดคล้องกับความจริงที่ว่ากระแสลมกระทำเข้าที่ด้านหน้าของอาคารโดยตรงและความเร็วลมเฉลี่ยมีค่าต่ำสุดที่ผิวดินและค่อย ๆ มีค่ามากขึ้นตามความสูง ค่าสัมประสิทธิ์ของแรงดันรอบอาคารที่ระดับความสูง $Z/H = 2/3$ หรือที่ความสูง 120 เมตร แสดงดังในภาพที่ 4 โดยเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่มีผู้ศึกษาไว้ก่อนหน้านี้ [1, 2] พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ความดันที่บริเวณด้านหน้าอาคาร ($0 < X'/L < 1.5$) ให้ผลสอดคล้องกับงานวิจัยในอดีตเป็นอย่างดี ส่วนบริเวณด้านข้างอาคาร ($1.5 < X'/L < 2.5$) ได้ผลสูงกว่างานวิจัยในอดีตเล็กน้อย และส่วนบริเวณด้านหลังอาคาร ($2.5 < X'/L < 4$) ได้ผลสอดคล้องใกล้เคียงกับงานวิจัยอื่น ๆ



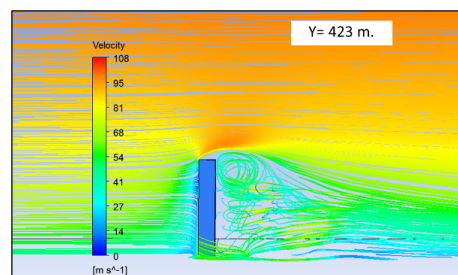
ภาพที่ 3 ความดันรอบอาคาร



ภาพที่ 4 สัมประสิทธิ์ของแรงดันรอบอาคาร
ที่ระดับความสูง 120 เมตร



a) ภาพตัดขวางแนวระนาบนอนที่ความสูง (2/3)H



b) ภาพตัดขวางแนวระนาบตั้งที่กึ่งกลางอาคาร

ภาพที่ 5 เส้นการไหลของกระแสลมกรณีอาคารเดี่ยว

2.4.2 เส้นการไหลของกระแสลม (Stream line)

ภาพที่ 5 แสดงเส้นการไหลของกระแสลมในแนว (a) ระนาบตัดขวางแนวนอนที่ความสูง (2/3)H และ (b) แนวระนาบตัดขวางกึ่งกลางอาคาร จะเห็น

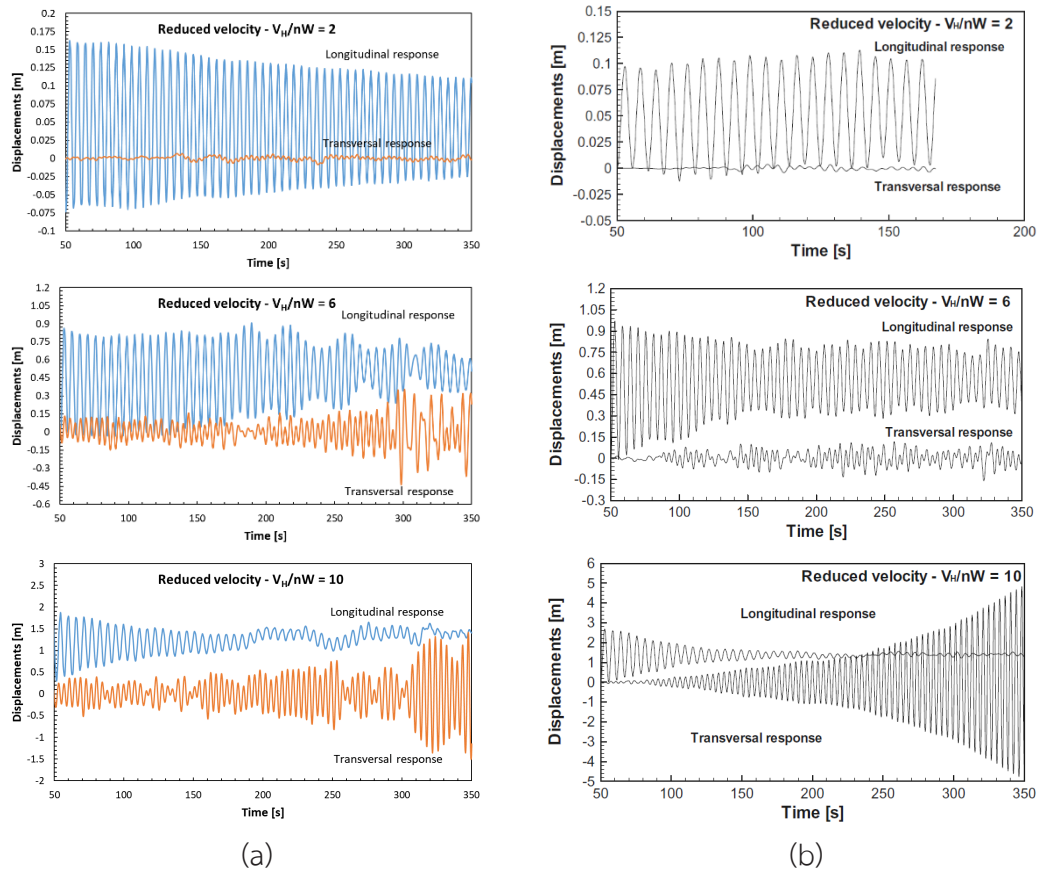
ได้ว่าเมื่อกระแสลมไหลปะทะกับอาคารจะเกิดการเลี้ยวเบนออกแล้วไหลผ่านทางด้านข้างอาคาร และเกิดเป็นกระแสรอบกวอยู่บริเวณด้านข้างและหลังอาคารบางส่วน ซึ่งทำให้โครงสร้างอาคารเกิดการสั่นไหวทั้งในแนวทิศทางการตามกระแสลมและตั้งฉากกับกระแสลม และเมื่อพิจารณาจากภาพตัดขวางในแนวดังจะเห็นได้ว่าทางด้านหน้าของอาคารที่ระดับความสูงต่ำ ๆ กระแสลมจะพยายามวนกลับเมื่อปะทะอาคาร ส่วนที่ระดับความสูงอาคารสูง ๆ กระแสลมจะพยายามไหลข้ามอาคารไป ส่วนทางด้านหลังอาคาร กระแสรอบกล่อมจะมีขนาดใหญ่ขึ้นตามความสูง

2.4.3 การเคลื่อนตัวที่ระดับยอดอาคาร

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาพฤติกรรมการเคลื่อนตัวของอาคารโดยวิเคราะห์การตอบสนองของโครงสร้างอาคารภายใต้ความเร็วลมที่สอดคล้องกับความเร็วลมลดรูปค่าต่าง ๆ ซึ่งได้ทำการศึกษาการเคลื่อนตัวทั้งการเคลื่อนตัวในแนวทิศทางการตามและการเคลื่อนตัวในทิศทางตั้งฉากกับกระแสลม ทั้งนี้การวิเคราะห์ไม่ได้พิจารณาผลของตัวหน่วง

ภาพที่ 6 แสดงค่าการเคลื่อนตัวที่ระดับยอดอาคารสำหรับค่าความเร็วลมลดรูป เท่ากับ 2, 6, 10 โดยเปรียบเทียบกับผลจากงานวิจัยในอดีต [2] ซึ่งพบว่าการเคลื่อนตัวในทิศทางตามกระแสลมนั้นมีค่าลดลงเมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้น และมีค่าแอมพลิจูดของการตอบสนองสูงขึ้นตามความเร็วลมลดรูป (Reduced Velocity) ที่เพิ่มขึ้น หรือก็คือเมื่อความเร็วลมสูงขึ้น การเคลื่อนตัวที่ยอดอาคารตามกระแสลมก็เพิ่มขึ้นด้วย

ส่วนการเคลื่อนตัวในทิศทางตั้งฉากกับกระแสลมที่ค่าความเร็วลมลดรูป (Reduced Velocity) = 2 และ 6 พบว่าแอมพลิจูดของการตอบสนองมีค่าน้อย แต่ที่ค่าความเร็วลมลดรูป (Reduced Velocity) ประมาณ = 10 พบว่าค่าการเคลื่อนตัวในทิศทางตั้งฉากกับกระแสลมมีค่าเพิ่มมากขึ้นอย่างชัดเจน เป็นผลมาจากความถี่ในการสั่นของอาคารเนื่องจากแรงลมมีค่าใกล้เคียงกับความถี่ธรรมชาติของอาคาร จึงทำให้เกิดการสั่นพ้องแบบกำทอน (Resonance) ในทิศทางที่ตั้งฉากกับกระแสลม หรือที่เรียกว่าเกิดพฤติกรรม lock-in



ภาพที่ 6 การเคลื่อนตัวของระดับยอดอาคารภายใต้กระแสลมความเร็วต่าง ๆ

(a) ผลจากงานวิจัยนี้ (b) ผลจากงานวิจัยในอดีต [2]

2.5 สรุปผลการทดสอบความถูกต้องของโปรแกรมวิเคราะห์ CFD

จากการศึกษาโดยการจำลองอาคารขนาด 1:1 ด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ CFD เพื่อตรวจสอบพฤติกรรมของอาคารสูงเมื่อถูกแรงลมกระทำ ได้ผลใกล้เคียงเป็นที่น่าพอใจในระดับหนึ่งเมื่อเทียบกับผลงานวิจัยในอดีต ทั้งนี้อาจได้ผลที่มีค่าแตกต่างกันไปบ้าง อาจเนื่องจากสาเหตุบางประการ เช่น ระยะเวลา Δt ในการวิเคราะห์ข้อมูลที่แตกต่างกัน หรือขนาดของเอลิเมนต์ก็มีส่วนต่อความละเอียดของ

ผลการวิเคราะห์เป็นต้น อย่างไรก็ตาม การใช้เอลิเมนต์ที่มีขนาดละเอียดเล็กมากๆ หรือระยะเวลาช่วงการวิเคราะห์ (Δt) ที่เล็กมาก มีผลต่อข้อจำกัดความสามารถของคอมพิวเตอร์ที่ใช้งาน เวลาที่ใช้ในการประมวลผล ซึ่งจากค่าผลการวิเคราะห์ที่ได้จากงานวิจัยนี้เมื่อเทียบกับผลที่ได้จากงานวิจัยในอดีต ยังถือว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ โปรแกรมสำเร็จรูปทาง CFD และขั้นตอนกระบวนการจำลองและวิเคราะห์โครงสร้าง อยู่ในเกณฑ์ที่มีความน่าเชื่อถือ ซึ่งจะนำไปใช้วิเคราะห์ผลของแรงลมที่กระทำต่อ

อาคารสูงกรณีที่มีอาคารอื่นบดบังกระแสลมในลำดับถัดไป

3. การศึกษาผลกระทบจากการบดบังของอาคารที่อยู่ด้านหน้า

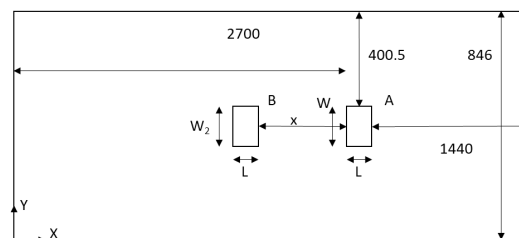
ในลำดับถัดไปได้ใช้แบบจำลองอาคารเดิมมาทำการวิเคราะห์ CFD กรณีศึกษาผลของกระแสลมที่กระทำต่ออาคารสูงโดยมีอาคารอื่นบดบังด้านหน้า โดยพิจารณาผลของความสูงอาคารที่บดบังและระยะห่างของการบดบังค่าต่าง ๆ โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.1 การสร้างแบบจำลองอาคารหลักและอาคารบดบัง

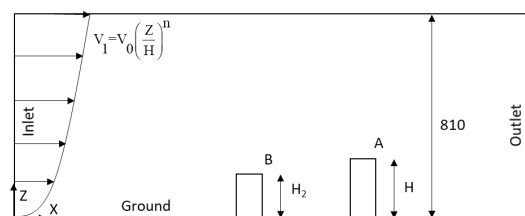
งานวิจัยนี้ใช้แบบจำลองอาคารสูงขนาด 1:1 โดยอาคารหลักที่ทำการศึกษาค่าแรงลมที่กระทำต่ออาคารมีขนาดเท่าอาคารเดิมที่ทำการวิเคราะห์ในหัวข้อที่ 2 ในที่นี้เรียกแทนอาคาร A ซึ่งมีขนาดความสูง (H) = 180 เมตร, กว้าง (W) = 45 เมตร, ความยาว (L) = 30 เมตร ส่วนอาคารที่มาบดบังกระแสลมด้านหน้าเรียกแทนอาคาร B มีขนาดความกว้างยาวเท่าอาคาร A คือกว้าง 45 เมตร และยาว 30 เมตร แต่ปรับเปลี่ยนค่าความสูงอาคารบดบัง H_2 ที่ความสูงต่างๆ เป็น 0.25, 0.5, 0.75 และ 1 เท่าของความสูงอาคาร A และมีตำแหน่งของอาคาร B ที่บดบังด้านหน้าอาคาร A ที่ระยะห่างต่างๆ ดังแสดงค่าในตารางที่ 3 โดยการวิเคราะห์ CFD อยู่ในขอบเขตของการคำนวณ (Computational domain) ขนาดความสูง 810 เมตร กว้าง 846 เมตร และยาว 4170 เมตร ดังแสดงรายละเอียดตำแหน่งแบบจำลองอาคารและขนาดขอบเขตการวิเคราะห์

ในภาพที่ 7 ซึ่งมีทั้งหมด 13 กรณี เมื่อพิจารณาร่วมกับค่าความสูงอาคารบดบัง (B) ทั้ง 4 ขนาด ทำให้มีจำนวนกรณีศึกษาในการวิเคราะห์ simulation CFD ทั้งหมด = 52 กรณี เพื่อศึกษาค่าแรงกระทำที่ฐานอาคาร (Base Shear) โมเมนต์กระทำที่ฐานอาคาร (Base Moment) และแรงดัน (Pressure) ที่เกิดขึ้นบริเวณด้านหน้าอาคาร เมื่อมีอาคารบดบังความสูงต่างๆ และระยะห่างการบดบังต่างๆ

สมบัติเชิงกลของโครงสร้างอาคารอ้างอิงตามอาคารในมาตรฐาน CAARC เช่นเดิมคือ มีค่าความหนาแน่นมวลอาคาร, Specific mass, = 160 Kg/m^3 , Young's modulus $2.3 \times 10^8 \text{ N/m}^2$, Poisson's ratio 0.25 และในการวิเคราะห์ส่วนนี้พิจารณาค่าความหน่วง, Damping ratio = 1%



a) ภาพ plan อาคาร



b) ภาพ elevation อาคาร

ภาพที่ 7 ขนาดของแบบจำลองอาคารและขอบเขตการจำลองที่ทำการศึกษา (หน่วย: เมตร)

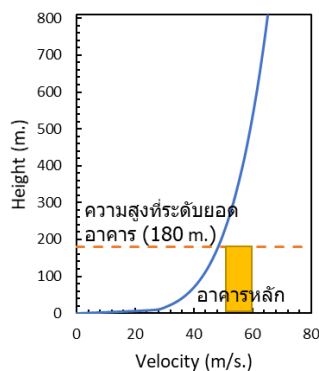
ตารางที่ 3 กรณีสึกษาตำแหน่งระยะห่าง (x) ของอาคารบดบังกับอาคารหลัก

กรณี	x (m)	u = x/L	กรณี	x (m)	u = x/L
1	30	1	8	660	22
2	90	3	9	810	27
3	150	5	10	1110	37
4	240	8	11	1410	47
5	330	11	12	1710	57
6	420	14	13	2010	67
7	510	17			

*u นิยามเป็น ระยะห่างการบดบังแบบไร้หน่วย = x/L

3.2 คุณสมบัติแบบจำลองกระแสลม

แบบจำลองกระแสลมที่ใช้เป็นแบบชั้นขอบเขตความเร็ว (Boundary layer velocity profile) เช่นเดิมตามความสัมพันธ์ดังสมการที่ (1) โดยใช้ค่า $\alpha = 0.2$ และความเร็วลมที่ระดับยอดอาคาร (180 m) อ้างอิงจากค่าความเร็วลมไร้หน่วย = 6 ซึ่งมีค่าความเร็วเฉลี่ย = 48.27 m/s สามารถแสดงค่าความเร็วลมที่ระดับความสูงต่างๆ (Velocity Profile) ดังในภาพที่ 8



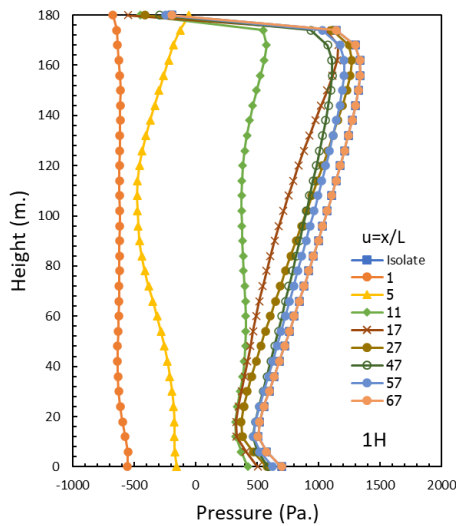
ภาพที่ 8 ความเร็วลมที่ระดับความสูงต่าง ๆ (Velocity Profile)

คุณสมบัติเชิงกลของอากาศใช้เท่าเดิมตามการวิเคราะห์ในหัวข้อที่ 2 คือ ค่าความหนาแน่นมวลอากาศ, Specific mass = 1.25 Kg/m^3 , Dynamic viscosity $7.03 \times 10^{-2} \text{ Ns/m}^2$ และใช้แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ Large Eddy Simulation (LES) จำลองมวลอากาศด้วยเอลิเมนต์แบบ tetrahedral จำนวนทั้งสิ้นประมาณ 688,061 ชิ้นส่วน (มาจากการกำหนดขนาดชิ้นส่วนเอลิเมนต์อากาศที่ 3 เมตร อัตราการขยาย 1.125) ซึ่งมีจำนวนมากขึ้นน้อยแตกต่างกันแล้วแต่กรณีเนื่องจากอาคารที่บดบัง (อาคาร B) มีขนาดที่แตกต่างกัน

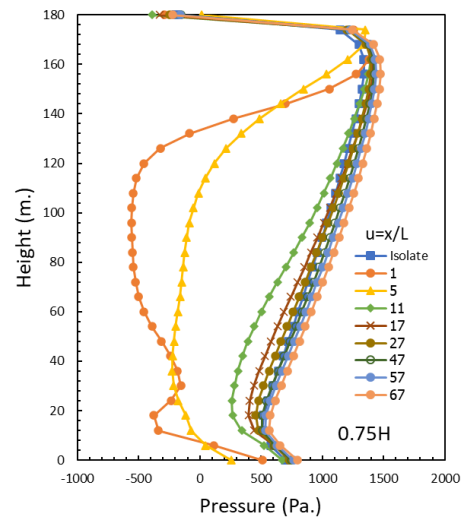
เงื่อนไขขอบเขตในการวิเคราะห์ CFD กำหนดในลักษณะเดียวกันกับที่วิเคราะห์ในหัวข้อที่ 2 คือ กำหนดให้มีแรงลมเข้าจากทางด้านหน้าอาคารในลักษณะของความเร็วลมเฉลี่ยแปรผันตามความสูง กำหนดความดันที่จุดไหลออกเท่ากับศูนย์ สำหรับค่าระยะห่างเวลา (time step) ที่ใช้ในการวิเคราะห์ CFD ใช้ค่าที่ละเอียดขึ้นกว่าเดิมคือใช้ค่า $\Delta t = 0.1$ วินาที

4. ผลการวิเคราะห์ CFD กรณีมีอาคารบดบังกระแสลมที่กระทำกับอาคารหลัก

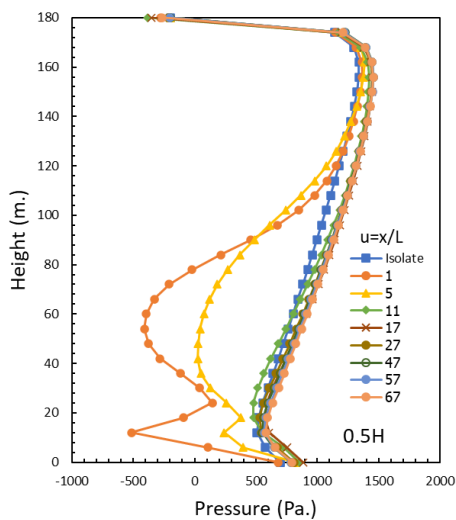
ผลการวิเคราะห์ค่าแรงดันลมที่กระทำต่ออาคารหลักด้านหน้าที่ตำแหน่งกึ่งกลางอาคาร เมื่อเปรียบเทียบระหว่างกรณีของลมกระทำต่ออาคารเดี่ยวไร้การบดบัง (กรณี isolate) และกรณีที่ถูกลบดบังด้วยอาคารขวางด้านหน้ากรณีต่าง ๆ ได้ถูกเลือกมาแสดงในภาพที่ 9 ประกอบด้วยกรณีที่มีระยะห่างการบดบังไร้หน่วย, $u = x/L = 1, 5, 11, 17, 27, 47, 57, 67$ สำหรับอาคารบดบังขนาดความสูง $1H, 0.75H, 0.5H$ และ $0.25H$ ในภาพที่ 9(a)-(d) ตามลำดับ



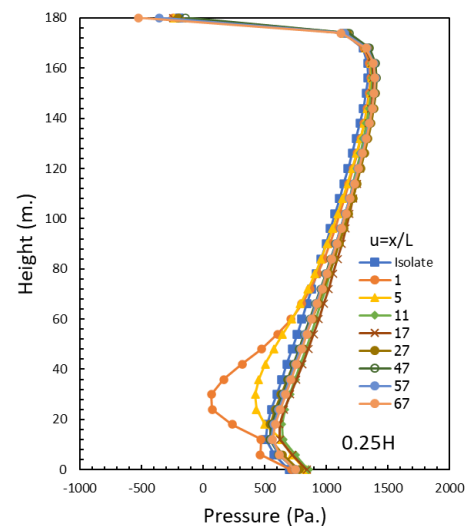
a) กรณีอาคารบดบังสูง 1H



b) กรณีอาคารบดบังสูง 0.75H



c) กรณีอาคารบดบังสูง 0.5H



d) กรณีอาคารบดบังสูง 0.25H

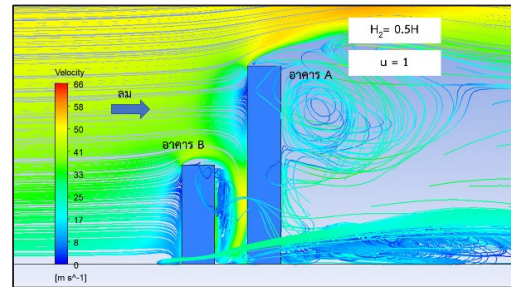
ภาพที่ 9 แรงดัน (Pressure) บริเวณกึ่งกลางด้านหน้าอาคารหลักที่ระยะความสูงต่างๆ

โดยแกน y เป็นความสูงของอาคารที่ทำการศึกษ แกน x เป็นค่าแรงดัน (Pressure) ด้านหน้าที่กึ่งกลางอาคาร จากผลการวิเคราะห์พบว่า โดยทั่วไปเมื่ออาคารบดบังยังอยู่ใกล้อาคารหลัก จะยังทำให้แรงดันลมที่กระทำต่ออาคารหลักลดลงอย่างมาก

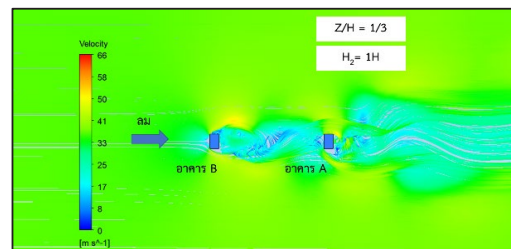
โดยเฉพาะเมื่อค่าระยะห่างการบดบังไร้หน่วย, $u < 11$ ยกเว้นกรณีอาคารบดบังสูง 1H เมื่อค่าระยะห่างการบดบังไร้หน่วย, u ตั้งแต่ 11 ขึ้นไป (ระยะห่างอาคารบดบังตั้งแต่ประมาณ 11 เท่าของขนาดอาคารหลักในทิศทางตามกระแสลม) ค่าแรงดันลมที่กระทำต่อ

ด้านหน้าอาคารหลักมีค่าใกล้เคียงกันกับกรณีไร้การ
บดบัง สำหรับกรณีที่อาคารบดบังสูง $1H$ ค่าระยะ
ห่างการบดบังไร้หน่วย, $u = 47$ เท่าขึ้นไป ยังคงมีผล
การบดบังให้แรงดันลมที่กระทำกับอาคารหลักลดลง
เล็กน้อย เพราะเมื่อความสูงของอาคารบดบัง H_2
ลดลง ค่าแรงดันลมที่กระทำต่ออาคารหลัก ที่ตำแหน่ง
ความสูงมากกว่าอาคารที่บดบัง จะมีค่าใกล้เคียง
กับกรณีอาคารหลักที่ไร้การบดบัง ซึ่งแสดงว่า
ผลกระทบของแรงดันลมที่เปลี่ยนแปลงแตกต่าง
จากกรณีที่ไม่มีอาคารบดบัง (Isolate) ส่วนใหญ่จะ
เกิดในบริเวณที่ความสูงต่ำกว่า H_2

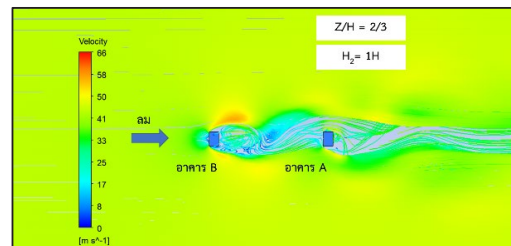
จากภาพที่ 9(c) มีข้อสังเกตเพิ่มเติมว่าค่าแรง
ดันที่ผิวอาคารหลักของกรณีอาคารบดบังมีความสูง
น้อยกว่าอาคารหลักโดยเฉพาะกรณีของอาคารบดบัง
สูง $0.5H$ และระยะห่างการบดบังไร้หน่วย, $u = 1$
ที่ตำแหน่งระดับความสูง 12 เมตร พบค่าแรงดันที่
ผิวอาคารหลักติดลบ (แรงดูด) มากกว่ากรณีอื่น ๆ
ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นค่าบวก (แรงกด) สาเหตุเป็นเพราะ
ว่า เมื่อกระแสลมพัดผ่านด้านบนของอาคารบดบัง
(B) เข้าปะทะอาคารหลัก (A) ทำให้กระแสลมไหล
สะท้อนลงตามช่องว่างระหว่างอาคาร A และ B
ดังแสดงในภาพที่ 10 เป็นผลทำให้ที่ ช่วงตำแหน่ง
ความสูงระดับประมาณ 12 เมตร เกิดเป็นแรงดูดที่
ผิวหน้าอาคาร A พฤติกรรมในลักษณะเดียวกัน
สามารถพบได้ในกรณีอาคารบดบังสูง $0.25H$ และ
 $0.75H$ เช่นกันที่ระยะห่างการบดบังไร้หน่วยประมาณ
ไม่เกิน $u \leq 5$



ภาพที่ 10 เส้นการไหลของกระแสลมในกรณีที่มี
อาคารบดบังสูง $0.5H$ ด้านหน้า
ที่ระยะห่างการบดบังไร้หน่วย, $u = 1$



a) ภาพตัดในแนวระนาบนอนที่ตำแหน่ง
ความสูง $Z/H = 1/3$



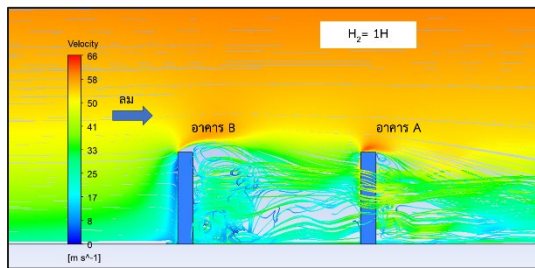
b) ภาพตัดในแนวระนาบนอนที่ตำแหน่ง
ความสูง $Z/H = 2/3$

ภาพที่ 11 เส้นการไหลของกระแสลมในกรณีที่มี
อาคารบดบังสูง $1H$ ด้านหน้าที่ระยะห่าง
การบดบังไร้หน่วย, $u = 11$

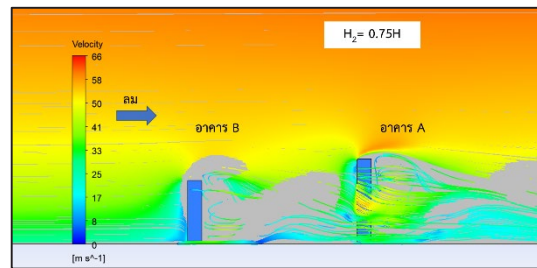


ตัวอย่างเส้นทางการไหลของกระแสลมในกรณีที่มีอาคารบดบังสูง $1H$ ด้านหน้าที่ระยะห่างการบดบังไร้หน่วย, $u = 11$ ดังแสดงในภาพที่ 11(a) และ 11(b) สำหรับภาพตัดในแนวระนาบนอนที่ตำแหน่งความสูง $Z/H = 1/3$ และ $Z/H = 2/3$ ตามลำดับ โดยในภาพ แสดงการไหลของกระแสลมไหลเข้าจากทางด้านซ้ายมือของรูป ผ่านอาคารที่บดบัง

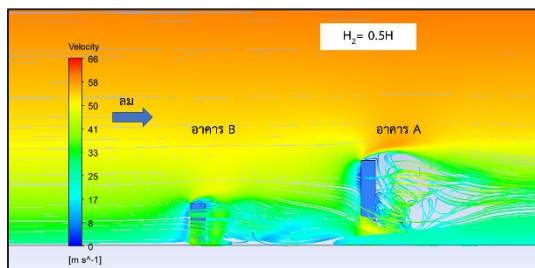
และอาคารหลักแล้วไหลออกทางด้านขวาของรูป ส่วนภาพตัดแนว ระนาบตั้งในกรณีที่มีอาคารบดบังด้านหน้าสูง $1H, 0.75H, 0.5H, 0.25H$ ที่ระยะห่างการบดบังไร้หน่วย, $u = 11$ และกรณีที่ไร้อาคารบดบังแสดงในภาพที่ 12(a)-(e) ตามลำดับ และภาพที่ 13 แสดงเส้นทางการไหลของกระแสลมในแบบภาพ 3 มิติ



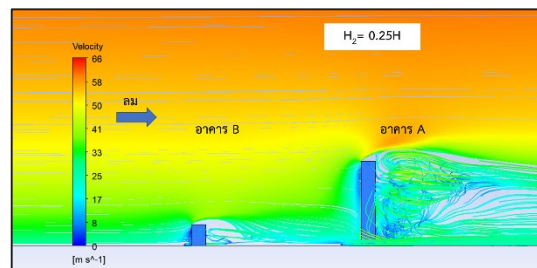
a) กรณีอาคารบดบังสูง $1H$



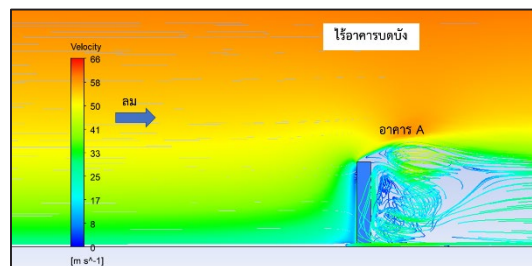
b) กรณีอาคารบดบังสูง $0.75H$



c) กรณีอาคารบดบังสูง $0.5H$

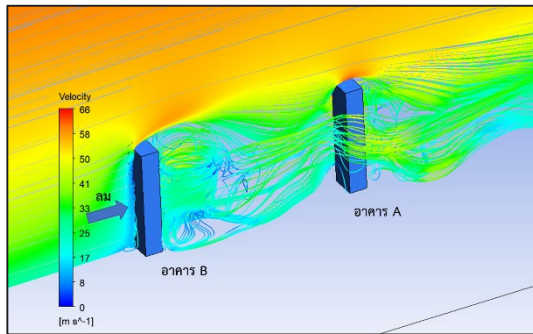


d) กรณีอาคารบดบังสูง $0.25H$



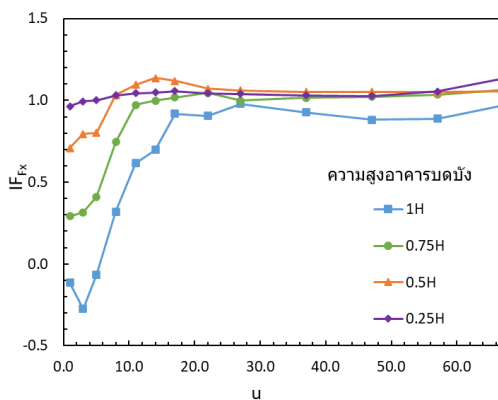
e) กรณีไร้อาคารบดบังสูง

ภาพที่ 12 เส้นการไหลของกระแสลมในกรณีที่มีอาคารบดบังสูง $1H, 0.75H, 0.5H, 0.25H$ และไร้อาคารบดบังด้านหน้าที่ระยะห่างการบดบังไร้หน่วย, $u = 11$

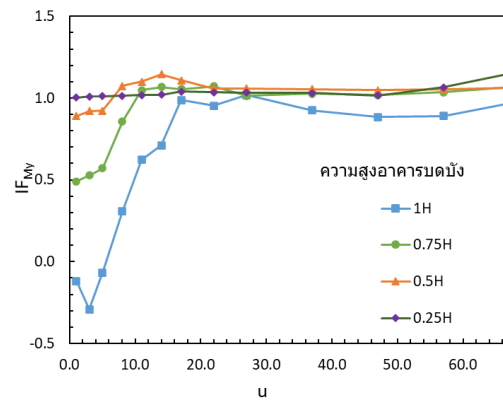


ภาพที่ 13 เส้นกระแสการไหลของลมใน 3 มิติ

นอกจากการพิจารณาจากค่าความดันที่กระทำด้านหน้าอาคารหลักแล้ว การเปรียบเทียบผลกระทบจากการบดบังกระแสลมต่อค่าแรงเฉือนและโมเมนต์ที่กระทำต่อฐานอาคารหลักในกรณีต่าง ๆ จะใช้การพิจารณาจากค่าตัวประกอบการบดบัง (Interference Factors, IF) นิยามเท่ากับค่าสัดส่วนของผลค่าแรงเฉือนที่เกิดในอาคารหลักกรณีที่มีอาคารบดบังด้านหน้าต่อผลของค่าแรงเฉือนหรือโมเมนต์ที่เกิดในอาคารหลักเดี่ยว ๆ โดยไม่ถูกบดบัง ดังแสดงผลในภาพที่ 14



a) แรงเฉือนที่ฐานอาคารหลัก IF_{Fx}



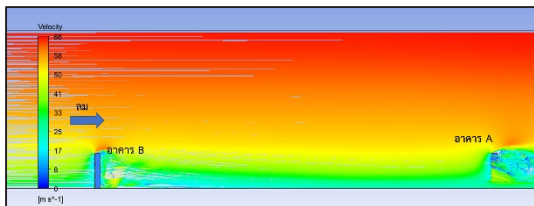
b) โมเมนต์ที่ฐานอาคารหลัก IF_{My}

ภาพที่ 14 ค่าตัวประกอบการบดบังของค่าแรงเฉือนและโมเมนต์ที่ฐานอาคารหลัก

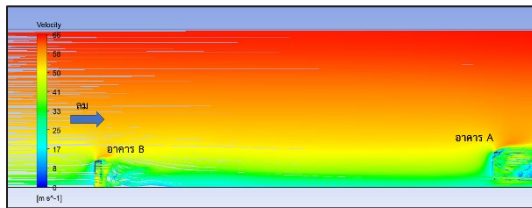
จากภาพที่ 14 แกน y เป็นค่าตัวประกอบการบดบังของแรงเฉือนที่ฐานอาคารในแนวแกน x (IF_{Fx}) และโมเมนต์ที่ฐานอาคารหลักรอบแกน y (IF_{My}) สำหรับภาพที่ 14 (a) และ 14 (b) ตามลำดับ และแกน x เป็นระยะห่างการบดบังไร้หน่วย, $u=x/L$, ผลการวิเคราะห์แสดงแยกแต่ละกรณีของความสูงของอาคารที่บดบัง $H_2 = 1H, 0.75H, 0.5H$ และ $0.25H$ ตามลำดับ จากผลการวิเคราะห์ พบว่าเมื่ออาคารบดบังอยู่ใกล้และมีขนาดใหญ่ใกล้เคียงอาคารหลัก ค่าแรงเฉือนและโมเมนต์ที่ฐานอาคารหลักจะถูกลดทอนลงอย่างมากโดยผลการลดทอนค่าแรงเฉือนและโมเมนต์กระทำที่ฐานอาคารหลักนี้จะน้อยลงเมื่อ อาคารบดบังอยู่ห่างไกลมากขึ้น โดยเมื่อระยะห่างการบดบังไร้หน่วย, u , มีค่าประมาณ 20 ขึ้นไป (ระยะห่าง 20 เท่าของขนาดอาคารหลัก



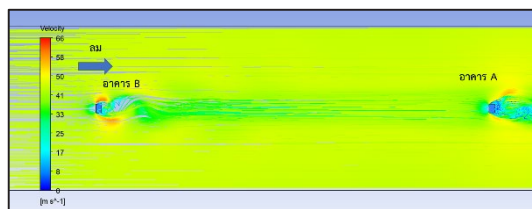
ในทิศทางตามกระแสลม) ค่าตัวประกอบการบดบัง (IF_{Fx} , IF_{My}) มีค่าเข้าใกล้ 1 แสดงว่าผลการบดบังอาคารมีค่าค่อนข้างน้อยมาก อย่างไรก็ตามกรณีที่อาคารบดบังมีความสูง H_2 เท่ากับอาคารหลัก (กรณีความสูงบดบัง $1H$) แม้ระยะห่างการบดบังจะไกลมากถึง 67 เท่าของขนาดอาคารหลักในทิศทางตามกระแสลม ($u = 67$) ค่า IF ยังมีค่าอยู่ที่ประมาณ 0.9 คาดว่ามีสาเหตุมาจากกระแสลมที่พัดผ่านอาคารบดบัง (อาคาร B) ส่วนที่ไหลเข้าอาคารมีความเร็วลมมากกว่ากรณีอื่น ๆ จึงควรต้องมีระยะทางที่ไกลกว่านี้ เพื่อลดผลกระทบจากแรงลม อีกทั้งการเกิดระลอกลมที่ด้านหลังอาคารบดบังของกรณีอาคารบดบังสูง $1H$ ก่อวนกระแสลมที่จะเข้าปะทะกับอาคารหลัก (อาคาร A) มีมากกว่ากรณีอื่นๆ ดังแสดงในภาพที่ 15 (ภาพเปรียบเทียบตัวอย่างของกรณีอาคารบดบังสูง $1H$ เทียบกับกรณีสูง $0.75H$) นอกจากนี้เมื่อค่า $u = 27$ ค่า IF กรณีอาคารบดบังสูง $1H$ มีค่าเข้าใกล้ 1 คาดว่ามีสาเหตุมาจากเกิดการปั่นป่วนของกระแสลมพอดีที่ไปลดผลกระทบต่อค่าแรงเฉือนและโมเมนต์ที่กระทำต่อฐานอาคารหลัก ทำให้ค่าแรงมีค่าใกล้เคียงกับกรณีที่ไร้การบดบังพอดี



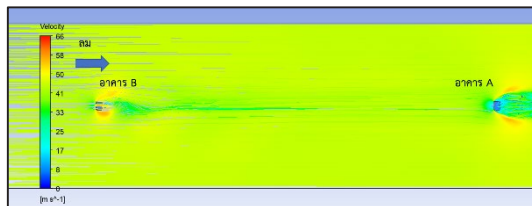
a) ภาพตัดขวางแนวระนาบตั้งที่กึ่งกลางอาคารกรณีอาคารบดบังสูง $1H$



b) ภาพตัดขวางแนวระนาบตั้งที่กึ่งกลางอาคารกรณีอาคารบดบังสูง $0.75H$



c) ภาพตัดขวางแนวระนาบแนวระนาบนอนที่ความสูง $(2/3)H$ กรณีอาคารบดบังสูง $1H$



d) ภาพตัดขวางแนวระนาบแนวระนาบนอนที่ความสูง $(2/3)H$ กรณีอาคารบดบังสูง $0.75H$

ภาพที่ 15 เส้นการไหลของกระแสลมในกรณีที่อาคารบดบังสูง $1H$ และ $0.75H$ ที่ระยะห่างการบดบังไร้หน่วย, $u = 67$

นอกจากนี้ยังมีข้อสังเกตว่า ถ้าความสูงอาคารบดบังลดลง จะมีค่า IF ที่สูงขึ้น หมายความว่า ยิ่งอาคารบดบังเตี้ยลง ผลการบดบังแรงลมที่กระทำต่ออาคารหลักจะลดลง (ค่าแรงเฉือนและโมเมนต์ที่

ฐานอาคารหลักมีค่าสูงขึ้นใกล้เคียงกรณีอาคารที่ไร้การบดบัง)

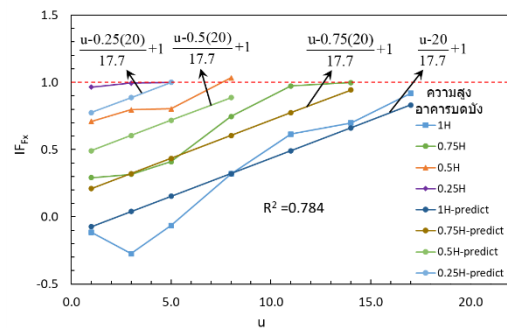
จากภาพที่ 14 พบว่าสำหรับกรณีที่อาคารบดบังมีความสูง 1H เมื่อค่าระยะห่างการบดบังไร้หน่วย, u มีค่ามากกว่าประมาณ 17 และ 20 ค่า IF ของโมเมนต์และแรงเฉือนที่ฐานอาคารจะมีค่าประมาณ 1 ตามลำดับ ค่า u ดังกล่าวนิยามให้เป็นค่า x_0 ซึ่งหมายถึงระยะห่างการบดบังไร้หน่วยที่ไม่มีผลกระทบต้ออาคารหลักสำหรับกรณีอาคารบดบังสูง 1H, $x_0 = 20$ สำหรับ IF_{Fx} และ $x_0 = 17$ สำหรับ IF_{My} และเมื่อความสูงของอาคารบดบังลดลง (0.75H, 0.5H และ 0.25H) ระยะห่างการบดบังที่ไม่มีผลกระทบต้ออาคารหลัก มีแนวโน้มลดลงตามสัดส่วนของการบดบัง (nx_0 ; $n = 1, 0.75, 0.5, 0.25$)

จากภาพที่ 14 ในช่วงระยะห่างการบดบังไร้หน่วยที่ส่งผลกระทบต่ออาคารหลัก ($u < x_0$) แนวโน้มของค่า IF มีลักษณะอาจประมาณเป็นความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงได้ จึงใช้ข้อมูลค่า IF ในช่วงดังกล่าวมาประมาณหาความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงอย่างง่ายดังสมการที่ 8

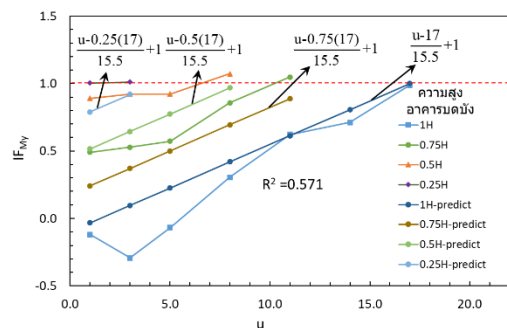
$$IF = \frac{u - nx_0}{k} + 1 \quad (8)$$

เมื่อ IF คือ ค่าตัวประกอบการบดบัง, u คือ ค่าระยะห่างการบดบังไร้หน่วย, n คือ จำนวนเท่าของความสูงอาคารบดบังต้ออาคารหลัก, k คือ ค่าคงที่โดยใช้หลักทางสถิติเพื่อวิเคราะห์หาค่า k ที่ทำให้ผลการประมาณค่ามี error น้อยที่สุดด้วยวิธี Least

square method พบว่าได้ค่า k สำหรับสมการค่าตัวประกอบการบดบังของแรง $IF_{Fx} = 17.7$ โดยมีค่า $R^2 = 0.784$ และได้ค่า k สำหรับค่าตัวประกอบการบดบังของแรง $IF_{My} = 15.5$ โดยมีค่า $R^2 = 0.571$



a) IF_{Fx} ของแรงเฉือนที่ฐานอาคารหลัก



b) IF_{My} ของโมเมนต์ที่ฐานอาคารหลัก

ภาพที่ 16 IF_{Fx} , IF_{My} จากการวิเคราะห์ CFD และการประมาณค่าตามสมการ (8)

นำสมการที่ 8 มาคำนวณค่าตัวประกอบการบดบังที่ระยะบดบังต่าง ๆ เทียบกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์ CFD แสดงได้ดังภาพที่ 16(a) สำหรับค่าตัวประกอบการบดบังของแรง IF_{Fx} และภาพที่ 16(b) สำหรับค่าตัวประกอบการบดบังของโมเมนต์ IF_{My}



5. สรุปผล

1. จากการวิเคราะห์ CFD ของอาคารเดี่ยวที่ไม่มีการบัดบังในหัวข้อที่ 2 พบว่าได้ผลใกล้เคียงกับผลงานวิจัยในอดีต ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมที่กระทำต่ออาคารในทิศทางหลัก มีค่าใกล้เคียงอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ค่าความเร็วลมที่ต่างกันให้ผลการตอบสนองอาคารต่างกัน การเคลื่อนตัวในทิศทางตามกระแสลมจะมีค่าลดลงตามระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น และมีค่าแอมพลิจูดของในทิศทางหลัก มีค่าใกล้เคียงอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ค่าความเร็วลมที่ต่างกันให้ผลการตอบสนองอาคารต่างกัน การเคลื่อนตัวในทิศทางตามกระแสลมจะมีค่าลดลงตามระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น และมีค่าแอมพลิจูดของการตอบสนองสูงขึ้นตามค่าความเร็วลมเฉลี่ยหรือค่าความเร็วลมลดรูป (Reduced Velocity) ที่เพิ่มขึ้น การเคลื่อนตัวในทิศทางตั้งฉากกับกระแสลมมีค่าน้อย แต่หากความเร็วลมหรือความเร็วลมลดรูปมีค่าความเร็วที่ทำให้อาคารเกิดการสั่นไหวด้วยความถี่ใกล้เคียงกับความถี่ธรรมชาติของอาคารจะทำให้เกิดพฤติกรรม lock-in ซึ่งอาคารจะสั่นไหวเพิ่มขึ้นอย่างรุนแรง เนื่องจากเกิดการสั่นพ้อง (Resonance) กับความถี่ธรรมชาติของอาคาร

2. จากผลการวิเคราะห์ความดันลมด้านหน้าอาคารหลักกรณีที่มีอาคารบัดบัง พบว่า เมื่อค่าระยะห่างการบัดบังไร้หน่วย, $u = x/L$, ประมาณ 11 ขึ้นไป ค่าความดันด้านหน้าอาคารหลักค่อนข้างใกล้เคียงกับค่าของกรณีที่ไม่มีอาคารบัดบัง (Isolate) และพบว่ายิ่งความสูงของอาคารที่มาบัดบัง (H_2) ลดลง

ค่าแรงดันลมด้านหน้าของอาคารหลักที่ตำแหน่งสูงกว่าอาคารบัดบัง, H_2 , จะเข้าใกล้ผลของแรงดันลมหน้าอาคารหลักในกรณีที่ไม่มีอาคารบัดบัง (Isolate) ซึ่งแสดงว่าผลกระทบของแรงดันลมที่ด้านหน้าอาคารหลักจากอาคารที่บัดบัง ส่วนใหญ่จะเกิดในบริเวณที่ระดับความสูงต่ำกว่าค่าความสูงของอาคารที่มาบัดบัง (H_2)

3. จากผลการวิเคราะห์ค่าแรงเฉือนและโมเมนต์ที่ฐานของอาคารหลักในกรณีที่ถูกรัดบังอาคารอื่น บัดบังด้านหน้า ในรูปแบบของค่าตัวประกอบการบัดบัง (IF) พบว่าเมื่อระยะห่างการบัดบังไร้หน่วย, u , ประมาณ 20 ขึ้นไป ผลของการบัดบังหลังลมที่มีต่ออาคารหลักจะลดลงเหลือน้อยมาก ประมาณไม่ถึง 10% ของกรณีที่ไร้การบัดบัง (หากอาคารบัดบังสูงเท่ากับอาคารหลัก (ความสูงบัดบัง $H_2 = 1H$) ค่า IF ที่ระยะ u ใกล้สุดมีค่าประมาณ 0.9) นอกจากนี้ยังอาคารบัดบังเตี้ยลงเท่าไร ผลการบัดบังแรงลมที่มีต่อแรงเฉือนและโมเมนต์ที่ฐานอาคารหลักยิ่งน้อยลง และพบว่าค่าตัวประกอบการบัดบังของแรงเฉือนและโมเมนต์ที่ฐานอาคารหลักมีรูปแบบในลักษณะเดียวกัน

4. สมการเส้นตรงเพื่อประมาณค่าตัวประกอบการบัดบังของแรงเฉือนและโมเมนต์ที่ฐานอาคารสำหรับการบัดบังอาคารด้านหน้าที่ความสูงต่าง ๆ และระยะห่างอาคารต่าง ๆ จนถึงระยะ x_0 ดังแสดงใน สมการที่ (8) ซึ่งมีค่า R_2 ประมาณ 0.784 และ 0.571 ตามลำดับ ซึ่งถือว่าพอยอมรับได้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Huang S, Li Q S, and Xu S (2007). Numerical evaluation of wind effects on a tall steel building by CFD. *Journal of Constructional Steel Research*, 63: 612–627.
- [2] Braun A L, and Awruch A M (2009). Aerodynamic and aeroelastic analyses on the CAARC standard tall building model using numerical simulation. *Computers and Structures*, 87: 564–581.
- [3] Obasaju E D (1992). Measurement of forces and base overturning moments on the CAARC tall building model in a simulated atmospheric boundary layer. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 40: 103–126.
- [4] Thepmongkorn S (2004). High frequency force balance model tests for a prediction of wind-induced forces and responses of buildings. *The 9th National Convention on Civil Engineering*, Phetchaburi, pp.120-125.
- [5] Bairagi A K, and Dalui S K (2014). Optimization of Interference Effects on High-Rise Buildings for Different Wind Angle Using CFD Simulation. *Electronic Journal of Structural Engineering*, 14: 39-49.
- [6] Dalui S K, Kar R, and Hajra S (2015). Interference Effects on Octagonal Plan Shaped Tall building under Wind - A Case Study. *SCIENTIFIC COOPERATIONS WORKSHOPS ON ENGINEERING BRANCHES*, Istanbul.
- [7] Dagnew A K, and Bitsuamlak G T (2010). LES evaluation of wind pressures on a standard tall building with and without a neighboring building. *The Fifth International Symposium on Computational Wind Engineering*.
- [8] Dagnew A K, Bitsuamalk G T, and Merrick R (2009). Computational evaluation of wind pressures on tall buildings. *11th Americas Conference on Wind Engineering*, San Juan.
- [9] Desai A K, Sevalia J K, and Vasanwala S A (2014). Wind Interference Effect on Tall Building. *World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Civil, Environmental, Structural, Construction and Architectural Engineering*, 8: 656-662
- [10] Mittal A K, Ghosh D, Behera S, Siddiqui I A, and Dharmshaktu D S (2013). WIND FLOW SIMULATION IN THE VICINITY OF TALL BUILDINGS THROUGH CFD. *The Eighth Asia-Pacific Conference on Wind Engineering*, Chennai.



- [11] Kheyari P, and Dalui S K (2015). Estimation of Wind Load on a Tall Building under Interference Effects: A Case Study. Jordan Journal of Civil Engineering, 9.
- [12] Roy A K, Verma S K, Lather S, and Sooda M (2014). ABL airflow through
- CFD simulation on tall building of square plan shape. 7th National Conference on Wind Engineering, Patiala.
- [13] Commonwealth Advisory Aeronautical Research Council (CAARC). <https://uia.org/s/or/en/1100046837>

ผลกระทบจากการบดบังของอาคารคู่ต่อแรงดันลมที่กระทำต่ออาคารสูง โดยใช้โปรแกรมทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

Interference Effects of Double buildings on Wind Pressure Acting on a Tall Building Using CFD Software

มานพ เจริญยุทธ และ ทรงพล จารุวิศิษฐ์*

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

E-mail: manop_cha@hotmail.com, fengspc@ku.ac.th

* ผู้ประพันธ์บรรณกิจ (corresponding author)



บทคัดย่อ

การวิเคราะห์โครงสร้างภายใต้กระแสลมโดยใช้วิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics ,CFD) สำหรับกรณีศึกษาผลกระทบจากการบดบังของอาคารต่อแรงดันลมที่กระทำกับอาคารสูงยังมีน้อยมาก และมักทำการศึกษาการบดบังจากอาคารเดี่ยว อีกทั้งยังไม่ค่อยมีการศึกษาผลของบดบังต่อแรงกระทำที่ฐานอาคารซึ่งในทางปฏิบัติแล้วจะเป็นค่าหลักที่ใช้ในการคำนวณออกแบบอาคาร งานวิจัยนี้จึงได้จัดทำขึ้นเพื่อศึกษาผลกระทบต่อโครงสร้างอาคารสูงภายใต้แรงลมกรณีมีอาคารคู่บดบังด้านหน้า 2 อาคาร ซึ่งสนใจพิจารณาตัวแปรหลักคือ ระยะห่างการบดบังไร้หน่วย (u) อาคารคู่ด้านหน้าอาคารหลัก โดยใช้การวิเคราะห์ CFD จำลองอาคารคู่บดบังที่ระยะห่างต่าง ๆ จากอาคารหลัก โดยมีขนาดอาคารคู่บดบังที่เท่ากัน 3 ขนาดคือ ขนาดเล็ก กลาง และขนาดใหญ่ มีช่องว่างระหว่างอาคารบดบังเท่ากับขนาดความกว้างของอาคารหลัก เพื่อให้กระแสลมสามารถลอดผ่านทะลุไปปะทะกับอาคารหลักได้ และนำข้อมูลแรงดันลมและแรงกระทำที่ฐานอาคารหลักที่วิเคราะห์ได้ไปหาความสัมพันธ์ เพื่อสร้างสมการใช้ในการทำนายค่าแรงที่กระทำต่อฐานอาคาร ซึ่งจากผลการศึกษาพบว่า ผลการบดบังต่อแรงที่กระทำต่ออาคารหลักมีน้อยประมาณ 10% ที่ระยะห่างการบดบังไม่เกิน 1 เท่าของความกว้างอาคาร แต่เมื่อระยะห่างเพิ่มมากขึ้นผลของการบดบังต่อแรงที่กระทำต่ออาคารหลักจะเพิ่มมากขึ้น และส่งผลการบดบังสูงสุดที่ระยะห่างประมาณ $u = 11$ แล้วผลของการบดบังจึงค่อยๆ ลดลงเมื่ออาคารคู่บดบังอยู่ไกลออกไปและสำหรับการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ CFD เมื่อเทียบกับผลทดสอบอุโมงค์ลม ได้ค่าแตกต่างกันมากเนื่องจาก ในการทดสอบอุโมงค์ลมมีอาคารข้างเคียงเสมือนจริงอยู่จำนวนหลายอาคาร อีกทั้งมีอาคารเดี่ยวขนาดใหญ่ บดบังอยู่ด้านหน้า จึงทำให้ได้ผลค่าแรงเฉือนและโมเมนต์ที่ฐานอาคารแตกต่างกัน สำหรับผลการประมาณค่าแรงกระทำที่ฐานอาคารโดยใช้สมการค่าตัวประกอบการบดบังของแรงเฉือนและโมเมนต์



เมื่อเทียบกับผลการวิเคราะห์ด้วย CFD จะเห็นว่าการประมาณให้ค่าน้อยกว่าอยู่ 53% และ 56% ตามลำดับ และหากเทียบกับผลทดสอบอุโมงค์ลม การประมาณให้ค่าน้อยกว่าอยู่ 27% และ 38% ตามลำดับ

 **คำสำคัญ:** แรงลม; อาคารสูง; พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ; แรงกระทำที่ฐาน; โมเมนต์กระทำที่ฐาน

Abstract

There are only few studies of wind load using Computational Fluid Dynamics (CFD) to investigate interference effects on wind pressure acting on a tall building, and mostly only a single obstructing building is considered. Moreover studies of interference effects on base shear and base moment caused by wind are very rare. although they are practically main building design parameters. therefore, this research has been conducted to study interference effects of the in front obstructing double buildings on wind pressure acting on a tall building. The main concerned parameters consist of distance and position of those obstructing double buildings. The same size of 2 obstructing buildings (including, size of small, medium and large) are modelled at various distances in front and located symmetry along the horizontal axis perpendicular to the front surface of the main building with the equal space to the length of the main building along wind direction for allowing wind flow passing through to act on the main building and then analyzed using commercial CFD software. The obtained simulation results of wind pressure and wind forces acting on the main building are used to find the relationship for estimating the base shear and moment acting on the main building. From the study, if the reduced interference distance, u , less than 1, the interference by the obstructing buildings is small about 10%. But when the obstruct distance increases, the interference effects also increase and reach maximum of the reduced obstructing distance about 11. For u larger than 11, the interference effects decrease with the further obstructing distance. For comparison results of the simulation by CFD with the wind tunnel test, the obtained results are quite different since the wind tunnel test consists of more than 2 surrounding buildings and 1 large low rise neighbour building. For the prediction of base shear and moment acting on the main building caused by wind using the interference factors, the estimation gives smaller base shear and moment than those obtained from CFD simulation for about 53% and 56% respectively. And if compares with the wind tunnel test results, the estimation is about 27% and 38% lesser for base shear and moment respectively

Keywords: Wind load; high-rise building; Computational Fluid Dynamics; base shear; base moment

1. บทนำและการศึกษาวิจัยในอดีต

ที่ผ่านมาการศึกษาผลกระทบต่อแรงลมที่กระทำต่ออาคารหลักจากการบดบังด้านหน้าของอาคารหลักมีจำนวนน้อย อีกทั้งส่วนใหญ่เป็นการศึกษาการบดบังในลักษณะรูปแบบที่มีอาคารเดี่ยวบดบัง โดยอาจศึกษาผลกระทบเมื่อลมมีทิศทางตรงกันกับแนวบดบังหรืออาจทำมุมองศาต่าง ๆ แต่ยังไม่มีการศึกษาผลกระทบจากกรณีมีอาคารบดบังมากกว่า 1 อาคาร งานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาผลกระทบกรณีมีอาคารคู่บดบังที่มีความสูงเท่าอาคารหลักตั้งบดบังอยู่ด้านหน้าที่ระยะต่าง ๆ โดยมีตำแหน่งอาคารคู่บดบังที่สมมาตรกันและมีขนาดอาคารต่างกัน ด้วยการวิเคราะห์โดยใช้เทคนิคพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ เนื่องจากมีความสะดวกรวดเร็ว มีความยืดหยุ่นในการสร้างแบบจำลองสามารถปรับเปลี่ยนได้ง่าย ศึกษาตัวแปรพารามิเตอร์ได้หลายค่าพร้อม ๆ กัน แตกต่างจากการทดสอบด้วยอุโมงค์ลมที่มีข้อจำกัด และค่าใช้จ่ายสูง

ที่ผ่านมามีการนำพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณมาใช้หาค่าแรงดันที่รอบผิวอาคาร [1] สัมประสิทธิ์ของแรงลมและโมเมนต์สำหรับอาคารเดี่ยวโดยเลือกใช้แบบจำลองความปั่นป่วนขนาดใหญ่ (Large Eddy Simulation (LES)) ซึ่งพบว่าแบบจำลอง LES ให้ผลแรงลมที่กระทำกับตึกสูงเป็นที่น่าพอใจ โดยการใช้เทคนิค CFD นี้ถือได้ว่าเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสำหรับวิศวกรผู้ออกแบบ ทำให้สามารถประเมิน

ผลกระทบของแรงลมที่กระทำกับอาคารได้ อย่างไรก็ตามยังไม่มีการศึกษาเป็นค่าแรงลัพท์กระทำที่ฐานอาคาร (Base shear and moment) ต่อมาได้มีการศึกษาโดยใช้การจำลองขนาดอาคารสูงตามมาตรฐาน CAARC [2-4] อาคารซึ่งมีขนาดความสูง (H) = 180 เมตร, ยาว (L) = 30 เมตร และกว้าง (w) = 45 เมตร และใช้การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค CFD โดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วนขนาดใหญ่ (Large Eddy Simulation Dynamic) เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ของแรง ค่าสัมประสิทธิ์ของแรงดันการเคลื่อนตัวของอาคาร โดยเทียบผลกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ที่ทำการทดสอบในอุโมงค์ลม และที่ใช้การจำลองเชิงตัวเลข พบว่าได้ผลสอดคล้องเป็นอย่างดี มีการศึกษาค่าแรงดันลมที่กระทำต่ออาคารสูงรูปทรงต่าง ๆ เช่น รูปทรงแปดเหลี่ยม [5] โดยมีทิศทางลมกระทำที่มุมต่าง ๆ วิเคราะห์โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ของแรงดันมากที่สุดเกิดขึ้นที่ด้านเหนือลม ส่วนด้านใต้ลมมีค่าสัมประสิทธิ์ของแรงดันติดลบ การศึกษาแรงดันลมที่กระทำต่ออาคารรูปทรงสูงเรียวยาวรูปรางไม้สม้าเสมอ [6] โดยใช้โปรแกรมทาง CFD ศึกษา ค่าสัมประสิทธิ์แรงดันลมที่ความสูง 165 เมตร พบว่ามีค่าใกล้เคียงกับการศึกษาก่อนหน้านี้เป็นอย่างดี ได้เริ่มมีการศึกษาค่าแรงเฉือนและโมเมนต์กระทำที่ฐานอาคาร (Base shear and Moment)

จากผลของแรงลมที่กระทำต่ออาคารสูง [7] โดยใช้โปรแกรมทาง CFD เพื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณออกแบบตามมาตรฐาน AS 1170.2 พบว่าได้ค่าแรงเฉือนที่ฐาน (Base Shear) และโมเมนต์ (Base Moment) น้อยกว่าค่าที่คำนวณตามมาตรฐาน AS 1170.2 ประมาณ 18% และ 19% ตามลำดับ

มีการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์แรงลมและแรงลาก (Drag force) ที่กระทำต่ออาคารสูงรูปร่างต่าง ๆ 7 รูปแบบ [8] โดยแต่ละแบบมีพื้นที่หน้าตัดเท่ากัน วิเคราะห์ด้วยโปรแกรมทาง CFD พบว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงลมมีค่ามากที่สุดเมื่ออาคารมีหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสและมีค่าน้อยสุดเมื่อหน้าตัดอาคารเป็นรูปวงกลม ส่วนแรงลากที่กระทำมีค่ามากที่สุดเมื่ออาคารมีหน้าตัดรูปกากบาท และมีค่าน้อยสุดเมื่อมีหน้าตัดอาคารเป็นรูปวงกลม และมีการศึกษาแรงดันลมที่กระทำต่ออาคารสูงรูปสี่เหลี่ยม [9] วิเคราะห์ด้วยโปรแกรมทาง CFD โดยเปรียบเทียบกับค่าแรงดันลมที่คำนวณตามมาตรฐาน Eurocode, ASCE 7-05 และ AS/NZS 1170.2-02 พบว่าค่าแรงดันลมที่ยอดอาคารจากมาตรฐานทั้ง 3 และค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ CFD มีค่าใกล้เคียงกัน

ในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลกับงานวิจัยในอดีต เพื่อเป็นการตรวจสอบความถูกต้องของการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมทาง CFD ที่ใช้ และเพื่อศึกษาถึงพฤติกรรมของแรงลมที่เกิดขึ้น ในส่วนของการศึกษาผลกระทบจากการมีอาคารมาบดบังกระแสลม ได้มีการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์ของแรงดันลมกรณีของอาคารเดี่ยวบดบังอาคารสูง [10, 11] กับระยะห่างระหว่างอาคารที่เพิ่มมากขึ้น

และผลของทิศทางลมที่แตกต่างกัน ซึ่งพบว่า กรณีที่แรงลมกระทำในทิศทาง 0° (ขนานกับตัวอาคารหลักและอาคารที่บดบัง) จะต้องมียะห่างระหว่างอาคารมากถึง 56 เท่าของความกว้างอาคาร จึงจะไม่มีผลกระทบจากการบดบังอาคาร ส่วนกรณีที่แรงลมกระทำในทิศทาง 90° (ตั้งฉากกับแนวอาคารหลักและอาคารบดบัง) จะต้องมียะห่างระหว่างอาคารประมาณ 10 เท่าของความยาวอาคาร จึงจะไม่มีผลกระทบจากตำแหน่งของอาคารข้างเคียงต่อแรงลมที่กระทำกับอาคารหลัก อย่างไรก็ตามยังไม่มีผลการศึกษาของค่าแรงกระทำที่ฐานอาคาร

มีการศึกษาค่าแรงดันลมที่กระทำต่ออาคารสูง โดยทดสอบอุโมงค์ลมเปรียบเทียบกับกรณีวิเคราะห์ด้วย CFD [12-14] โดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วนขนาดใหญ่ (Large Eddy Simulation Dynamic) อุโมงค์ลมที่ใช้ในการทดสอบมีความกว้าง 2.59 เมตร, สูง 2.13 เมตร และแบบจำลองอาคารลดขนาด 1:400 จากอาคารจริงที่มีขนาดกว้าง 30.48 เมตร, ยาว 45.72 เมตร และสูง 182.88 เมตร ความเร็วลมเฉลี่ยที่ใช้ในการทดสอบคือ 12.12 เมตร/วินาที โดยทำการทดสอบ 3 กรณีคือ 1. อาคารเดี่ยว ไม่มีอาคารอื่นกีดขวาง 2. มีอาคารกีดขวางขนาดความสูงเท่ากัน และ 3. มีอาคารกีดขวางขนาดความสูงครึ่งหนึ่งของอาคารหลัก ผลการวิจัยพบว่าผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมและผลการทดสอบอุโมงค์ลมมีความสอดคล้องเป็นอย่างดี โดยมีค่าแตกต่างกันมากที่สุดประมาณ 16%

จากงานวิจัยในอดีตต่าง ๆ ที่นำเสนอ จะสังเกตได้ว่ายังไม่ค่อยมีงานวิจัยที่พิจารณาค่าแรงเฉือนและ

โมเมนต์พื้นฐานของอาคารหลัก ซึ่งปกติแล้วจะเป็นค่าแรงสำคัญในการออกแบบอาคารเป็นลำดับแรก ๆ และสามารถนำไปเปรียบเทียบกับผลของการทดสอบอุโมงค์ลมได้โดยตรง รวมถึงผลกระทบจากการบดบังอาคารด้วยอาคารบดบังมากกว่า 1 อาคาร งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นศึกษาผลกระทบของการบดบังกระแสลมที่กระทำต่ออาคารหลักจากอาคารคู่ที่ตั้งบดบังด้านหน้าแบบสมมาตรซึ่งมีความสูงเท่ากันและมีระยะห่างอาคารคู่ที่เป็นช่องทางให้ลมผ่านเข้าปะทะกับอาคารหลักเท่ากับขนาดหน้ากว้างปะทะลมของอาคารหลัก โดยสนใจพิจารณาปัจจัยของตำแหน่งการบดบังที่ระยะห่างต่าง ๆ จากระยะใกล้ 1 เท่าของขนาดอาคารหลัก จนถึงระยะไกลประมาณ 2 กิโลเมตรจากอาคารหลัก และปัจจัยของขนาดอาคารคู่ที่บดบังตั้งแต่ขนาดเล็ก กลาง และขนาดใหญ่

2. การทดสอบความถูกต้องของโปรแกรมสำเร็จรูปทาง CFD

งานวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์ CFD ด้วยโปรแกรม Ansys CFX version 17.1 ซึ่งได้ทำการทดสอบความถูกต้องของโปรแกรมโดยเทียบผลการวิเคราะห์กับผลของงานวิจัยในอดีตที่เป็นการวิเคราะห์แรงลมที่กระทำต่ออาคารสูงเดี่ยวอาคารเดี่ยวทั้งการทดสอบอุโมงค์ลมและการวิเคราะห์ simulation [1] ดังแสดงผลในตารางที่ 1, 2 และภาพที่ 1 ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ของแรงลมที่กระทำต่ออาคารแบบจำลองตามมาตรฐาน CAARC ที่ได้จากการวิเคราะห์ CFD กับผลจากงานวิจัยในอดีต [1-3] พบว่าค่าแรงหลักที่กระทำ

ต่ออาคารซึ่งประกอบด้วยแรง F_x และ M_y มีค่าแตกต่างจากงานวิจัยในอดีตประมาณ 1-19% สำหรับสัมประสิทธิ์แรงในแนวแกน x และประมาณ 19-28% สำหรับสัมประสิทธิ์ของโมเมนต์รอบแกน y (C_{My}) ในขณะที่ค่าสัมประสิทธิ์ของแรงในแนวแกน y (C_{Fy}) และ ค่าสัมประสิทธิ์ของโมเมนต์รอบแกน x (C_{Mx}) ซึ่งเป็นค่าแรงในแนวแกนรองจะมีค่าน้อยมาก ทำให้ไม่เหมาะกับการเปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนเป็นเปอร์เซ็นต์ซึ่งจากการเปรียบเทียบจะเห็นได้ว่ามีผลสอดคล้องกับผลของงานวิจัยในอดีต สำหรับค่าสัมประสิทธิ์แบบ rms พบว่ามีค่าน้อยมากเช่นเดียวกัน เนื่องจากการวิเคราะห์กรณีกระแสลมกระทำต่ออาคารเดี่ยว ความปั่นป่วนของกระแสลมจะมีค่าน้อยมาก ทั้งนี้ในการวิเคราะห์ข้อมูล จะตัดข้อมูลช่วง 50 วินาทีแรกออก เนื่องจากเป็นสภาวะที่อาคารเริ่มถูกแรงลมกระทำเข้าโดยตรงจากภาวะหยุดนิ่ง จึงมีความผันผวนของข้อมูลมาก ไม่ใช่ข้อมูลที่ต้องการพิจารณา

ตารางที่ 1 ค่าสัมประสิทธิ์ของแรง

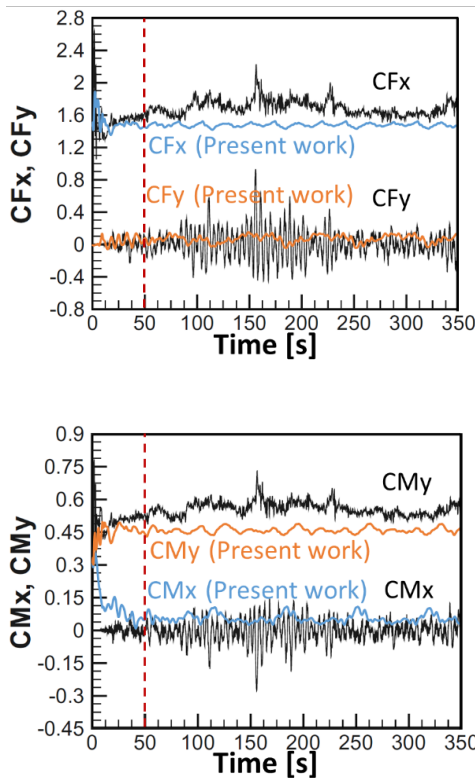
งานวิจัยที่เปรียบเทียบ	C_{Fx}	Error (C_{Fx})	$C_{\sigma Fx}$	C_{Fy}	$C_{\sigma Fy}$
Braun A.L., Awruch A.M. [2]	1.660	11%	0.076	0.008	0.106
Obasaju [3] – smooth flow	1.490	0.94%	0.060	0.093	0.092
Huang et al. [1] – low turbulence	1.830	19%	0.060	0.006	0.134
Present work (time> 50 s.)	1.476		0.017	0.078	0.027

* ค่า error เทียบกับผลที่ได้จากงานวิจัยนี้ = (ค่าอ้างอิง-ค่าจากงานวิจัยนี้)/ค่าอ้างอิง

ตารางที่ 2 ค่าสัมประสิทธิ์ของโมเมนต์

งานวิจัยที่เปรียบเทียบ	C_{Mx}	$C_{\sigma Mx}$	C_{My}	Error (C_{My})	$C_{\sigma My}$
Braun A.L., Awruh A.M. [2]	0.004	0.048	0.570	19.3%	0.038
Obasaju [3] – smooth flow	0.000	0.043	0.640	28%	0.030
Present work (time > 50 s.)	0.052	0.017	0.460		0.012

* ค่า error เทียบกับผลที่ได้จากงานวิจัยนี้ = (ค่าอ้างอิง-ค่าจากงานวิจัยนี้)/ค่าอ้างอิง



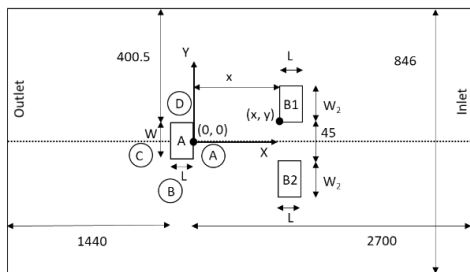
ภาพที่ 1 ประวัติเวลาค่าสัมประสิทธิ์ของแรงและโมเมนต์ที่กระทำต่ออาคารเดี่ยว จากการวิเคราะห์ CFD ของงานวิจัยนี้และงานวิจัยในอดีต [2]

3. การสร้างแบบจำลองอาคารหลักและอาคาร

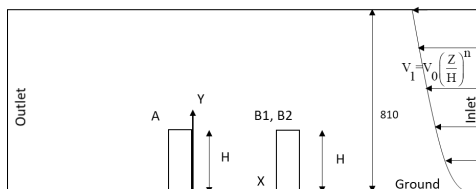
บัดบัง 2 อาคาร

การจำลองอาคารในโปรแกรม Ansys CFX version 17.1 ใช้แบบจำลองอาคารสูงขนาด 1:1 โดยอาคารหลักเรียกแทนว่า อาคาร A ใช้ทำการศึกษาค่าแรงลมที่กระทำต่ออาคาร มีขนาดตามมาตรฐาน CAARC ความสูง (H) = 180 เมตร, กว้าง (W) = 45 เมตร และยาว (L) = 30 เมตร ส่วนอาคารคู่ที่มาบัดบังกระแสนลมด้านหน้าทั้ง 2 อาคาร ดังแสดงในภาพที่ 2 เรียกแทนว่า อาคาร B1 และ B2 ซึ่งทั้ง 2 อาคารมีขนาดเท่ากัน ตั้งอยู่ห่างระหว่างกัน 45 เมตร ซึ่งเป็นช่องว่างขนาดเท่าหน้ากว้างของอาคาร A ที่กระแสนลมสามารถทะลุผ่านเข้าปะทะกับอาคาร A ได้ และอาคารคู่บัดบังมีความสูงเท่ากับอาคารหลัก (อาคาร A) แต่ทำการศึกษาผลของขนาดอาคารคู่ที่แตกต่างกัน 3 คู่อาคาร ได้แก่ 1. อาคารคู่เล็ก (S) กว้าง (W_2) = 45 เมตร, ยาว (L) = 30 เมตร (เท่ากับขนาดอาคาร A) 2. อาคารขนาดคู่กลาง (M) กว้าง (W_2) = 60 เมตร, ยาว (L) = 30 เมตร และ 3. อาคารขนาดคู่ใหญ่ (L) กว้าง (W_2) = 90 เมตร, ยาว (L) = 30 เมตร ตำแหน่งของคู่อาคาร B1 และ B2 ที่บัดบังด้านหน้าอาคาร A ที่ตำแหน่งระยะห่าง x ต่างๆ ดังแสดงค่าในตารางที่ 3 โดยกำหนดค่าพิกัด (0,0) ที่ตำแหน่งกึ่งกลางริมด้านหน้าของอาคาร A แกน x คือแกนในแนวนอนที่ลากผ่านกึ่งกลางอาคาร A และแกน y คือแกนในแนวตั้งที่ขนานกับด้านหน้าอาคาร A ให้ระยะ x คือระยะห่างวัดตั้งฉากจากขอบอาคาร A ไปยังขอบอาคารคู่บัดบัง B1 และ B2 ที่ใกล้ที่สุด

นิยามค่า $u = x/L$ คือระยะห่างวัดเป็นจำนวนเท่าของขนาดอาคารหลัก (A) ในแนวของค่าระยะห่าง (L) โดยการวิเคราะห์ CFD อยู่ภายในขอบเขต Computational domain ขนาดความสูง 810 เมตร กว้าง 846 เมตร และยาว 4,170 เมตร ดังแสดงรายละเอียดตำแหน่งแบบจำลองอาคารและขนาดขอบเขตการวิเคราะห์ในภาพที่ 2 จากกรณีศึกษาของระยะห่างการบังที่ระบุในตารางที่ 3 จำนวน 17 กรณี และขนาดอาคารคู่บัง 3 ขนาด ทำให้รวมมีกรณีศึกษาทั้งสิ้น 51 กรณี เพื่อทำการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์แรงดันลมรอบอาคารหลัก (ด้านหน้า, A; ด้านข้าง, B และ D; ด้านหลัง, C) (C_p) และค่าแรงกระทำที่ฐานอาคารหลัก ซึ่งประกอบด้วยแรงเฉือนที่ฐานอาคาร (Base Shear) และโมเมนต์ที่ฐานอาคาร (Base Moment)



a) ภาพ plan อาคาร



b) ภาพ elevation อาคาร

ภาพที่ 2 ขนาดของแบบจำลองอาคารและขอบเขตการจำลองที่ทำการศึกษา (หน่วย: เมตร)

ตารางที่ 3 กรณีศึกษาตำแหน่งระยะห่าง (x) ของอาคารบดบังกับอาคารหลัก

กรณี	x (m)	u = x/L
1	30	1
2	90	3
3	150	5
4	240	8
5	330	11
6	420	14
7	510	17
8	660	22
9	810	27

กรณี	x (m)	u = x/L
10	960	32
11	1110	37
12	1260	42
13	1410	47
14	1560	52
15	1710	57
16	1860	62
17	2010	67

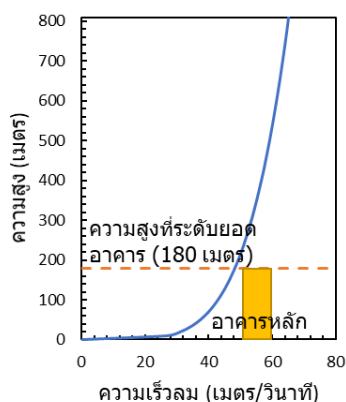
4. คุณสมบัติแบบจำลอง CFD กระแสลม

กระแสลมที่ใช้ในการวิเคราะห์ CFD เป็นแบบชั้นขอบเขตความเร็ว (boundary layer velocity profile) เพื่อให้ใกล้เคียงกับสภาพความเป็นจริงโดยให้เป็นไปตามสมการกฎของกำลัง (Power law) ดังแสดงในสมการที่ (1)

$$V_{(Z_1)} = V_{(H)} \left(\frac{Z_1}{Z_2} \right)^\alpha \quad (1)$$

เมื่อ $V_{(Z_1)}$ คือ ความเร็วลมเฉลี่ยที่ระดับความสูง Z_1 , $V_{(H)}$ คือ ความเร็วลมเฉลี่ยที่ระดับความสูงยอดอาคาร (180 เมตร) ซึ่งใช้เป็นค่าระดับความสูงอ้างอิง, α คือ ค่าคงที่ซึ่งขึ้นกับลักษณะพื้นผิวและภูมิประเทศ โดยใช้ค่า $\alpha = 0.2$ และมีค่าคงที่ทางกายภาพของมวลอากาศดังนี้ Dynamic viscosity 7.03×10^{-2} นิวตัน-วินาที/ตร.ม., Specific mass 1.25 กก./ลบ.ม. และความเร็วลมเฉลี่ยที่ระดับ

ยอดอาคาร (180 เมตร) อ้างอิงจากค่าความเร็วลมเฉลี่ยไร่หน่วย = 6 ซึ่งมีค่าความเร็วลมเฉลี่ย = 48.27 เมตรต่อวินาที เนื่องจากเป็นค่าความเร็วลมเฉลี่ยที่ใกล้เคียงกับค่าความเร็วลมสูงสุดที่ใช้ในการคำนวณแรงลมตามมาตรฐานของประเทศไทย (มยพ. 1311-50) ซึ่งกำหนดค่าความเร็วลมเฉลี่ยสูงสุดในการคำนวณ = 29 เมตรต่อวินาที (ค่าในกลุ่มที่ 3 ตามแผนที่การแบ่งกลุ่มความเร็วลมอ้างอิงในมาตรฐาน) คุณขยายด้วยค่าตัวประกอบได้ฝุ่น 1.2 จะคำนวณได้ค่าความเร็วลมเฉลี่ยไร่หน่วยเท่ากับ 4.33 จึงเลือกทำการวิเคราะห์ที่ค่าความเร็วลมเฉลี่ยไร่หน่วย = 6 ในงานวิจัย โดยสามารถแสดงค่าความเร็วลมเฉลี่ยที่ระดับความสูงต่างๆ (Velocity Profile) ดังในภาพที่ 3 และใช้แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ Large Eddy Simulation (LES) จำลองมวลอากาศด้วยเอลิเมนต์แบบ tetrahedral จำนวนทั้งสิ้นประมาณ 584,823 ชิ้นส่วน ซึ่งให้ผลการวิเคราะห์เป็นที่น่าพอใจและอยู่ในเกณฑ์ยอมรับได้สำหรับการวิเคราะห์ด้วย CFD โดยอ้างอิงจากผลของงานวิจัยในอดีต [1]



ภาพที่ 3 ความเร็วลมที่ระดับความสูงต่าง ๆ (Velocity Profile)

เงื่อนไขขอบเขตมีผลโดยตรงต่อการศึกษาพฤติกรรมของไหล การกำหนดเงื่อนไขให้สอดคล้องกับสถานะปัญหาการไหลจริงย่อมทำให้การใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขเพื่อศึกษาพฤติกรรมปัญหาของการไหลมีประสิทธิภาพมากขึ้น ประเภทเงื่อนไขของขอบเขตในงานวิจัยนี้ได้กำหนดให้ใกล้เคียงกับความเป็นจริงตามธรรมชาติคือ กำหนดให้มีแรงลมเข้าจากทางด้านหน้าอาคารในลักษณะของความเร็วลมเฉลี่ยแปรผันตามความสูง $(V_{(0)} - V_{(180)})$ ไหลผ่านอาคารออกไป โดยกำหนดเงื่อนไขขอบเขตแรงดันที่จุดไหลออกเท่ากับศูนย์ ส่วนด้านข้างของขอบเขตแบบจำลองได้กำหนดให้มีความเร็วลมเฉลี่ยเช่นเดียวกับทางเข้า ในการวิเคราะห์ CFD ใช้ค่าระยะห่างในเวลาคำนวณ $(Dt) = 0.1$ วินาที และใช้ระยะเวลาในการวิเคราะห์ simulation ทั้งหมดยาว 350 วินาที

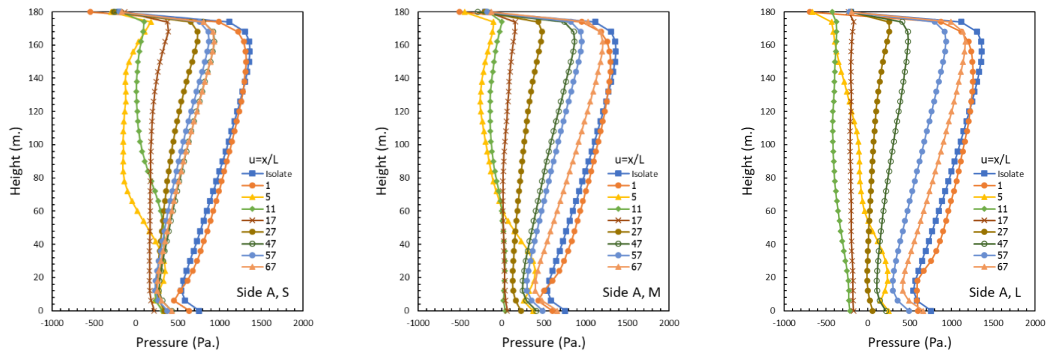
5. ผลการวิเคราะห์ CFD ในกรณีที่มีอาคารคู่บดบัง กระแสลมที่กระทำกับอาคารหลัก

5.1. ค่าแรงดันลม (Pressure) ที่กระทำต่ออาคารหลัก

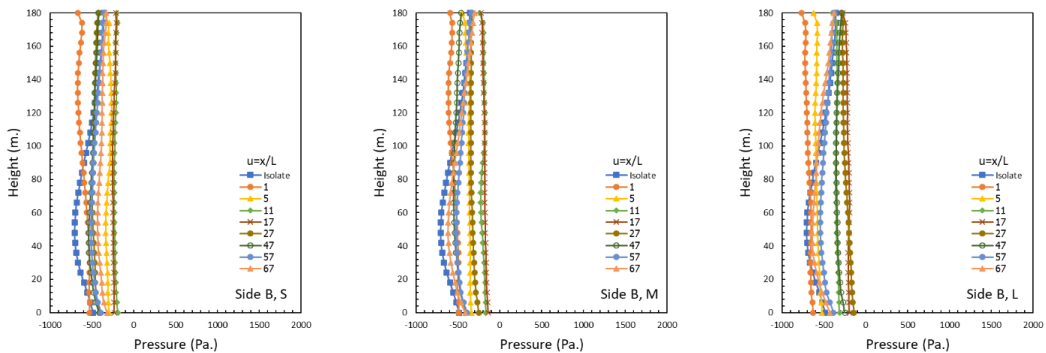
ภาพที่ 4 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าแรงดันลมที่กระทำต่ออาคารหลักบริเวณตำแหน่งกึ่งกลางด้านหน้าของอาคาร สำหรับกรณีการวิเคราะห์ที่ไร้อาคารบดบัง (กรณี isolate) และกรณีที่ถูkbดบังด้วยอาคารคู่ด้านหน้าขนาด S, M, L ที่มีระยะห่างการบดบังไร่หน่วย, $u = x/L$, 1, 5, 11, 17, 27, 47, 57, 67 เท่าของขนาดอาคารหลัก โดยค่าแกน y เป็นความสูงของอาคารที่ทำการศึกษา และค่าแกน x เป็นค่าแรงดัน (Pressure) จากการวิเคราะห์พบว่า

เมื่อระยะห่างการบังรัหน่วย, u , ประมาณ ≤ 1 ไม่ว่าอาคารคู่บังจะมีขนาดเล็กหรือใหญ่แรงดันลมด้านหน้ามีค่าใกล้เคียงกรณีที่ไม่มีการบังอาคาร และจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นจากระดับพื้นดินจนถึงระดับ

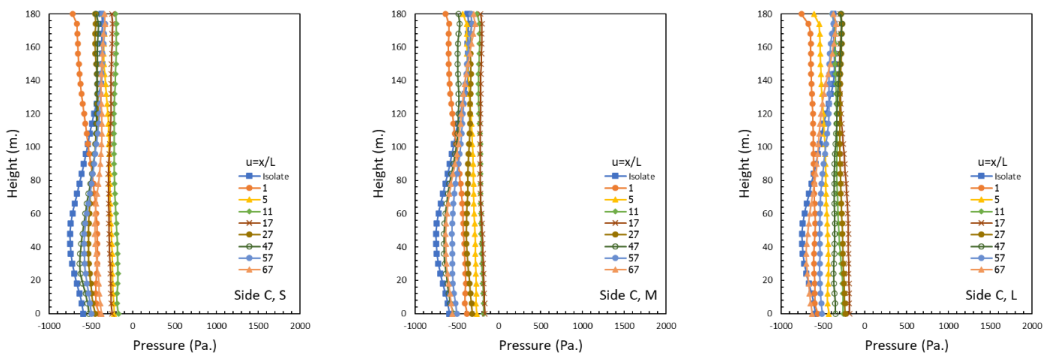
ความสูงประมาณ 160 เมตร แล้วแรงดันลมจึงค่อยๆ ลดลง โดยแรงดันลมส่วนใหญ่จะเป็นแรงผลักเข้าหาอาคาร (มีค่าเป็นบวก) ยกเว้นที่จุดยอดอาคารที่มีค่าแรงดันเป็นลบ (แรงดูดพุ่งออกจากอาคาร)



a) แรงดันลมที่ผิวด้าน A ของอาคารหลัก (ซ้าย: อาคารบังขนาด S, กลาง: ขนาด M, ขวา: ขนาด L)



b) แรงดันลมที่ผิวด้าน B ของอาคารหลัก (ซ้าย: อาคารบังขนาด S, กลาง: ขนาด M, ขวา: ขนาด L)



c) แรงดันลมที่ผิวด้าน C ของอาคารหลัก (ซ้าย: อาคารบังขนาด S, กลาง: ขนาด M, ขวา: ขนาด L)

ภาพที่ 4 แรงดันลม (Pressure) บริเวณกึ่งกลางด้านหน้าอาคารหลักที่ความสูงต่างๆ ของอาคาร

และเมื่อระยะห่างการบัดบังไร้หน่วย, u , เพิ่มมากขึ้น ที่ประมาณ 5, 11 และ 17 เท่าของขนาดอาคารหลัก ค่าแรงดันลมที่ผิวด้านหน้าอาคารจะมีค่าน้อยและเมื่อค่า u เพิ่มขึ้นที่ประมาณ 27 – 67 ค่าแรงดันลมที่ผิวด้านหน้าอาคารจะเพิ่มมากขึ้น ซึ่งหมายถึงอาคารคู่บัดบังอยู่ไกลมากขึ้น ผลกระทบของการบัดบังกระแสลมจึงลดลง แต่อย่างไรก็ตามยังคงมีผลการบัดบังของกระแสลมอยู่บ้างไม่หมดไป แรงดันลมที่ผิวด้านหน้าอาคารจึงยังน้อยกว่ากรณีที่ไม่อาคารบัดบัง โดยเมื่ออาคารคู่บัดบังมีขนาดเล็ก จะส่งผลการบัดบังกระแสลมน้อยกว่ากรณีของอาคารคู่บัดบังที่มีขนาดใหญ่กว่า โดยสังเกตได้จากค่าแรงดันลมกรณีของอาคารคู่บัดบังขนาด S จะมีค่ามากกว่าแรงดันลมของกรณีอาคารคู่บัดบังขนาด M และ L ตามลำดับ

สำหรับแรงดันลมทางด้านข้าง (ด้าน B) และด้านหลัง (ด้าน C) ของอาคารหลัก พบว่าแรงดันมีค่าเป็นแรงดันลบทั้งหมดแต่จะมีค่าแรงดันต่างกันเล็กน้อยตามระยะห่างการบัดบังไร้หน่วยต่างๆ นอกจากนั้นพบว่าที่ระดับความสูงอาคารประมาณ 50 เมตร ค่าแรงดันลมที่ผิวด้านข้างและด้านหลัง

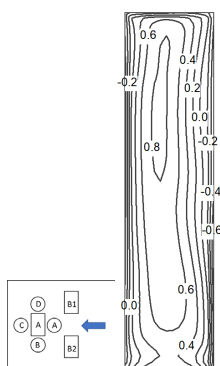
ของอาคารหลักของกรณีไร้การบัดบังจะเป็นแรงดูดสูงสุด และค่อย ๆ มีขนาดแรงดูดลดลงตามความสูงของอาคาร ยกเว้นในกรณีที่มีระยะห่างการบัดบังไร้หน่วย น้อย ๆ, $u = 1$, แรงดันลมที่ผิวด้านข้างและด้านหลังของอาคารหลัก จะมีค่าแรงดูดต่ำสุดที่ระดับความสูงน้อยสุดและค่อย ๆ เป็นแรงดูดมากขึ้นตามความสูงของอาคาร

5.2 ค่าสัมประสิทธิ์แรงดัน (C_p) รอบอาคาร

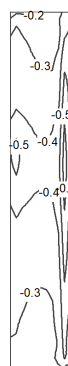
การเปรียบเทียบผลกระทบจากการบัดบังกระแสลมที่กระทำต่ออาคารหลัก จะใช้การพิจารณาจาก ค่าสัมประสิทธิ์แรงดันลม (C_p) ที่รอบผิวอาคาร นิยามด้วยค่าอัตราส่วนของค่าแรงดันลมที่จุดที่พิจารณาต่อค่าแรงดันลมที่ระดับยอดของอาคารโดยคำนวณค่าแรงดันลมตามสมการที่ 2

$$q = \frac{1}{2} \rho V^2 \quad (2)$$

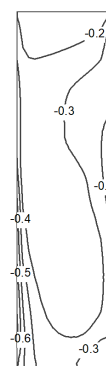
เมื่อ q = แรงดันลม มีหน่วยเป็น นิวตัน/ตร.ม.,
 ρ = ความหนาแน่นของมวลอากาศ = 1.25 กก./ลบ.ม.,
 V = ความเร็วลมเฉลี่ย มีหน่วยเป็น เมตรต่อวินาที



a) ด้าน A

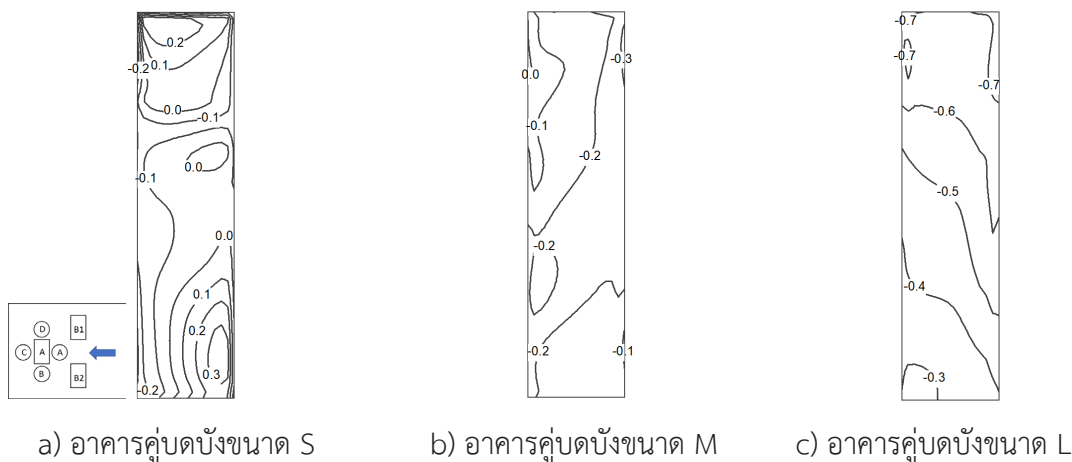


b) ด้าน B



c) ด้าน C

ภาพที่ 5 ค่า C_p ที่ผิวย่ออาคารหลัก ของอาคารคู่บัดบังขนาด S ที่ระยะห่างการบัดบังไร้หน่วย, u , = 3



ภาพที่ 6 ค่า C_p ที่ผิวด้าน A ของอาคารหลัก ที่ระยะห่างการบดบังไร้หน่วย, $u_r = 8$

ภาพที่ 5 แสดงตัวอย่างค่า C_p ที่ผิวรอบอาคารหลัก กรณีอาคารคู่ตึกขนาด S ที่ระยะห่างการบดบังไร้หน่วย, $u_r = 3$ ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่า C_p จะมีค่ามากที่สุดที่บริเวณด้านหน้าอาคาร (ด้าน A) และมีค่าสูงขึ้นตามความสูงของอาคาร สอดคล้องกับค่าความเร็วลมเฉลี่ยที่กระทำเข้าด้านหน้าของอาคารโดยตรง โดยมีค่าต่ำสุดที่ผิวดินและค่อยๆ เพิ่มขึ้นตามความสูง ส่วนด้านข้างและด้านหลังอาคาร (ด้าน B และ C) ค่า C_p จะน้อยกว่าด้าน A และมีค่าเป็นแรงดูด (แรงดันติดลบ) เนื่องจากทั้ง 2 ด้านไม่ใช่ด้านที่ปะทะแรงลมโดยตรง

ภาพที่ 6 แสดงตัวอย่างค่า C_p ที่ผิวด้าน A ของอาคารหลัก ที่ระยะห่างการบดบังไร้หน่วย, $u_r = 8$ ของกรณีอาคารคู่ตึกขนาดเล็ก กลาง และใหญ่ ซึ่งจะเห็นได้ว่ากรณีอาคารคู่ตึกขนาด S จะมีค่า C_p มากที่สุดที่บริเวณด้านล่างขวา ส่วนค่า C_p น้อยที่สุดที่บริเวณด้านล่างซ้าย และค่า C_p มากที่สุดมากกว่าของกรณีอาคารคู่ตึกขนาด M และ L

สำหรับกรณีอาคารคู่ตึกขนาด M จะเห็นได้ว่ามีค่า C_p มากที่สุดที่บริเวณด้านบนซ้าย ส่วนค่า C_p น้อยที่สุดที่บริเวณบนขวา และค่า C_p มากที่สุดมากกว่าของกรณีอาคารคู่ตึกขนาด L สำหรับกรณีคู่ตึกขนาด L จะเห็นได้ว่ามีค่า C_p มากที่สุดที่บริเวณด้านล่างซ้าย ส่วนค่า C_p น้อยที่สุดที่บริเวณบนซ้ายและขวา

ค่า C_p แสดงถึงค่าแรงดันลมที่กระทำบนผิวอาคาร ซึ่งจะมีค่าแตกต่างกันตามตำแหน่งบนพื้นผิวอาคาร เช่น ที่ระดับความสูงเดียวกันที่ริมขอบอาคารทางซ้ายหรือขวาหรือตรงกลางของพื้นผิว ดังนั้นเพื่อให้สามารถพิจารณาผลของค่า C_p เปรียบเทียบกับกรณีแบบจำลองอาคารบดบังขนาดและตำแหน่งต่าง ๆ ในที่นี้จึงเลือกพิจารณาค่า เฉลี่ยเป็นค่าเดียวในระดับความสูงหนึ่ง ๆ ของอาคารบนพื้นผิวในแต่ละด้าน

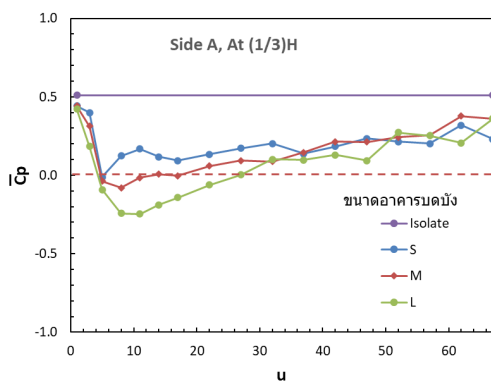
โดยได้ผลค่าสัมประสิทธิ์แรงดันลมเฉลี่ย ($\bar{C}_p$) ที่ระดับความสูง $(1/3)H$ และ $(2/3)H$ บนพื้นผิว



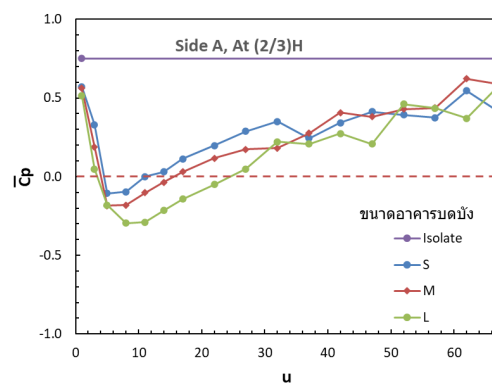
อาคารด้าน A, B และ C ดังแสดงในภาพที่ 7 และ 8 ตามลำดับ โดยค่าแกน x คือ ระยะห่างการบดบัง ไร้หน่วยแบบคิดเป็นจำนวนเท่าของอาคารหลัก, $u = x/L$, และแกน y คือ ค่าสัมประสิทธิ์แรงดันลมเฉลี่ย ($\bar{C}_p$) ทั้งนี้สำหรับด้าน D เป็นด้านข้างของอาคารหลักที่อยู่ตรงข้ามกับด้าน B ซึ่งเป็นด้านข้างอีกด้านของอาคาร ค่าสัมประสิทธิ์แรงดันลมเฉลี่ย ($\bar{C}_p$) ถือว่ามีค่าเหมือนกันกับค่าของทางด้าน B เนื่องจากอาคารคู่บดบัง B1 และ B2 ตั้งอยู่ในตำแหน่งที่สมมาตรกัน

ภาพที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างการบดบังไร้หน่วย, u , กับค่าสัมประสิทธิ์แรงดันลมเฉลี่ย ($\bar{C}_p$) ที่ระดับความสูง $(1/3)H$ ของอาคารหลัก พบว่า ที่ด้านหน้าของอาคารหลัก (ด้าน A) ค่า $\bar{C}_p$ จากอาคารคู่บดบังทั้ง 3 ขนาด ส่วนใหญ่จะอยู่ในช่วงค่าบวก คือ แรงกด (แรงพุ่งเข้าหาอาคาร) เพราะเป็นด้านที่รับแรงปะทะจากกระแสลมโดยตรง โดยมีค่าสูงสุดประมาณเท่ากับ 0.45 หมายความว่าที่ด้าน A มีค่าแรงดันลมเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 0.45 เท่าของค่าแรงดันลมที่ระดับยอดอาคาร โดยช่วงค่าระยะห่างการบดบังไร้หน่วย, u , = 1 ถึง 8 (ระยะห่างการบดบังไร้หน่วยที่ 1 ถึง 8 เท่าของขนาดความยาวอาคารหลัก) พบว่าเมื่ออาคารบดบังมีระยะห่างจากอาคารหลักมากขึ้น ค่า $\bar{C}_p$ จะค่อย ๆ ลดลง แต่เมื่อถึงช่วง

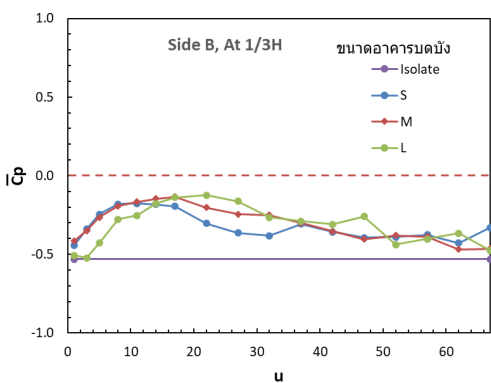
ค่า $u > 8$ ขึ้นไป ค่า $\bar{C}_p$ จะมีค่าค่อย ๆ เพิ่มขึ้นตามค่าระยะห่างการบดบังอาคารหลัก และมีข้อสังเกตว่า กรณีอาคารคู่บดบังขนาด L ที่ช่วงค่าระยะห่างการบดบังไร้หน่วย, $u = 5$ ถึง 22 ค่า $\bar{C}_p$ มีค่าเป็นลบ คือเป็นแรงดูด (แรงพุ่งออกจากอาคาร) ส่วนด้านข้างและด้านหลังของอาคารหลักคือด้าน B และ C พบว่าค่า $\bar{C}_p$ จากอาคารคู่บดบังทั้ง 3 ขนาด ติดลบซึ่งจะเป็นแรงดูดทั้งหมดเพราะเป็นด้านที่ไม่ได้รับแรงปะทะจากกระแสลมโดยตรง โดยมีค่า $\bar{C}_p$ ต่ำสุดประมาณเท่ากับ -0.5 และ -0.45 ที่ด้านข้าง (B) และด้านหลัง (C) ของอาคารหลักตามลำดับ ซึ่งหมายถึงมีค่าแรงดูดต่ำสุดเท่ากับ 0.45 ถึง 0.5 เท่าของค่าแรงดันที่ระดับยอดอาคาร โดยที่ช่วงค่าระยะห่างการบดบังไร้หน่วยประมาณ $u = 1$ ถึง 17 พบว่าค่า $\bar{C}_p$ จะค่อย ๆ เพิ่มขึ้น (ติดลบน้อยลง ซึ่งหมายถึงแรงดูดลดลง) จนมีค่าขนาดแรงดูดน้อยที่สุดประมาณ = -0.1 แต่เมื่อค่า $u > 17$ ขึ้นไป พบว่าค่า $\bar{C}_p$ มีค่าค่อย ๆ ลดลง (ติดลบมากขึ้นซึ่งหมายถึงแรงดูดเพิ่มขึ้น) ตามค่าระยะห่างการบดบังที่เพิ่มมากขึ้น จนมีค่าแรงดูดประมาณ -0.5 ของทั้ง 3 ขนาดอาคารคู่บดบัง สรุปจากค่า $\bar{C}_p$ ทั้ง 3 ด้านพบว่าได้ค่าไม่เกิน 0.5 เท่าของแรงดันที่ระดับยอดอาคาร โดยด้าน A ส่วนใหญ่จะเป็นแรงผลัก ส่วนด้าน B และ C จะเป็นแรงดูด



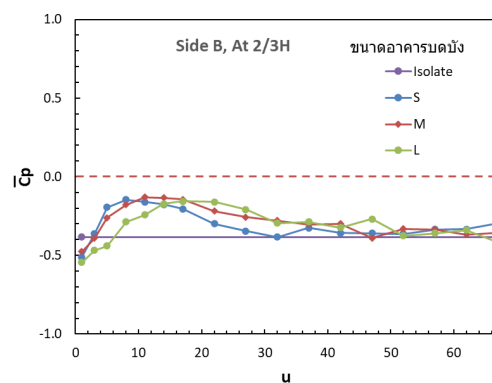
a) ด้าน A (ด้านหน้า)



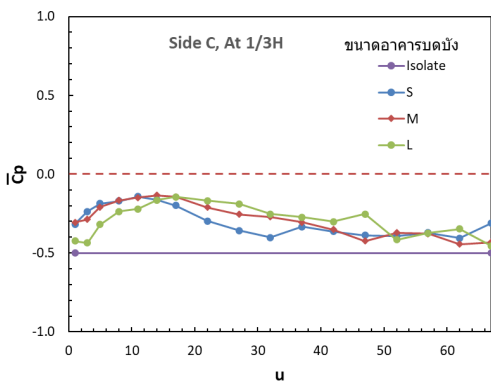
a) ด้าน A (ด้านหน้า)



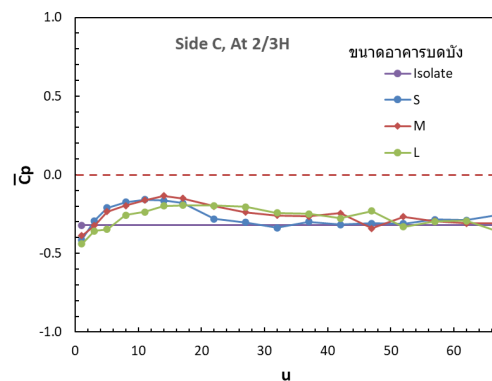
b) ด้าน B (ด้านข้าง)



b) ด้าน B (ด้านข้าง)



c) ด้าน C (ด้านหลัง)



c) ด้าน C (ด้านหลัง)

ภาพที่ 7 ค่าสัมประสิทธิ์แรงดันลมเฉลี่ย ($\bar{C}_p$)
ด้าน A, B, C ของอาคารหลัก
ที่ระดับความสูง (1/3)H

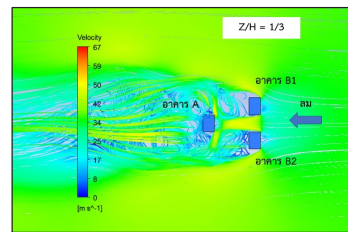
ภาพที่ 8 ค่าสัมประสิทธิ์แรงดันลมเฉลี่ย ($\bar{C}_p$)
ด้าน A, B, C ของอาคารหลัก
ที่ระดับความสูง (2/3)H

ภาพที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างการบัดบังไร้หน่วย, u กับค่าสัมประสิทธิ์แรงดันลมเฉลี่ย ($\bar{C}_p$) ที่ระดับความสูง $(2/3)H$ ของอาคารหลัก พบว่าที่ด้านหน้าของอาคารหลัก (ด้าน A) ค่าจากอาคารคู่บัดบังทั้ง 3 ขนาด ส่วนใหญ่จะอยู่ในช่วงค่าบวก คือ แรงผลัก โดยมีค่า $\bar{C}_p$ สูงสุดประมาณเท่ากับ 0.6 โดยที่ช่วงค่าระยะห่างการบัดบังไร้หน่วย, $u = 1$ ถึง 8 พบว่าค่า $\bar{C}_p$ จะค่อยๆ ลดลงตามระยะห่างที่เพิ่มมากขึ้น แต่เมื่อค่า $u > 8$ ขึ้นไป พบว่าค่าจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นตามค่าระยะห่างการบัดบังที่เพิ่มมากขึ้น และมีข้อสังเกตว่ากรณีอาคารคู่บัดบังขนาด L ที่ช่วงค่าระยะห่างการบัดบังไร้หน่วย, $u = 5$ ถึง 22 ค่า $\bar{C}_p$ มีค่าเป็นลบ คือเป็นแรงดูด ส่วนด้านข้างและด้านหลังของอาคารหลัก พบว่าผลของค่า $\bar{C}_p$ จากการบัดบังทั้ง 3 ขนาด มีลักษณะใกล้เคียงกับผลของ $\bar{C}_p$ ที่ระดับความสูง $(1/3)H$ โดยสำหรับกรณีค่า $\bar{C}_p$ ที่ระดับ $(2/3)H$ จะสูงกว่าค่า $\bar{C}_p$ ที่ระดับ $(1/3)H$ อยู่เล็กน้อย เนื่องจากเป็นตำแหน่งที่อยู่ระดับสูงกว่าจึงมีค่าความเร็วลมเฉลี่ยที่มากกว่า

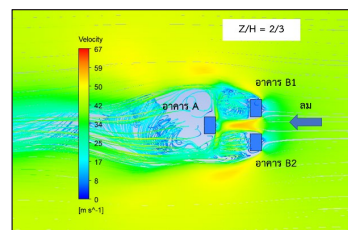
จากภาพที่ 7 และ 8 หากพิจารณาค่า $\bar{C}_p$ ที่ช่วงระยะห่างการบัดบังไร้หน่วย, $u = 8$ ถึง 32 ของด้าน A จะพบว่าค่า $\bar{C}_p$ จากกรณีอาคารคู่บัดบังทั้ง 3 ขนาด มีค่าแตกต่างกันอย่างชัดเจนคือ กรณีอาคารคู่บัดบังขนาด S จะมีค่า $\bar{C}_p$ เป็นบวก (แรงผลัก) และมากกว่ากรณีอาคารคู่บัดบังขนาด M และสำหรับกรณีอาคารคู่บัดบังขนาด L จะมีค่า $\bar{C}_p$ ติดลบ ทั้งนี้คาดว่ามีความเสี่ยงเนื่องจากขนาดของอาคารบัดบังที่แตกต่างกัน แม้ว่าช่องว่างระหว่างอาคารคู่บัดบังที่กระแสลมจะทะลุลอดผ่านได้จะเท่ากันก็ตาม แต่เมื่ออาคารคู่บัดบังมีขนาดใหญ่ กระแสลมที่ปะทะกับอาคารคู่บัดบังจะถูกเบี่ยงเบนออกด้านข้างไปก่อวนปะทะกับกระแสลมในส่วนที่จะลอดผ่านช่อง

ว่างได้น้อยลง จนถึงขั้นที่เกิดกระแสน้ำทำให้แรงดันที่ด้านหน้าอาคารหลักกลายเป็นแรงดูด (ติดลบได้) หากอาคารคู่บัดบังมีขนาดใหญ่มากพอ ดังแสดงตัวอย่างของกระแสลมรอบอาคารหลัก กรณีของอาคารคู่บัดบังขนาดต่างๆ ในภาพที่ 6 ซึ่งแสดงค่า C_p ที่ผิวด้าน A ของอาคารหลัก ที่ระยะห่างการบัดบังไร้หน่วย, $u = 8$ กรณีอาคารคู่บัดบังขนาดต่าง ๆ

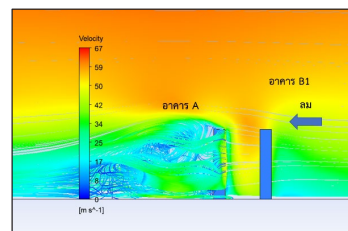
5.3 เส้นการไหลของกระแสลม (Stream line)



a) ภาพตัดในแนวระนาบนอนที่ตำแหน่งความสูง $(1/3)H$



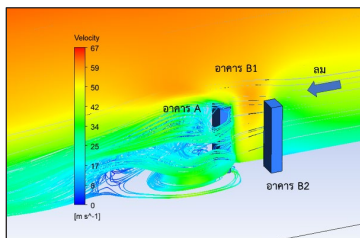
b) ภาพตัดในแนวระนาบนอนที่ตำแหน่งความสูง $(2/3)H$



c) ภาพตัดในแนวระนาบตั้งที่ตำแหน่งกึ่งกลางอาคารหลัก

ภาพที่ 9 เส้นการไหลของกระแสลมในกรณีที่มีอาคารคู่บัดบังด้านหน้าที่ระยะห่างการบัดบังไร้หน่วย, $u = 3$

ภาพที่ 9 แสดงภาพตัวอย่างลักษณะการไหลของกระแสลมด้วยเส้นการไหล Stream line ของกรณีศึกษาอาคารคู่ตบั้งขนาด S ที่ระยะห่างการตบั้งไร้หน่วย, $u = 3$, โดยภาพที่ 9(a) และ 9(b) แสดงภาพตัดในแนวระนาบนอนที่ตำแหน่งความสูง $(1/3)H$ และ $(2/3)H$ ตามลำดับ ส่วนภาพที่ 9(c) แสดงภาพตัดในแนวระนาบตั้งที่ตำแหน่งกึ่งกลางอาคารหลัก โดยในภาพกระแสลมไหลเข้าจากทางด้านขวามือของรูป ผ่านอาคารคู่ที่ตบั้งและอาคารหลัก แล้วไหลออกทางด้านซ้ายของรูป จะเห็นได้ว่าเมื่อกระแสลมไหลปะทะเข้ากับอาคารคู่ที่ตบั้งและอาคารหลัก จะเกิดการเลี้ยวเบนออกแล้วไหลผ่านทางด้านข้างของอาคาร เกิดเป็นกระแสรอบกวนอยู่บริเวณด้านข้างและหลังอาคารทั้งของอาคารคู่ตบั้งและอาคารหลัก ซึ่งทำให้โครงสร้างอาคารเกิดการสั่นไหวทั้งในแนวทิศทางตามกระแสลมและตั้งฉากกับกระแสลม และเมื่อพิจารณาจากภาพตัดในแนวระนาบตั้งของกระแสลมที่กระทำต่ออาคารหลัก จะเห็นได้ว่าทางด้านหน้าของอาคารที่ระดับความสูงต่ำ ๆ กระแสลมจะพยายามวนกลับเมื่อปะทะอาคาร ส่วนที่ระดับความสูงอาคารสูง ๆ กระแสลมจะพยายามไหลข้ามอาคารไป ส่วนทางด้านหลังของอาคาร กระแสรอบกวนจะมีขนาดใหญ่ขึ้นตามความสูง และภาพที่ 10 แสดงเส้นทางการไหลของกระแสลมในแบบภาพ 3 มิติ



ภาพที่ 10 เส้นกระแสการไหลของลมใน 3 มิติ

5.4 แรงกระทำที่ฐานอาคารหลัก

เพื่อศึกษาเปรียบเทียบแรงกระทำที่ฐานอาคารหลัก ซึ่งประกอบด้วยแรงเฉือนและโมเมนต์ที่ฐานอาคาร (Base shear and Base moment) จากผลกระทบของการตบั้งกระแสลมในกรณีต่าง ๆ จะใช้การพิจารณาจากค่าตัวประกอบการตบั้ง (Interference Factors, IF) นิยามเท่ากับค่าอัตราส่วนของผลค่าแรงเฉือนหรือโมเมนต์ที่กระทำต่อฐานอาคารหลักกรณีที่มีอาคารคู่ตบั้งด้านหน้าต่อผลของค่าแรงเฉือนหรือโมเมนต์ที่กระทำต่ออาคารหลักเดี่ยว ๆ โดยไม่ถูกอาคารคู่ตบั้ง ดังแสดงผลในภาพที่ 11(a) และ 11(b) สำหรับค่าตัวประกอบการตบั้งของแรงทางแกน x (IF_{Fx}) และค่าตัวประกอบการตบั้งของของโมเมนต์รอบแกน y (IF_{My}) ซึ่งเป็นแกนหลักของแรงที่กระทำต่อฐานอาคารเป็นหลักตามลำดับ โดยแกน x เป็นระยะห่างการตบั้งไร้หน่วย, $u=x/L$, และแกน y เป็นค่าตัวประกอบการตบั้งของแรง IF_{Fx} หรือ IF_{My} ค่า $IF = 1$ หมายถึงแรงที่กระทำต่ออาคารหลักในกรณีที่มีอาคารตบั้งมีค่าเท่ากับกรณีที่ไม่มีอาคารตบั้ง ซึ่งแสดงว่าไม่มีผลกระทบจากอาคารตบั้งต่อแรงที่กระทำต่ออาคารหลัก

5.4.1 แรงเฉือนที่ฐานอาคาร (Base shear)

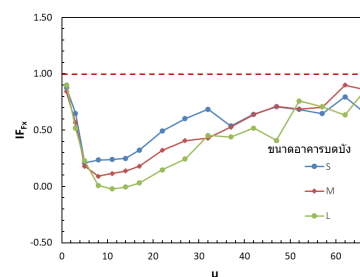
จากผลของค่า IF_{Fx} แสดงในภาพที่ 11(a) พบว่าที่ระยะห่างการตบั้งไร้หน่วยที่ใกล้ที่สุด ($u = 1$) ผลของการตบั้งมีไม่มากนัก โดย $IF_{Fx} = 0.9$ แต่เมื่อระยะห่างการตบั้งไร้หน่วยเพิ่มมากขึ้นแต่ไม่เกิน 5 ($u \leq 5$) ค่า IF_{Fx} จะค่อยๆ ลดลงเมื่ออาคารคู่ตบั้งมีระยะห่างจากอาคารหลักมากขึ้น โดยมีค่าเข้าใกล้ 0 ที่ระยะ u ประมาณ 11 แสดงว่าที่ระยะห่างการตบั้งไร้หน่วยประมาณ 11 เท่าของอาคารหลัก จะมีผลกระทบของการตบั้งสูงที่สุด แต่เมื่อถึง

ค่า $u > 5$ ค่า IF_{Fx} จะมีค่าค่อยๆ เพิ่มขึ้นตามค่าระยะห่างการบัดบังจากอาคารหลัก และมีค่า IF_{Fx} สูงสุดประมาณเท่ากับ 0.9 หมายความว่ามีความแรงเฉือนกระทำที่ฐานอาคารหลักสูงสุดประมาณ 0.9 เท่าของค่าแรงเฉือนกระทำที่ฐานอาคารหลักกรณีที่ไม่มีอาคารมาบัดบังกระแสนลม ซึ่งแสดงว่าที่ระยะห่างการบัดบังไว้หน่วยสูงสุดของกรณีศึกษา ($u = 67$) หรือคือระยะห่าง 67 เท่าของขนาดอาคารหลัก) ยังคงมีผลกระทบของอาคารคู่บัดบังกระแสนลมต่ออาคารหลักอยู่เล็กน้อย

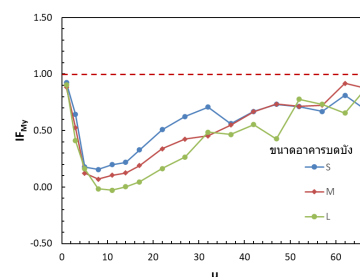
จากความสัมพันธ์ของค่า IF_{Fx} ของกรณีอาคารคู่บัดบังทั้ง 3 ขนาด จะพบว่าได้ผลใกล้เคียงกัน ในงานวิจัยนี้จึงได้ใช้ค่าเฉลี่ยของผลค่าตัวประกอบการบัดบังกรณีอาคารบัดบังขนาดต่าง ๆ เพื่อเป็นตัวแทนของค่า IF_{Fx} เพื่อนำไปประมาณหาความสัมพันธ์อย่างง่ายเพื่อใช้ประมาณค่า โดยได้ลองนำสมการประมาณค่าตัวประกอบการบัดบังของค่าแรงเฉือนที่ฐานอาคารของกรณีศึกษาอาคารเดี่ยวบัดบังของผู้วิจัยเองในงานวิจัยก่อนหน้านี้แสดงดังสมการเส้นตรงในภาพที่ 12(a) มาแทนค่าระยะ u ต่างๆ จะได้ค่าตัวประกอบการบัดบัง IF_{Fx} แสดงดังเส้นสีฟ้าในภาพที่ 12(a) โดยมีลักษณะเป็นเส้นตรงที่มีความชันเป็นบวก ซึ่งพบว่าจะขัดแย้งกับผลของกรณีศึกษาอาคารคู่บัดบังโดยสิ้นเชิง ที่ในช่วงค่า u น้อยๆ ค่า IF_{Fx} จะค่อยๆ ลดลง

สรุปได้ว่าสมการประมาณค่า IF กรณีอาคารเดี่ยวบัดบังไม่สามารถนำมาใช้กับกรณีอาคารคู่บัดบังได้ งานวิจัยนี้จึงได้ลองใช้สมการพหุนามยกกำลัง 2 มาประมาณค่าโดยใช้หลักการทางสถิติ พิจารณาความคลาดเคลื่อนที่น้อยที่สุดด้วยวิธีการ Least

square method พบว่าสำหรับสมการพหุนามยกกำลัง 2 จะได้สมการดังแสดงในภาพที่ 12(a) และมีค่า $R^2 = 0.49$ ซึ่งถือว่าน้อยแสดงว่าการประมาณค่ายังมีความคลาดเคลื่อนอยู่มาก จึงพิจารณาเพิ่มกำลังของพหุนามเป็นสมการกำลัง 3 ดังแสดงในภาพที่ 12(a) โดยได้ค่า $R^2 = 0.74$ ซึ่งแสดงถึงความคลาดเคลื่อนอยู่ในเกณฑ์ปานกลาง อย่างไรก็ตามรูปร่างของกราฟความสัมพันธ์สมการกำลัง 3 ยังไม่ค่อยสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ CFD อีกทั้งค่าสัมประสิทธิ์ของสมการพหุนามมีค่าน้อย ไม่เหมาะสมกับการนำมาใช้เพราะอาจมีความคลาดเคลื่อนเชิงตัวเลขได้ง่าย จึงได้เปลี่ยนตัวแปรค่าแกน x ของสมการจากระยะห่างการบัดบังเป็นจำนวนเท่าของขนาดอาคารหลัก (u) มาเป็นระยะห่างอาคารตามจริง x มีหน่วยเป็น km แสดงดังในภาพที่ 12(b)



a) IF_{Fx} ของแรงเฉือนที่ฐานอาคารหลัก

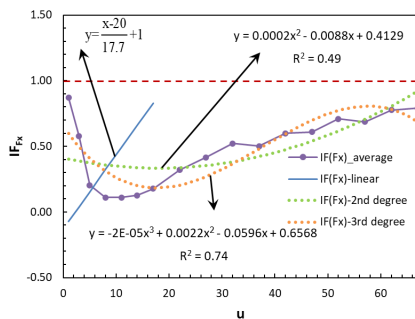


b) IF_{My} ของโมเมนต์ที่ฐานอาคารหลัก

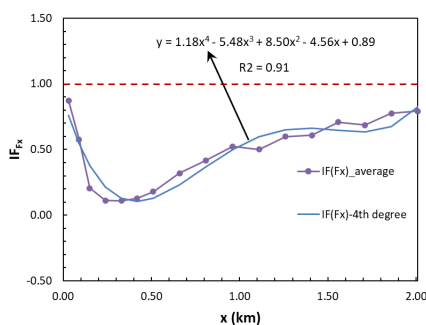
ภาพที่ 11 IF_{Fx} , IF_{My} ของแรงที่ฐานอาคารหลัก

และได้พิจารณาสมการพหุนามในการประมาณค่าเป็นสมการยกกำลัง 4 จะได้ผลของสมการดังแสดงในสมการที่ (3) และมีค่า $R^2 = 0.91$ ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ดีรูปร่างของกราฟความสัมพันธ์สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ CFD และค่าสัมประสิทธิ์ของสมการไม่ซับซ้อน สามารถนำไปใช้งานได้ไม่ยุ่งยาก

$$IF_{Fx} = 1.18x^4 - 5.48x^3 + 8.50x^2 - 4.56x + 0.89 \quad (3)$$



a) การประมาณค่า IF_{Fx} ด้วยตัวแปรระยะห่างการบดบังคิดเป็นเท่าของขนาดอาคารหลัก (u)



b) การประมาณค่า IF_{Fx} ด้วยตัวแปรระยะทางตามจริง

ภาพที่ 12 IF_{Fx} จากการวิเคราะห์ CFD และการประมาณค่าตามสมการ

5.4.2 โมเมนต์กระทำที่ฐานอาคาร (Base Moment)

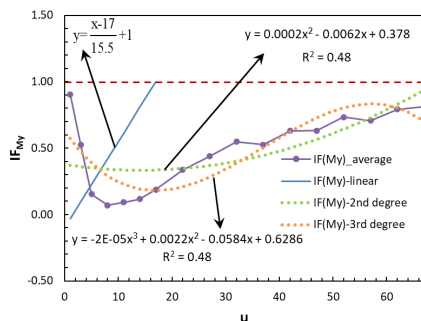
ผลของค่าโมเมนต์กระทำที่ฐานอาคารหลักสามารถทำการพิจารณาในรูปแบบเดียวกับค่าของแรงเฉือนที่ฐานอาคาร โดยจากภาพที่ 11(b) ที่ระยะห่างการบดบังไร้หน่วยที่ใกล้ที่สุด ($u = 1$) ผลกระทบจากการบดบังมีน้อยมาก โดยมีค่า IF_{My} ประมาณ 0.9 แต่เมื่อระยะห่างการบดบังไร้หน่วยเพิ่มมากขึ้น ในช่วงประมาณ $1 \leq u \leq 11$ ค่า IF_{My} จะมีค่าค่อย ๆ ลดลงเมื่อระยะห่างการบดบังไร้หน่วยเพิ่มมากขึ้น (การบดบังมีผลต่อแรงที่กระทำต่ออาคาร) จนมีค่าเข้าใกล้ 0 ที่ระยะห่างการบดบังไร้หน่วย, u ประมาณ 11 จากนั้นเมื่อระยะห่างการบดบังไร้หน่วยเพิ่มมากขึ้น ค่า IF_{My} จะค่อย ๆ เพิ่มขึ้น ซึ่งหมายถึงผลกระทบจากการบดบังค่อย ๆ ลดลง จนค่า IF_{My} สูงสุดที่ประมาณ 0.9 ที่ระยะห่างการบดบังไร้หน่วยที่ใกล้ที่สุดในงานวิจัยนี้ และในลักษณะเดียวกันกับค่าตัวประกอบการบดบังของแรงเฉือนที่ฐานอาคารหลัก พิจารณาค่าตัวประกอบการบดบังของโมเมนต์ที่ฐานอาคารด้วยค่าเฉลี่ยของกรณีศึกษาขนาดอาคารคู่บดบังขนาดต่าง ๆ มาวิเคราะห์หาสมการในการประมาณค่า IF_{My} ของกรณีอาคารคู่บดบังที่ระยะห่างการบดบังไร้หน่วยต่าง ๆ พบว่าสมการทำนายค่า IF_{My} ของกรณีอาคารบดบังอาคารเดี่ยวจากผลงานวิจัยของผู้เขียนในงานวิจัยก่อนหน้านี้ ดังแสดงสมการเส้นตรงในภาพที่ 13(a) ซึ่งแสดงค่า IF_{My} ของกรณีอาคารคู่บดบังที่ระยะห่างการบดบังไร้หน่วย, u ต่าง ๆ ไม่สามารถนำมาใช้ได้กับกรณีอาคารบดบังเป็นอาคารคู่ได้ โดยมีผลการวิเคราะห์ด้วย CFD และการประมาณค่าสวนทางกันโดยสิ้นเชิง



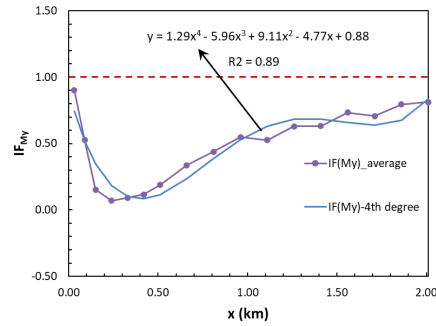
ในกรณีที่ใช้สมการพหุนามยกกำลัง 2 มาประมาณค่า จะได้สมการที่ดีที่สุดด้วยวิธี Least square method มีค่า $R^2 = 0.48$ ซึ่งถือว่าน้อยมีความคลาดเคลื่อนสูง แต่หากใช้สมการพหุนามกำลัง 3 จะได้สมการที่มีค่า R^2 สูงขึ้นที่ประมาณ 0.71 แต่ลักษณะของกราฟความสัมพันธ์ยังไม่สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ CFD มากนัก และค่าสัมประสิทธิ์มีค่าน้อย อาจมีความคลาดเคลื่อนเชิงตัวเลขในการคำนวณได้มาก ดังแสดงในภาพที่ 13(a)

จึงใช้สมการพหุนามกำลัง 4 ในการประมาณค่าตัวประกอบการบดบังค่าโมเมนต์ที่ฐานอาคารคำนวณด้วยตัวแปรระยะห่างการบดบังตามระยะทางจริง (x) หน่วยเป็น km โดยจากการวิเคราะห์ด้วยวิธี Least square method จะได้สมการพหุนามกำลัง 4 ที่ดีที่สุดแสดงดังสมการที่ (4) มีค่า $R^2 = 0.89$ และมีลักษณะกราฟความสัมพันธ์ที่สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ด้วย CFD ในระดับเป็นที่น่าพอใจ และสามารถนำไปใช้งานได้ไม่ยุ่งยากซับซ้อน

$$IF_{My} = 1.29x^4 - 5.96x^3 + 9.11x^2 - 4.77x + 0.88 \quad (4)$$



a) การประมาณค่า IF_{My} ด้วยตัวแปรระยะห่างการบดบังคิดเป็นเท่าของขนาดอาคารหลัก (u)



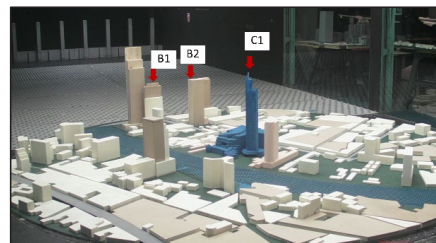
b) การประมาณค่า IF_{My} ด้วยตัวแปรระยะทางตามจริง

ภาพที่ 13 IF_{My} จากการวิเคราะห์ CFD และการประมาณค่าตามสมการ

6. เปรียบเทียบผลการศึกษากับผลการทดสอบอุโมงค์ลม

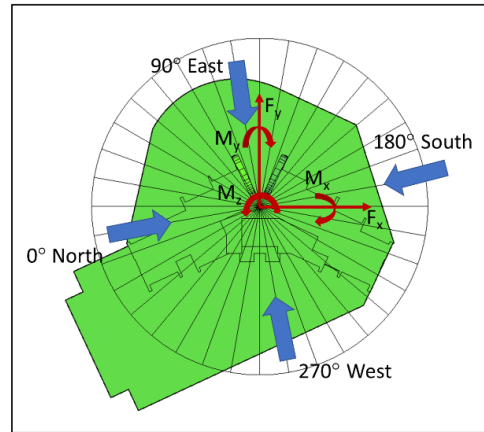


งานวิจัยนี้ได้รับความอนุเคราะห์ข้อมูลผลการทดสอบอุโมงค์ลมของอาคารสูงแห่งหนึ่งในกรุงเทพมหานคร จากบริษัทผู้ประกอบการเจ้าของอาคารที่ไม่ประสงค์จะออกนาม โดยการทดสอบอุโมงค์ลมทำการทดสอบหาค่าแรงกระทำที่ฐานอาคาร C1 จากทิศทางลม 360° รอบอาคาร ซึ่งทำให้มีกรณีทิศทางลมที่มีอาคารสูงอื่น เรียกแทนว่า อาคาร B1 และ B2 บดบังกระแสลมที่กระทำต่ออาคารในลักษณะใกล้เคียงกับการศึกษาวิจัยนี้ ดังแสดงในภาพที่ 14

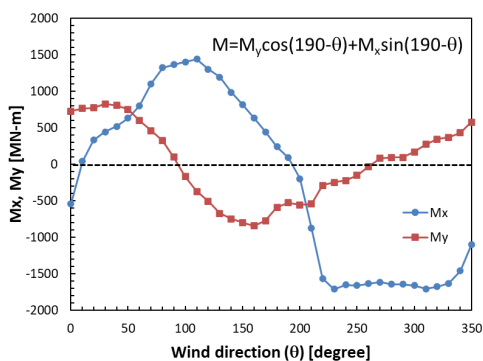
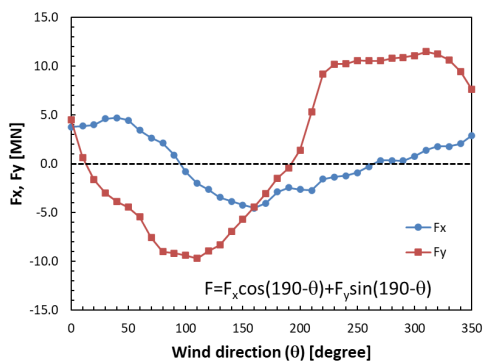


ภาพที่ 14 การจำลองอุโมงค์ลม

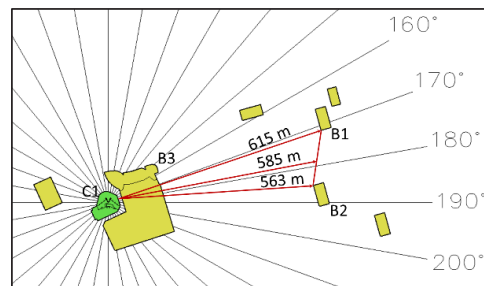
แบบจำลองอาคารมีขนาด 1:400 และอุโมงค์ลมมีความกว้าง 4.8 เมตร, ยาว 15 เมตร และสูง 2.4 เมตร คิดเป็นขนาดเทียบเท่าขนาดจริงกว้าง 1,920 เมตร, ยาว 6,000 เมตร และสูง 960 เมตร สำหรับความเร็วลมเฉลี่ยที่ใช้ทดสอบในองศาที่ $180^\circ = 37.60$ เมตรต่อวินาที กำหนดทิศทางของกระแสลมและตำแหน่งของอาคารข้างเคียง ดังแสดงในภาพที่ 16 และ 17 ตามลำดับ ได้ผลค่าแรงกระทำที่ฐานอาคาร C1 จากทิศทางลมต่าง ๆ ดังแสดงในภาพที่ 15



ภาพที่ 16 ทิศทางของแรงลม และทิศทางของแรงและโมเมนต์ที่กระทำต่อฐานอาคารหลัก



ภาพที่ 15 ค่า F_x , F_y , M_x , M_y ของผลการทดสอบอุโมงค์ลม

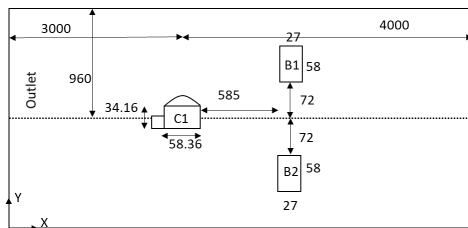


ภาพที่ 17 ตำแหน่งอาคารข้างเคียงในการทดสอบอุโมงค์ลม

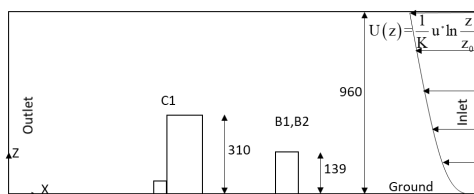
6.1 การวิเคราะห์เปรียบเทียบกับ CFD

การวิเคราะห์ด้วย CFD ใช้แบบจำลองอาคาร C1 ขนาด 1:1 โดยจำลองให้มีรูปร่างอาคารลักษณะใกล้เคียงจริงสูง 310 เมตร ดังแสดงในภาพที่ 16 เป็นอาคารที่มีรูปร่างไม่สม่ำเสมอ ส่วนอาคารบดบัง B1 และ B2 ใช้การจำลองอาคารเป็นลักษณะแท่งปริซึมสี่เหลี่ยม ให้มีขนาดเทียบเท่าใกล้เคียงกับอาคาร

ที่บดบังจริง และให้มีขนาดเท่ากันทั้ง 2 อาคารโดยสูง 139 เมตร, กว้าง 58 เมตร และยาว 27 เมตร (ตั้งอยู่ที่ตำแหน่งระยะห่าง 585 เมตร จากอาคารหลักตามระยะจริง) ขนาดขอบเขตโดเมนการวิเคราะห์ CFD ให้เทียบเท่ากับขนาดขยาย 400 เท่าตามสัดส่วนแบบจำลองในอุโมงค์ลมซึ่งจะเท่ากับ กว้าง 1,920 เมตร, ยาว 7,000 เมตร และสูง 960 เมตร และจำลองลักษณะกระแสลม ค่าความเร็วลมเฉลี่ยเทียบเท่ากับการทดสอบอุโมงค์ลมดังแสดงในภาพที่ 18(b) ทิศทางลมที่เสมือนมีอาคารคู่บดบังกระแสลมด้านหน้าอาคารหลักคือทิศทางมุม 180° ดังแสดงในภาพที่ 17



a) ภาพ plan อาคาร



b) ภาพ elevation อาคาร

ภาพที่ 18 ขนาดของแบบจำลองอาคารและขอบเขตการจำลองที่ทำการศึกษา (หน่วย: เมตร)

ผลการวิเคราะห์ CFD จะประกอบด้วยค่าแรงกระทำที่ฐานอาคารหลัก 2 ชุดคือ 1. ค่าแรงกระทำที่ฐานอาคารหลักในกรณีที่เรากรบดบังเพื่อใช้เป็น

ค่าอ้างอิงในการเปรียบเทียบ ซึ่งได้ค่าแรงเฉือนและโมเมนต์ที่ฐานอาคารหลัก = 7.10 เมกะนิวตัน และ 911.35 เมกะนิวตัน-เมตร ตามลำดับ และ 2. ค่าแรงกระทำที่ฐานอาคารหลักในกรณีมีอาคารคู่บดบัง ซึ่งได้ค่าแรงเฉือนและโมเมนต์ที่ฐานอาคารหลัก = 5.82 เมกะนิวตัน, 766.42 เมกะนิวตัน-เมตร ตามลำดับ

6.2 การเปรียบเทียบผลวิเคราะห์กับผลทดสอบอุโมงค์ลมและจากการประมาณค่าด้วยสมการ

จากผลค่าแรงกระทำที่ฐานอาคารหลักจากการวิเคราะห์ CFD ข้างต้นเมื่อเทียบกับผลการทดสอบอุโมงค์ลมที่ทิศทางลม 180° ซึ่งเป็นทิศทางที่สอดคล้องกับการวิเคราะห์ด้วย CFD ได้ค่าแรงเฉือนกระทำที่ฐานอาคารเท่ากับ 3.12 เมกะนิวตัน และได้ค่าโมเมนต์กระทำที่ฐานอาคารเท่ากับ 538.27 เมกะนิวตัน-เมตร ซึ่งได้ค่าแตกต่างกันค่อนข้างมากมีสาเหตุเนื่องมาจากการทดสอบอุโมงค์ลมมีอาคารข้างเคียงเสมือนจริงอยู่มากกว่า 7 อาคาร และมีอาคารเดี่ยวขนาดใหญ่ (B3) บดบังอยู่ด้านหน้า จึงทำให้ได้ผลค่าแรงเฉือนและโมเมนต์ที่ฐานอาคารหลักแตกต่างกันมาก

และสำหรับการประมาณค่าแรงเฉือนที่กระทำต่อฐานอาคารด้วยการประยุกต์ใช้สมการทำนายค่าตัวประกอบการบดบังของแรงเฉือนและโมเมนต์ที่ฐานอาคารตามสมการที่ (3) และ (4) ตามลำดับ โดยพิจารณาอาคารหลักเป็นอาคารที่มีความสูง 310 เมตร, กว้าง 34.16 เมตร และยาว 58.36 เมตร พบว่าเมื่อแทนค่าระยะ $x = 0.585$ km จะได้ค่า $IF_{Fx} = 0.172$ ซึ่งจะคำนวณได้ค่าแรงเฉือนที่ฐานอาคาร $Fx = 0.172 \times 7.10 = 1.22$ เมกะนิวตัน ซึ่งน้อยกว่า

ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ CFD ที่ 5.82 เมกะนิวตัน หรือผลการทดสอบอุโมงค์ลมที่ 3.12 เมกะนิวตัน มาก

อย่างไรก็ตามสมการค่าตัวประกอบการบดบัง ได้มาจากกรณีที่อาคารคู่บดบังมีความสูงเท่ากันกับ อาคารหลัก แต่สำหรับในการเปรียบเทียบกับผล ทดสอบอุโมงค์ลมนี้ เนื่องจากอาคารคู่บดบังมีขนาด เตี้ยกว่าอาคารหลักประมาณ $= 310/139 = 2.23$ เท่าหากอนุมานว่าสัดส่วนความสูงอาคารดังกล่าวที่ ไม่ได้ถูกบดบังจริง ได้ถูกคำนวณเข้าไปแล้วในการ คิดค่าตัวประกอบการบดบัง จึงนำค่าดังกล่าวมาคูณ ขยายค่าแรงกระทำที่ฐานอาคารเพื่อชดเชยสัดส่วน ความสูงของอาคารหลักที่ไม่ได้ถูกบดบัง จะได้ ค่าแรงเฉือนกระทำที่ฐานอาคาร $= 1.22 \times 2.23 = 2.72$ เมกะนิวตัน ซึ่งเมื่อเทียบค่าดังกล่าวกับผล การวิเคราะห์ด้วย CFD ($= 5.82$ เมกะนิวตัน) จะ เห็นว่าการประมาณได้ค่าน้อยกว่าอยู่ $= (5.82 - 2.72)/5.82 = 53\%$ และหากเทียบกับผลทดสอบ อุโมงค์ลม ($= 3.12$ เมกะนิวตัน) จะได้ว่า การประมาณ ให้ค่าที่น้อยกว่าอยู่ $= (3.12 - 2.27)/3.12 = 27\%$

สำหรับการประมาณค่าโมเมนต์ที่กระทำต่อ ฐานอาคารตามสมการที่ (4) จะได้ค่า $IF_{My} = 0.165$ และเมื่อคำนวณชดเชยความสูงอาคารบดบังที่ เตี้ยกว่าอาคารหลักแล้ว จะได้ค่าโมเมนต์กระทำ ที่ฐานอาคาร $= 0.165 \times 911.35 \times 2.23 = 335.33$ เมกะนิวตัน-เมตร ซึ่งเมื่อเทียบค่าดังกล่าวกับผล การวิเคราะห์ด้วย CFD ($= 766.42$ เมกะนิวตัน-เมตร) จะเห็นว่าการประมาณได้ค่าน้อยกว่าอยู่ $= (766.42 - 335.33)/766.42 = 56\%$ และหากเทียบกับผลทดสอบ

อุโมงค์ลม ($= 538.27$ เมกะนิวตัน-เมตร) จะได้ค่า ประมาณมีค่าน้อยกว่าอยู่ $= (538.27 - 335.33)/538.27 = 38\%$

7. สรุปผล

1. การศึกษาค่าสัมประสิทธิ์แรงดันลมเฉลี่ย ($\bar{C}_p$) ที่ระดับความสูง $(1/3)H$ และ $(2/3)H$ ของ อาคารหลัก พบว่า ที่ด้านหน้าของอาคารหลัก (ด้าน A) ค่า $\bar{C}_p$ จากกรณีอาคารคู่บดบังทั้ง 3 ขนาด ส่วนใหญ่ จะอยู่ในช่วงค่าบวก (แรงผลัก) โดยเมื่อค่าระยะห่าง การบดบังไร้หน่วย, $u, \leq 11$ ค่า $\bar{C}_p$ จะค่อย ๆ ลดลง เมื่ออาคารคู่บดบังมีระยะห่างจากอาคารหลักมาก ขึ้น แต่เมื่อค่า $u > 11$ พบว่าค่า $\bar{C}_p$ มีค่าค่อย ๆ เพิ่มขึ้นตามค่าระยะห่างการบดบังจากอาคารหลัก ส่วนด้าน B และ ด้าน C พบว่าค่า $\bar{C}_p$ ส่วนใหญ่จะ อยู่ในช่วงค่าลบ (แรงดูด)

2. ค่า IF_{Fx} และ IF_{My} จากการวิเคราะห์ CFD ของกรณีขนาดอาคารคู่บดบังทั้ง 3 ขนาด มีลักษณะ คล้ายกับ $\bar{C}_p$ ด้าน A ของอาคารหลัก

3. ที่ $u = 1$ ผลกระทบของการบดบังมีไม่ มากนัก เนื่องจากค่าตัวประกอบการบดบังมีค่า ประมาณ 0.9

4. ผลกระทบของการบดบังอาคารต่อแรง กระทำที่ฐานอาคารมีผลกระทบสูงสุดที่ระยะห่าง การบดบังไร้หน่วยประมาณ 11 เท่าของขนาดอาคาร หลัก ($u = 11$)

5. ที่ระยะห่างการบดบังสูงสุดในงานวิจัยนี้ ($u = 67$) ยังคงมีผลกระทบของอาคารคู่บดบังกระแ สลมต่ออาคารหลักอยู่ แต่ไม่มาก (ค่า IF ประมาณ 0.9)



6. ผลการวิเคราะห์ CFD เมื่อเทียบกับผลทดสอบอุโมงค์ลม ได้ค่าแตกต่างกันเนื่องมาจากการทดสอบอุโมงค์ลมมีอาคารข้างเคียงเสมือนจริงอยู่มากกว่า 7 อาคาร และมีอาคารเตี้ยขนาดใหญ่ (B3) บดบังอยู่ด้านหน้า จึงทำให้ได้ผลค่าแรงเฉือนและโมเมนต์ที่ฐานอาคารแตกต่างกันค่อนข้างมาก

7. ผลการประมาณค่าจากสมการค่าตัวประกอบการบดบังของแรงเฉือนเมื่อเทียบกับผลการวิเคราะห์ด้วย CFD จะเห็นว่าการประมาณให้ค่าน้อยกว่าอยู่ 53% และหากเทียบกับผลทดสอบอุโมงค์ลมการประมาณให้ค่าน้อยกว่าอยู่ 27%

8. ผลการประมาณค่าจากสมการค่าตัวประกอบการบดบังของโมเมนต์เมื่อเทียบกับผลการวิเคราะห์ด้วย CFD จะเห็นว่าการประมาณให้ค่าน้อยกว่าอยู่ 56% และหากเทียบกับผลทดสอบอุโมงค์ลมการประมาณให้ค่าน้อยกว่าอยู่ 38%

8. เอกสารอ้างอิง

[1] Huang S, Li Q S, and Xu S (2007). Numerical evaluation of wind effects on a tall steel building by CFD. Journal of Constructional Steel Research, 63: 612–627.

[2] Braun A L, and Awruch A M (2009). Aerodynamic and aeroelastic analyses on the CAARC standard tall building model using numerical simulation. Computers and Structures, 87: 564–581

[3] Obasaju E D (1992). Measurement of forces and base overturning moments on

the CAARC tall building model in a simulated atmospheric boundary layer. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 40: 103–126.

[4] Thepmongkorn S (2004). High frequency force balance model tests for a prediction of wind-induced forces and responses of buildings. The 9th National Convention on Civil Engineering, Phetchaburi, pp.120-125.

[5] Verma S K, Roy A K, Lather S, and Sood M (2015). CFD Simulation for Wind Load on Octagonal Tall Buildings. SSRG International Journal of Civil Engineering, 129-134.

[6] Mohotti D, Danushka K, Mendis P (2015). Wind Design of Slender Tall Buildings: CFD Approach. 6th International Conference on Structural Engineering and Construction Management, Kandy.

[7] Mohotti D (2014). APPLICATION OF COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS (CFD) IN PREDICTING THE WIND LOADS ON TALL BUILDINGS- A CASE STUDY. 23rd Australasian Conference on the Mechanics of Structures and Materials, Byron Bay.

[8] Sevalia J K, Desai A K, Vasanwala S A (2012). EFFECT OF GEOMETRIC PLAN CONFIGURATION OF TALL BUILDING ON WIND



FORCE COEFFICIENT USING CFD. International Journal of Advanced Engineering Research and Studies, 1: 127–130.

[9] Parv B, Hulea R, Zoicas R (2012). Comparative study of wind effects on tall buildings using international codes and CFD. European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering, Vienna.

[10] Bairagi A K, Dalui S K (2014). Optimization of Interference Effects on High-Rise Buildings for Different Wind Angle Using CFD Simulation. Electronic Journal of Structural Engineering, 14: 39-49.

[11] Dalui S K, Kar R, Hajra S (2015). Interference Effects on Octagonal Plan Shaped Tall building under Wind - A Case Study. SCIENTIFIC COOPERATIONS WORKSHOPS ON ENGINEERING BRANCHES, Istanbul.

[12] Dagnew A K, Bitsuamlak G T (2010). LES evaluation of wind pressures on a standard tall building with and without a neighboring building. The Fifth International Symposium on Computational Wind Engineering.

[13] Dagnew A K, Bitsuamalk G T, Merrick R (2009). Computational evaluation of wind pressures on tall buildings. 11th Americas Conference on Wind Engineering, San Juan.

[14] Desai A K, Sevalia J K, Vasanwala S A (2014). Wind Interference Effect on Tall Building. World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Civil, Environmental, Structural, Construction and Architectural Engineering, 8: 656-662.

[15] Commonwealth Advisory Aeronautical Research Council (CAARC). <https://uia.org/s/or/en/1100046837>

สาเหตุความล่าช้าของงานก่อสร้างในทัศนะของวิศวกรโยธา

The Causes of Construction Delays in Perspective of Civil Engineers

วัชรินทร์ แก้วใจจง และ วชรภูมิ เบญจโอฬาร*

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

E-mail: nkgwatcharin@yahoo.com, vacharapoom@sut.ac.th

* ผู้ประพันธ์บรรณกิจ (corresponding author)



บทคัดย่อ

กำหนดแล้วเสร็จของโครงการก่อสร้างเป็นข้อพิจารณาสำคัญที่ใช้กำหนดราคา เลือกเทคนิคก่อสร้าง และเป็นเงื่อนไขคัดเลือกผู้รับเหมาที่มีศักยภาพเพียงพอ การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อบ่งชี้สาเหตุ และปัจจัยความล่าช้าของงานก่อสร้างด้วยแบบสอบถามความคิดเห็นจากทัศนะของวิศวกรโยธา ซึ่งรู้ข้อมูลรายละเอียด และรับผิดชอบโดยตรงต่อโครงการมากที่สุด มีประสบการณ์ทำงานที่ใช้สะท้อนปัญหาต่าง ๆ ได้ดีที่สุด กลุ่มตัวอย่างวิศวกรโยธา ถูกคัดเลือกโดยวิธีเจาะจง 110 คน ผลวิจัยบ่งชี้ว่า สาเหตุความล่าช้าที่ได้คะแนนสูงที่สุดห้าลำดับแรก คือ “การขาดแคลนแรงงาน” “สภาพคล่องทางการเงินของผู้รับเหมา” “การเปลี่ยนแปลงเนื้องานก่อสร้างระหว่างดำเนินการ” “การกำหนดขอบเขตและวัตถุประสงค์ของงานก่อสร้างไม่ชัดเจน” และ “ผู้รับเหมาไม่จ่ายเงินค่าแรงคนงานหรือผู้รับเหมาช่วงตามกำหนด” นอกจากนี้ ผลทดสอบสมมติฐานสรุปได้ว่า ประสิทธิภาพงานก่อสร้าง และบทบาทในองค์กรก่อสร้างที่วิศวกรโยธาปฏิบัติงานแตกต่างกันทำให้ทัศนะสาเหตุความล่าช้าต่างกัน ผลจากงานวิจัยนี้จึงสามารถใช้เป็นแนวทางเตรียมการแก้ไขความล่าช้าเนื่องจากสาเหตุสำคัญต่าง ๆ ที่พบจากการวิจัย ก่อนดำเนินโครงการได้



คำสำคัญ:

องค์กรก่อสร้าง; สาเหตุความล่าช้า; ความล่าช้าของงานก่อสร้าง; วิศวกรโยธา



Abstract

The completion date of a construction project is an important consideration used to determine the reasonable price, proper construction techniques and the right competency for selecting contractors. The purpose of this research was to identify the causal factors associated with construction delays by using questionnaire. The opinions were surveyed

from the viewpoints of civil engineers who know the details and are directly responsible for the project the most. Civil engineers also have direct work experience that can best reflect various problems that arise. A sample of 110 civil engineers was selected by the purposive sampling method. The top five highest-rated causes of delays were “Labor shortages”, “Lack of financial liquidity of contractors”, “Change orders during the construction”, “Unclear scope and objectives of the work”, and “Contractors do not pay workers or subcontractors”. In addition, the results of the hypothesis testing revealed that differences in construction types and roles in construction organizations where civil engineers work effect on different opinions on the causes of the delay. The results of this research can therefore be used as guidelines for preparations to address delays at the major causes identified from this research before the implementation of the project.

Keywords: Construction organization; Delay causes; Construction delay, Civil engineers.

1. บทนำ

งานก่อสร้างเกิดจากเจ้าของโครงการต้องการสิ่งก่อสร้างใหม่ จากนั้นจึงจัดหา ผู้ออกแบบ ผู้ควบคุมงาน และผู้รับเหมาเพื่อดำเนินการให้ได้ขึ้นงานที่สมบูรณ์ เป็นการดำเนินงานร่วมกันของหลายบริษัทที่มีความสัมพันธ์กันตามหน้าที่ความรับผิดชอบของตนเอง ในขั้นตอนการก่อสร้าง เป็นองค์กรก่อสร้าง (Construction organization) ซึ่งประกอบด้วยผู้ดำเนินการหลักสามฝ่าย คือ เจ้าของโครงการ (Owner) ผู้ออกแบบและควบคุมงาน (Designer) และผู้รับเหมา (Contractor)

งานก่อสร้างแต่ละโครงการมักต้องใช้ระยะเวลาการดำเนินงานยาวนาน มีการทำงานหลายขั้นตอนซึ่งต้องอาศัยความร่วมมือจากหลายฝ่าย จึงอาจเกิดปัญหาหลากหลายรูปแบบ ที่ทำให้การก่อสร้าง

ไม่เป็นไปตามแผน และมีผลกระทบต่อต้นทุนโครงการ ความล่าช้าของงานก่อสร้างเกิดได้จากหลายสาเหตุ [1] และผลกระทบมีระดับความรุนแรงแตกต่างกัน เช่น การเปลี่ยนแปลงรายละเอียดของแบบหรือวัสดุ การทำงานบกพร่องหรือไม่มีประสิทธิภาพ เจ้าของโครงการกำหนดขอบเขตงานไม่ชัดเจน ความล่าช้าในการอนุมัติแบบหรือวัสดุ ความล่าช้าในการส่งมอบพื้นที่ทำงาน สภาพคล่องของผู้รับเหมา ขาดแคลนแรงงาน เป็นต้น อย่างไรก็ตาม ผู้รับผิดชอบโดยตรงต่อความล่าช้าของโครงการ คือ องค์กรก่อสร้างหลักที่ประกอบด้วยสามฝ่าย ดังกล่าวข้างต้น

งานวิจัยที่ผ่านมาจำนวนมากในหลากหลายประเทศพยายามค้นหาปัจจัยที่ทำให้เกิดความล่าช้า [2] โดยใช้วิธีการคล้ายกันคือการกำหนดรายการ

ปัจจัยสาเหตุ (attributes หรือ factors) ทั้งหมด ออกมาก่อนด้วยการทบทวนวรรณกรรมจำนวนมาก แล้วจัดหมวดหมู่ปัจจัยเหล่านี้ จากนั้นจึงใช้แบบสอบถาม เพื่อรวบรวมความเห็นของผู้เกี่ยวข้องที่เป็นกลุ่ม ตัวอย่างด้วยการให้คะแนน (Rating scales) แล้ว วิเคราะห์หาและจัดลำดับปัจจัยที่สำคัญที่สุดออกมา [3, 4] แม้ว่าจำนวนปัจจัยสาเหตุที่แต่ละงานวิจัย กำหนดออกมาจะแตกต่างกัน แต่มักมีโครงสร้างการ จัดหมวดหมู่แบ่งตามความรับผิดชอบขององค์กร ก่อสร้างสามฝ่าย [5] และมีเนื้อปัจจัยคล้ายคลึงกัน ความคล้ายคลึงกันอีกประการคือมักกำหนดกลุ่ม ตัวอย่างเป็นผู้ที่เกี่ยวข้องในโครงการก่อสร้างอย่าง ครอบคลุมทุกตำแหน่งหน้าที่ [6] ได้แก่ ผู้จัดการ วิศวกร โพรแมน ชูกรกร คนงาน โดยไม่ได้เฉพาะ เจาะจงที่พื้นหลังของสาขาคุณวุฒิทางการศึกษา ซึ่ง ในความเป็นจริงผู้ที่ทำงานเกี่ยวข้องกับงานก่อสร้าง มีความหลากหลายของคุณวุฒิและอาจไม่ใช่สาขา วิศวกรรมโยธา

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสำรวจและบ่งชี้ สาเหตุความล่าช้าของงานก่อสร้าง ในทัศนะของ วิศวกรโยธาโดยเฉพาะ เนื่องจากวิศวกรรมโยธาเป็น ศาสตร์ที่ตรงกับงานก่อสร้างโดยตรงที่สุดและเป็น องค์ความรู้ในระดับปริญญาบัณฑิต ผู้มีคุณวุฒิ วิศวกรรมโยธาที่ปฏิบัติงานแตกต่างกันสามบทบาท ขององค์กรก่อสร้างจึงควรเป็นผู้ที่เข้าใจรายละเอียด ของงานก่อสร้างและประกอบกับประสบการณ์ทำงาน ตรงทำให้มีวิจารณ์ญาณที่ดีและมั่นใจว่าจะสามารถ วิเคราะห์เชื่อมโยงและสะท้อนถึงปัญหาความล่าช้า

ของงานก่อสร้างได้ดีที่สุด โดยครอบคลุมวิศวกรโยธา ที่ปฏิบัติงานทั้งของรัฐ และเอกชน ตำแหน่งหน้าที่ รับผิดชอบ ลักษณะประเภทงาน สถานที่ตั้ง และ มูลค่างานปัจจุบัน ผู้วิจัยมีสมมติฐานว่า ตัวแปรเหล่านี้ อาจส่งผลให้วิศวกรโยธามีความคิดเห็นต่อสาเหตุ ของความล่าช้าแตกต่างกัน สามารถใช้ข้อมูลเหล่านี้ วางแผนงานเพื่อรองรับสาเหตุต่าง ๆ เหล่านี้ได้ รวมถึง ใช้ควบคุมโครงการก่อสร้างให้เป็นไปตามแผนงาน และวัตถุประสงค์

2. ทบทวนวรรณกรรม

ความล่าช้าในงานก่อสร้าง คือ ระยะเวลาของ โครงการก่อสร้างที่ถูกขยายออกไป หรืองานที่ยังไม่ แล้วเสร็จตามกำหนด เนื่องจากเหตุที่ไม่คาดการณ์ไว้ [7] ซึ่งอาจเกิดที่ขั้นตอนใด ๆ ของกระบวนการ ก่อสร้างที่ซับซ้อนต่อเนื่องโดยองค์กรก่อสร้าง สาเหตุ ของความล่าช้าเกิดได้จากหลายปัจจัย ซึ่งอาจมาจาก ความล้มเหลวของการบริหารทรัพยากรของโครงการ ก่อสร้าง [2]

งานก่อสร้างเป็นงานที่สัมพันธ์กันระหว่าง สามฝ่ายขององค์กรก่อสร้าง ซึ่งความล่าช้าอาจเกิดขึ้น จากฝ่ายใดฝ่ายหนึ่งก็ได้ แต่จะส่งผลกระทบต่องาน องค์กร ได้แก่ เจ้าของโครงการอาจต้องแบกรับต้นทุน ที่สูงขึ้น ดอกเบี้ยเงินกู้ และสูญเสียโอกาสทางธุรกิจ ส่วนผู้ออกแบบและควบคุมงานซึ่งมีหน้าที่เป็นตัวกลาง ตรวจสอบผลงานก็อาจจะต้องรับภาระเพิ่ม เนื่องจากการปรับเปลี่ยนแบบก่อสร้าง และจัดทำงบประมาณ ใหม่เพื่อเสนอเจ้าของโครงการ ส่วนผู้รับเหมาอาจ

ถูกปรับจากการส่งมอบงานล่าช้ากว่าสัญญา หรือได้รับค่างวดงานช้ากว่าที่คาดการณ์ ส่งผลกระทบต่อกระแสเงินสด และการดำเนินงานในงวดถัด ๆ ไป โดยการเรียกร้องค่าชดเชยต่อความเสียหายจะอยู่ในรูปแบบของเงินค่าปรับและการขยายระยะเวลาโครงการ [6]

งานก่อสร้างจัดว่าเป็นงานผลิตทางอุตสาหกรรมประเภทหนึ่งที่ใช้ทุนและแรงงานจำนวนมาก ตามประมวลกฎหมายแพ่งและพาณิชย์ถือว่า งานก่อสร้างเป็นการจ้างทำของ มีลักษณะบริหารจัดการและรูปแบบการดำเนินธุรกิจเฉพาะตัว ได้แก่ เป็นงานผลิตที่ต้องใช้เวลานาน มีบุคลากรหลายประเภทหลายระดับ การโยกย้ายเข้าออกงานเกิดขึ้นได้ง่ายและรวดเร็ว ในการจัดองค์กรธุรกิจก่อสร้างแบ่งการทำงานตามภาระความรับผิดชอบ ความรู้ความชำนาญ [5] กลุ่มผู้ดำเนินการหลักแบ่งเป็นสามฝ่ายคือ เจ้าของโครงการ ผู้ออกแบบและควบคุมงาน และผู้รับเหมา

การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความล่าช้าของโครงการก่อสร้างอาคารในเขตภาคตะวันออกเฉียงเหนือ [8] ประชากร คือ ผู้บริหาร พนักงาน คนงาน หรือผู้ที่เกี่ยวกับงานก่อสร้างโครงการในเขตภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ได้กลุ่มตัวอย่าง 300 คน เครื่องมือที่ใช้รวบรวมข้อมูลเป็นแบบสอบถามมาตราส่วนประมาณค่าระดับ สถิติที่ใช้วิเคราะห์ข้อมูล ได้แก่ ค่าร้อยละ ค่าความถี่ ค่าเฉลี่ยค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ค่าน้ำหนักความสำคัญ และความแปรปรวน ANOVA (Analysis of Variance) สรุปว่า ผู้ตอบแบบสอบถาม

มีความคิดเห็นที่ตรงกัน คือ แรงงานก่อสร้างไม่เพียงพอเป็นปัจจัยที่มีผลต่อความล่าช้าในโครงการก่อสร้างอาคาร ในเขตภาคตะวันออกเฉียงเหนือมากที่สุด ที่จัดเป็นสาเหตุความล่าช้าประเภทยอมรับไม่ได้ การขาดสภาพคล่องทางการเงินของผู้รับเหมา เป็นปัจจัยที่มีผลต่อความล่าช้าระดับรองลงมา ที่จัดเป็นสาเหตุความล่าช้าประเภทยอมรับไม่ได้เช่นกัน ซึ่งเจ้าของงานจึงไม่จำเป็นต้องขยายเวลาก่อสร้างให้กับผู้รับเหมา และไม่ต้องรับผิดชอบต่อค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้น การไม่จ่ายเงินงวดตามกำหนด เป็นปัจจัยที่มีผลต่อความล่าช้าที่จัดเป็นสาเหตุความล่าช้าประเภทต้องชดเชย ผู้ปฏิบัติงานของผู้ควบคุมงานมีบุคลากรไม่เพียงพอ ซึ่งเป็นปัจจัยที่มีผลต่อความล่าช้าที่จัดเป็นสาเหตุความล่าช้าประเภทต้องชดเชย

งานวิจัยแนวทางการป้องกันและแก้ไขความล่าช้าโครงการก่อสร้างอาคารชุด กรณีศึกษาอาคารชุดในเขตกรุงเทพมหานคร ใช้วิธีวิจัยเชิงเปรียบเทียบ และสำรวจกรณีศึกษา และเก็บข้อมูลจากเอกสารโครงการ สังเกตการณ์สภาพการก่อสร้างจริง รวมทั้งสัมภาษณ์ผู้เกี่ยวข้อง ได้แก่ ผู้รับเหมา ผู้บริหารงานก่อสร้างในโครงการ ได้สรุปสาเหตุความล่าช้าของการก่อสร้างโครงการอาคารชุดระดับกลางในเขตกรุงเทพมหานคร ที่เกิดจาก 11 สาเหตุหลัก ได้แก่ สาเหตุจากคนงาน, สาเหตุจากวัสดุ เนื่องจาก วัสดุส่งถึงหน่วยงานไม่ทันเวลาต่อการใช้งาน, สาเหตุจากการสั่งการเปลี่ยนแปลง โดยเจ้าของโครงการ, สาเหตุจากการจัดการและการวางแผนงาน เนื่องจากผู้รับเหมาก่อสร้างไม่ปฏิบัติตามแผนที่กำหนดไว้,



สาเหตุจากการประสานงานและการติดต่อสื่อสาร มีสาเหตุมาจากการขาดประสบการณ์ทำงาน เป็นต้น [9] สาเหตุความล่าช้าของโครงการก่อสร้างขององค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นในเขตอำเภอโกสุมพิสัย จังหวัดมหาสารคาม [10] ที่มีงบประมาณ 100,000 บาทขึ้นไป ตั้งแต่ปีงบประมาณ พ.ศ. 2555 - พ.ศ. 2557 ขององค์การบริหารส่วนตำบล 17 แห่ง และเทศบาลตำบล หนึ่งแห่ง กรณีการเกิดความล่าช้า อุปสรรค ขั้นตอนระหว่างดำเนินการถึงโครงการแล้วเสร็จ แบ่งออกเป็น ห้าตัวแปร คือ เจ้าของโครงการ ผู้รับเหมา ผู้ควบคุมงาน ผู้ออกแบบ และความสัมพันธ์กับหน่วยงานราชการ โดยสำรวจและเก็บรวบรวมข้อมูล จากแบบสอบถามของเจ้าของโครงการ (ตัวแทนหน่วยงานเจ้าของโครงการ) ประกอบด้วย นายกองค์การบริหารส่วนตำบล รองนายก ประธานสภาตำบล ปลัดองค์การบริหารส่วนตำบล ผู้อำนวยการกองคลัง ผู้อำนวยการกองช่าง เจ้าพนักงานพัสดุ และช่างควบคุมงาน ผลวิจัยสรุปว่า สาเหตุความล่าช้าจากเจ้าของโครงการ คือ ปัญหาทางการเมืองในท้องถิ่น หรือในประเทศเกิดมากที่สุด สาเหตุความล่าช้าจากผู้รับเหมา คือ ปัญหาขาดแคลนเครื่องจักร และแรงงานเกิดมากที่สุด สาเหตุจากผู้ควบคุมงานที่ทำให้โครงการก่อสร้างล่าช้า ได้แก่ ปัญหาผู้ควบคุมงานไม่เพียงพอเกิดมากที่สุด นอกจากนี้ยังบ่งชี้ว่า สาเหตุความล่าช้าจากผู้ออกแบบ คือ ปัญหาความยุ่งยากซับซ้อนของการออกแบบเกิดขึ้นมากที่สุด และสาเหตุความล่าช้าจากความสัมพันธ์กับหน่วยงานราชการ คือ ปัญหาผู้รับเหมาขาดการประสานงานกับผู้ออกแบบ

หรือผู้ควบคุมงาน

การวิเคราะห์ดัชนีความสัมพันธ์ของมูลเหตุของความล่าช้าของงานก่อสร้าง มีหลายตัวแปร โดยการวิเคราะห์ทั้งภาพรวมและแบบตัดกลุ่มมูลเหตุ ซึ่งจะสามารถแยกทัศนคติของผู้มีส่วนร่วมโดยแบ่งมูลเหตุจากกลุ่มเจ้าของโครงการ กลุ่มผู้ออกแบบ และควบคุมงาน กลุ่มผู้รับเหมา เก็บข้อมูลจากการสอบถามจากตัวแทนวิศวกรทั้งสามกลุ่มในโครงการก่อสร้างในกรุงเทพและปริมณฑล วิเคราะห์และจัดลำดับมูลเหตุความล่าช้าด้วย Relative Importance Index (RII) ซึ่งดัชนีความสำคัญสัมพันธ์แสดงถึงมูลเหตุที่ส่งผลต่อโครงการก่อสร้าง [11] ผลวิจัยมูลเหตุของความล่าช้าโดยรวมอันดับหนึ่งคือ การขาดแคลนแรงงาน อันดับสองคือ การตัดสินใจล่าช้า ทั้งนี้ผลวิเคราะห์มูลเหตุแบบตัดกลุ่มมูลเหตุจากกลุ่มเจ้าของโครงการคือ การกำหนดขอบเขตและวัตถุประสงค์ของงานก่อสร้าง การส่งมอบพื้นที่ทำงาน กลุ่มผู้ออกแบบและควบคุมงาน คือ กระบวนการตัดสินใจล่าช้า กลุ่มผู้รับเหมาคือ ความผิดพลาดจากการทำงาน และการขาดแคลนแรงงาน ผลวิจัยแบบตัดกลุ่มยังแสดงถึงการขาดความร่วมมือระหว่างกลุ่มผู้มีส่วนร่วม และมีผลจากช่วงเริ่มโครงการต่อเนื่องถึงช่วงระหว่างก่อสร้าง

งานวิจัยที่ผ่านมาพยายามบ่งชี้ปัจจัยสาเหตุความล่าช้าของโครงการก่อสร้างไม่ว่าจะเป็นของไทยหรือของต่างประเทศเช่น Hargeisa, India, Pakistan, Turkey, Ghana [12-16] มีส่วนคล้ายคลึงกัน ได้แก่ เป็นการเก็บข้อมูลที่เจาะจงเฉพาะบางประเภท

ของงานก่อสร้าง หรือเฉพาะงานของรัฐ หรือบ้างก็จำกัดเฉพาะบางพื้นที่ตั้งโครงการเพียงบริเวณแคบ ๆ และบ้างก็ใช้ความเห็นของตัวอย่างหลากหลายความเชี่ยวชาญที่ไม่ใช่เฉพาะวิศวกรโยธา ทำให้ทัศนคติแตกต่างกันคนละทิศทางมาก หรือไม่พิจารณาองค์ประกอบทั้งสามฝ่าย ส่วนวิธีการวิเคราะห์ข้อมูลก็จะใช้ Relative Importance Index (RII) โดยไม่ได้วิเคราะห์ความเชื่อมโยงระหว่างคุณลักษณะของกลุ่มกับคะแนนความคิดเห็นต่อปัจจัยด้วยวิธีการทดสอบสมมติฐาน (Hypothesis Testing) งานวิจัยนี้จึงรวบรวมข้อมูลสาเหตุความล่าช้าต่าง ๆ จากการทบทวนวรรณกรรมเป็นข้อมูลในการทำแบบสอบถาม โดยแบ่งปัจจัยสาเหตุของความล่าช้าออกเป็นปัจจัยหลักและปัจจัยย่อยตามกลุ่มผู้ดำเนินการหลักขององค์กรก่อสร้างทั้งสามฝ่ายคือ เจ้าของโครงการ ผู้ออกแบบและควบคุมงาน และผู้รับเหมา เพื่อสำรวจความคิดเห็นเฉพาะจากวิศวกรโยธา ผู้มีประสบการณ์มากกว่าห้าปีในฐานะที่เป็นผู้มีส่วนเกี่ยวข้องโดยตรงในโครงการก่อสร้างและมีวิจญาณที่ดี เพื่อวิเคราะห์ทางสถิติด้วยวิธีทดสอบสมมติฐาน (Hypothesis Testing) ของความแตกต่างของความคิดเห็นจากตัวแปรต้นแต่ละตัว

3. วิธีดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการวิจัยเชิงสำรวจ (Survey research) ด้วยแบบสอบถามที่สร้างขึ้นจากการทบทวนวรรณกรรมถึงสาเหตุความล่าช้าของงานก่อสร้าง เพื่อรวบรวมและวิเคราะห์ความคิดเห็นของกลุ่มตัวอย่างตามหลักสถิติ

3.1 ปัจจัยสาเหตุความล่าช้าของงานก่อสร้าง

จากการทบทวนวรรณกรรมต่าง ๆ งานวิจัยนี้กำหนดหมวดสาเหตุของความล่าช้าของงานก่อสร้างจากแต่ละฝ่ายขององค์กรก่อสร้าง และกระจายต่อออกเป็นปัจจัยหลักและปัจจัยย่อย ตามลำดับดังนี้ ก. ฝ่ายเจ้าของโครงการ แบ่งเป็นห้าปัจจัยหลัก ข. ฝ่ายผู้ออกแบบและควบคุมงาน แบ่งเป็นสามปัจจัยหลัก และ ค. ฝ่ายผู้รับเหมาแบ่งเป็นสามปัจจัยหลัก รวม 11 ปัจจัยหลัก และปัจจัยหลักเหล่านี้ถูกกระจายต่อออกเป็นปัจจัยย่อย รวมทั้งสิ้น 49 ปัจจัย

ตารางที่ 1 ลำดับชั้นการแยกย่อยปัจจัยสาเหตุความล่าช้าของงานก่อสร้าง

ระดับที่	ประเด็นจำแนก	จำนวนรวม
1	บทบาทขององค์กร	3
2	ปัจจัยหลักจากการปฏิบัติงานด้านต่าง ๆ	11
3	ปัจจัยย่อย	49

3.2 ประชากร

ประชากรของการวิจัยนี้ คือวิศวกรโยธา ที่ขึ้นทะเบียนอยู่ในฐานข้อมูลของสภาวิศวกร ซึ่งรายงานวิศวกรระดับภาคีวิศวกร 52,070 คน ระดับสามัญวิศวกร 9,638 คน และระดับวุฒิวิศวกร 1,942 คน รวมจำนวนวิศวกรโยธา ทั้งสิ้น 63,650 คน

3.3 กลุ่มตัวอย่าง

เนื่องจากประชากรมีขนาดใหญ่มาก ทำให้ขนาดของกลุ่มตัวอย่างใหญ่ตามไปด้วย การเก็บข้อมูลจากกลุ่มตัวอย่างขนาดใหญ่มากเป็นอุปสรรคสำคัญของการวิจัยเชิงสำรวจ อย่างไรก็ตาม ผู้ขึ้นทะเบียน



เป็นวิศวกรโยธาบางส่วนอาจไม่ได้ประกอบวิชาชีพที่เกี่ยวข้องกับงานก่อสร้าง จึงไม่เหมาะกับการเป็นตัวอย่างของการวิจัยนี้ ผู้วิจัยจึงใช้วิธีคัดเลือกกลุ่มตัวอย่างแบบเจาะจง เป็นวิศวกรโยธาที่ทำงานเกี่ยวข้องกับงานก่อสร้างเป็นเวลาห้าปีขึ้นไป จำนวน 100 คน ซึ่งสอดคล้องกับการคำนวณหาขนาดกลุ่มตัวอย่างที่เหมาะสมโดยใช้สูตรของ [17] ที่ความเชื่อมั่น 0.10

$$n = \frac{N}{(1+N \times E^2)} \quad (1)$$

n = ขนาดกลุ่มตัวอย่าง

N = จำนวนประชากร (คือ 63,650)

E = ความคลาดเคลื่อนในการสุ่ม (กำหนดใช้ 0.10)

เครื่องมือวิจัยคือแบบสอบถามที่สร้างขึ้นเพื่อสำรวจความคิดเห็นของกลุ่มตัวอย่าง เป็นลักษณะคำถามแบบปลายปิด ใช้มาตราส่วนค่าตามแบบของ Likert Rating Scale 1 - 5 ที่ผ่านการทดสอบความเที่ยงตรงของแบบสอบถาม (Index of Item Objective Congruence: IOC) ซึ่งแสดงค่าความสอดคล้องระหว่างข้อคำถามกับวัตถุประสงค์หรือนิยาม โดยผู้เชี่ยวชาญสามท่าน แล้วนำมาปรับปรุงแก้ไขตามคำแนะนำก่อนจนเป็นแบบสอบถามฉบับสุดท้ายที่ใช้เก็บข้อมูล

กลุ่มตัวอย่างถูกแบ่งกลุ่มสำหรับการวิเคราะห์ทางสถิติ ตามคำตอบของข้อมูลทั่วไปที่แสดงสถานะปัจจุบันของผู้ตอบแบบสอบถาม ดังนี้

ประสบการณ์ทำงาน แบ่งเป็นช่วงจำนวนปี ได้แก่ 6-10, 11-15, 15-20, 20-25 และมากกว่า

26 ปี บทบาทงาน แบ่งเป็น เจ้าของโครงการ ผู้ออกแบบ และควบคุมงาน และผู้รับเหมา

ลักษณะงานที่รับผิดชอบ แบ่งเป็น งานออกแบบ งานควบคุมโครงการ งานบริหารโครงการ งานประมาณราคา

มูลค่างานโครงการ แบ่งเป็น ไม่เกิน 10, 10-20, 21-50, 51-100, 101-200 และมากกว่า 200 ล้านบาท

ประเภทงานก่อสร้าง แบ่งเป็น ประเภทพักอาศัย ประเภทอาคารสาธารณะ ประเภทงานโยธา และประเภทงานอุตสาหกรรม

สังกัดหน่วยงาน แบ่งเป็น บริษัทเอกชน รับราชการ และอิสระ

พื้นที่ทำงาน แบ่งเป็น ภาคเหนือ ภาคใต้ ภาคตะวันตก ภาคตะวันออก ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ภาคกลาง และกรุงเทพมหานคร/ปริมณฑล

3.4 วิธีการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

การวิเคราะห์ค่าทางสถิติพื้นฐาน ได้แก่ ร้อยละ (%) ค่าเฉลี่ย (Mean) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation: S.D.) แล้วยังวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบ ANOVA (Analysis of Variance) ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป SPSS สำหรับกลุ่มตัวอย่างที่มากกว่าสองกลุ่มย่อย โดยกำหนดระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.05 และตั้งข้อสมมติฐาน เป็น

H_0 = ความคิดเห็นของกลุ่มตัวอย่างไม่แตกต่างกัน

H_1 = ความคิดเห็นของกลุ่มตัวอย่างแตกต่างกัน
ตรวจสอบสมมติฐานของการวิจัยจากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน โดยพิจารณาจากค่า

“นัยสำคัญ” Significant (Sig.) โดยยอมรับสมมติฐานเมื่อ Sig. ≥ 0.05 ปฏิเสธสมมติฐาน เมื่อ Sig. < 0.05

4. ผลการวิจัย

ผลวิจัยได้จากการวิเคราะห์ข้อมูลคำตอบจากแบบสอบถามของกลุ่มตัวอย่าง ซึ่งได้รับคืนแบบสอบถามที่สมบูรณ์ 110 ชุด

4.1 ข้อมูลทั่วไปเกี่ยวกับกลุ่มตัวอย่าง

ข้อมูลทั่วไป ณ ปัจจุบันของผู้ตอบแบบสอบถามเป็นชาย 101 คน และหญิง 9 คน ช่วงอายุระหว่าง 41-50 ปี มีจำนวนมากที่สุดร้อยละ 61 ช่วงอายุระหว่าง 31-40 ปีร้อยละ 24 ช่วงอายุระหว่าง 21-30 ปีร้อยละ 10 และช่วงอายุ 51 ปีขึ้นไปเป็นร้อยละ 5 ตามลำดับ

แบ่งกลุ่มด้านช่วงเวลาประสบการณ์ทำงานที่เกี่ยวข้องกับงานก่อสร้าง พบว่ากลุ่มที่สัดส่วนสูงสุดสองอันดับแรกคือ ร้อยละ 46 มีประสบการณ์ช่วง 16-20 ปี และร้อยละ 20 มีประสบการณ์ช่วง 6-10 ปี

กลุ่มตัวอย่างเป็นผู้ถือใบอนุญาตประกอบอาชีพวิศวกรรมควบคุมระดับภาคีวิศวกรโยธามีจำนวนมากที่สุดร้อยละ 68 ระดับสามัญวิศวกรโยธาร้อยละ 30 และระดับวุฒิวิศวกรโยธาร้อยละ 2

บทบาทงานของกลุ่มตัวอย่างส่วนใหญ่ร้อยละ 50 เป็นผู้ออกแบบและควบคุมงาน ผู้รับเหมาร้อยละ 39 เจ้าของโครงการ ร้อยละ 9 และอื่น ๆ ร้อยละ 2 ตามลำดับ

สำหรับข้อมูลทั่วไปด้านอื่น ๆ ได้แก่ มูลค่างานโครงการ ประเภทงานก่อสร้าง สังกัดหน่วยงาน และพื้นที่ทำงาน แสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ข้อมูลทั่วไป ณ ปัจจุบันของกลุ่มตัวอย่าง

ข้อมูลทั่วไป ณ ปัจจุบัน	คำตอบส่วนใหญ่	ร้อยละ
เพศ	ชาย	92
ช่วงอายุ	41-50 ปี	61
ประสบการณ์ทำงาน	16-20 ปี	46
ระดับวิศวกร	ภาคีวิศวกร	68
บทบาทงาน	ผู้ออกแบบ/ควบคุมงาน	50
ลักษณะงานที่รับผิดชอบ	ควบคุมงาน	38
มูลค่าโครงการ	> 200 ล้านบาท	37
ประเภทงานก่อสร้าง	งานโยธา	32
สังกัดหน่วยงาน	บริษัทเอกชน	63
พื้นที่ทำงาน	กรุงเทพและปริมลฑล	35

4.2 สาเหตุความล่าช้าจากความคิดเห็น

จากการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของคะแนนจากแบบสอบถามที่ถูกต้องแล้วทั้งหมด 110 ชุด จากกลุ่มตัวอย่างของการวิจัยหรือเป็นความคิดเห็นในทัศนะของวิศวกรโยธาต่อสาเหตุของความล่าช้าของงานก่อสร้าง พบว่าปัจจัยย่อยที่เป็นสาเหตุที่ได้รับคะแนนเฉลี่ยมากที่สุด 5 ลำดับแรก ได้แก่

“ค.3.5 การขาดแคลนแรงงาน”

“ค.1.1 การขาดสภาพคล่องทางการเงิน”

“ก.1.4 การเปลี่ยนแปลงเนื้องานก่อสร้างระหว่างดำเนินการ”

“ก.1.1 การกำหนดขอบเขตและวัตถุประสงค์ของงานไม่ชัดเจน” และ

“ค.1.2 ผู้รับเหมาไม่จ่ายเงินค่าแรงคนงานหรือผู้รับเหมาช่วงตามกำหนด”

สองลำดับแรกเป็นสาเหตุจากผู้รับเหมา และลำดับที่ 3 และ 4 เป็นสาเหตุจากเจ้าของโครงการ รายละเอียดค่าตัวเลขดังแสดงในตารางที่ 3



4.3 ผลการทดสอบสมมติฐาน

วิธีทดสอบสมมติฐาน โดยวิเคราะห์หาความแตกต่างของความคิดเห็นของกลุ่มตัวอย่าง (วิศวกรโยธา) แบบ ANOVA โดยตั้งสมมติฐานขึ้นเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้น (X) กับตัวแปรตาม (Y) ตัวแปรต้น (X) ที่กำหนด คือ ข้อมูลทั่วไป ณ ปัจจุบันเกี่ยวกับกลุ่มตัวอย่าง ที่ได้จากข้อคำถามในส่วนของ 1 ของแบบสอบถาม คือ

X1 = ประสบการณ์ทำงาน

X2 = บทบาทงาน

X3 = ลักษณะงานที่รับผิดชอบ

X4 = มูลค่างานโครงการ

X5 = ประเภทงานก่อสร้าง

X6 = สังกัดหน่วยงาน

X7 = พื้นที่ทำงาน

ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์กับตัวแปรตาม (Y) แบ่งออกเป็นสามระดับ ตามลำดับขั้นการแยกย่อยสาเหตุปัจจัยของความล่าช้า คือ บทบาทขององค์กร (Y1) ปัจจัยหลักจากการปฏิบัติงานด้านต่าง ๆ (Y2) และปัจจัยย่อยต่าง ๆ (Y3) ดังนี้

ตารางที่ 3 คะแนนจากความคิดเห็นต่อแต่ละปัจจัย

รหัส	โครงสร้างการกระจายปัจจัยสาเหตุความล่าช้า	Mean	S.D.
ก.	สาเหตุจากเจ้าของโครงการ	3.5	0.7
ก.1	ปัจจัยการกำหนดขอบเขตของงาน	3.6	0.7
ก.1.1	การกำหนดขอบเขตและวัตถุประสงค์ของงานไม่ชัดเจน	3.9	1.1
ก.1.2	การกำหนดระยะเวลาสำหรับการประกวดราคาที่สูงเกินไป	3.5	0.9
ก.1.3	การเปลี่ยนแปลงเนื้องานก่อนดำเนินการ	3.4	0.9

ก.1.4	การเปลี่ยนแปลงเนื้องานระหว่างดำเนินการ	4.0	0.9
ก.1.5	การเปลี่ยนแปลงเนื้องานหลังจากงานแล้วเสร็จ	3.6	1.2
ก.1.6	การสั่งเปลี่ยนวิธีการทำงานและมาตรฐานการตรวจงาน	3.5	1.0
ก.2	ปัจจัยพื้นที่ก่อสร้าง	3.4	0.8
ก.2.1	การขออนุญาตต่อหน่วยราชการล่าช้า	3.5	1.0
ก.2.2	พื้นที่ก่อสร้างคับแคบ	3.2	1.0
ก.2.3	การส่งมอบพื้นที่ล่าช้า	3.5	1.1
ก.2.4	การขัดแย้งกับชุมชนข้างเคียง	3.4	1.1
ก.2.5	สภาพเส้นทางจราจรเป็นอุปสรรค	3.2	1.1
ก.3	ปัจจัยเกี่ยวเนื่องกับผู้ออกแบบและควบคุมงาน	3.5	0.8
ก.3.1	แบบก่อสร้างไม่ถูกต้องสอบแก้ไขและควมรวมให้สมบูรณ์	3.7	0.9
ก.3.2	การอนุมัติแบบก่อสร้าง (Shop Drawing) ล่าช้า	3.6	1.1
ก.3.3	ขอบเขตการจ้างผู้ออกแบบไม่ครอบคลุมช่วงก่อสร้าง	3.3	1.0
ก.3.4	ความเห็นแย้งหรือไม่ยอมรับคำแนะนำของผู้ควบคุมงาน	3.4	1.0
ก.4	ปัจจัยเกี่ยวเนื่องกับผู้รับเหมา	3.3	0.9
ก.4.1	การประสานงานกับผู้รับเหมาล่าช้า	3.3	1.0
ก.4.2	การแทรกแซงการทำงานของผู้รับเหมา	3.2	1.1
ก.4.3	ผู้รับเหมาช่วงที่จ้างโดยเจ้าของโครงการล่าช้า	3.4	1.0
ก.5	ปัจจัยภายในองค์กร	3.5	0.9
ก.5.1	จำนวนบุคลากรไม่เพียงพอ	3.2	1.0
ก.5.2	การตัดสินใจล่าช้าผ่านการพิจารณาหลายขั้นตอน	3.6	1.0
ก.5.3	ขาดความเชี่ยวชาญในการบริหารโครงการ	3.6	1.0
ข.	สาเหตุจากผู้ออกแบบและควบคุมงาน	3.5	0.7
ข.1	ปัจจัยเกี่ยวข้องกับการรายละเอียดโครงการ	3.5	0.7
ข.1.1	ขาดการตรวจสอบพื้นที่ก่อสร้างก่อนการออกแบบ	3.4	0.9
ข.1.2	การออกแบบล่าช้า	3.5	1.0
ข.1.3	การกำหนดแผนงานก่อสร้างไม่สอดคล้องกับปริมาณงาน	3.7	1.0
ข.1.4	การจัดทำรายละเอียดทางเทคนิคของวัสดุไม่สมบูรณ์/ผิดพลาด	3.3	0.9
ข.2	ปัจจัยวิธีทำงาน	3.6	0.8
ข.2.1	การกำหนดวิธีและเทคนิคก่อสร้างไม่เหมาะสมกับการปฏิบัติงานจริง	3.5	0.9
ข.2.2	การกำหนดแผนงานไม่สอดคล้องกับเงินทุนหมุนเวียน	3.7	1.1
ข.2.3	การกำหนดราคางานต่ำกว่าราคาตลาด	3.7	1.1

ข.2.4	การตรวจสอบและควบคุมงานเป็นอุปสรรคต่อการปฏิบัติงานก่อสร้าง	3.6	0.8
ข.2.5	ความผิดพลาดของเอกสารประกอบการทำงาน	3.3	0.9
ข.2.6	กระบวนการตัดสินใจล่าช้า	3.8	1.0
ข.3	ปัจจัยภายในองค์กร	3.6	0.8
ข.3.1	บุคลากรควบคุมงานขาดประสบการณ์และความเชี่ยวชาญ	3.7	1.0
ข.3.2	บุคลากรควบคุมงานไม่เพียงพอ	3.5	0.9
ข.3.3	ขั้นตอนการทำงานมากและไม่มีประสิทธิภาพ	3.5	0.9
ค.	สาเหตุจากผู้รับเหมา	3.7	0.7
ค.1	ปัจจัยด้านการเงิน	3.9	1.0
ค.1.1	การขาดสภาพคล่องทางการเงิน	4.0	1.1
ค.1.2	ไม่จ่ายค่าแรงคนงานหรือผู้รับเหมาช่วงตามกำหนด	3.8	1.1
ค.1.3	ไม่จ่ายชำระหนี้วัสดุก่อสร้างตามกำหนด	3.7	1.1
ค.2	ปัจจัยการบริหารงานก่อสร้าง	3.6	0.7
ค.2.1	การทำแบบก่อสร้าง (Shop Drawing) ล่าช้า	3.6	0.9
ค.2.2	บุคลากรไม่เพียงพอ/ไม่เหมาะสมกับงาน	3.7	0.9
ค.2.3	การติดตามความก้าวหน้าและปรับแผนงานบกพร่อง	3.7	0.9
ค.2.4	การประสานงานที่หน้างานบกพร่อง	3.6	0.9
ค.2.5	การสื่อสารและประสานงานกับเจ้าของโครงการไม่มีประสิทธิภาพ	3.7	1.0
ค.2.6	การประมาณราคาผิดพลาด	3.4	0.9
ค.2.7	การทำงานผิดพลาด/ผลงานด้อยคุณภาพ	3.6	0.8
ค.3	ปัจจัยภายในองค์กร	3.7	0.8
ค.3.1	ขาดบุคลากรบริหารโครงการ	3.7	0.9
ค.3.2	ความบกพร่องในการจัดการและประสานงานภายในองค์กร	3.7	0.9
ค.3.3	ความขัดแย้งกันเองภายในองค์กร	3.4	1.0
ค.3.4	การเปลี่ยนตัวผู้ปฏิบัติงานบ่อยครั้ง	3.3	1.0
ค.3.5	การขาดแคลนแรงงาน	4.3	0.9

4.3.1 สาเหตุความล่าช้าตามบทบาทขององค์กร (Y1)

ผลบ่งชี้ว่า วิศวกรโยธาที่มีความแตกต่างกันด้านตัวแปรต้น “ประเภทงานก่อสร้าง” (X5) ที่ปฏิบัติงานอยู่ปัจจุบัน มีความเห็นที่แตกต่างกันต่อสาเหตุความล่าช้าจากฝ่ายเจ้าของโครงการ วิศวกรโยธาที่มีความแตกต่างกันด้าน “บทบาทงาน” (X2)

มีความเห็นที่แตกต่างถึงสาเหตุความล่าช้าจากฝ่ายผู้ออกแบบและควบคุมงาน และจากฝ่ายผู้รับเหมา สำหรับตัวแปรต้นอื่นที่เหลือมีความเห็นต่อตัวแปรตามไม่แตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 4 สะท้อนให้เห็นแนวโน้มของทัศนคติของผู้ตอบแบบสอบถามที่เป็นหนึ่งฝ่ายในสามขององค์กรก่อสร้างจะให้คะแนนมากในกลุ่มปัจจัยจากความรับผิดชอบของบทบาทอื่น จึงเป็นลักษณะที่กล่าวโทษสาเหตุของความล่าช้ามาจากฝ่ายอื่นที่ไม่ใช่ตนเอง

ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์ค่า Sig. ของบทบาทขององค์กร (Y1)

		Sig.						
	Y1	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7
ก.	0.99	0.12	0.69	0.25	0.02	0.60	0.07	
ข.	1.00	0.03	0.71	0.77	0.16	0.26	0.44	
ค.	0.96	0.02	0.81	0.12	0.07	0.29	0.56	

4.3.2 สาเหตุความล่าช้าตามปัจจัยหลัก

จากตารางที่ 5 ผลการทดสอบสมมติฐานตัวแปรต้นต่อตัวแปรตามที่เป็นปัจจัยหลักของสาเหตุความล่าช้า พบว่าวิศวกรที่มีช่วง “ประสบการณ์ทำงาน” (X1) “ลักษณะงานที่รับผิดชอบ” (X3) และ “สังกัดหน่วยงาน” (X6) ที่แตกต่างกัน มีความเห็นต่อทุกปัจจัยหลักไม่แตกต่างกัน

วิศวกรโยธาที่มี “บทบาทงาน” (X2) แตกต่างกัน มีความเห็นที่แตกต่างกันต่อห้าปัจจัยหลัก คือ ก.3 ก.5 ข.2 ค.2 และ ค.3 แต่ปัจจัยหลักอื่นที่เหลือมีความเห็นที่ไม่แตกต่างกัน

วิศวกรโยธาที่ทำงาน “มูลค่างานโครงการ” (X4) ปัจจุบันที่แตกต่างกัน มีความเห็นที่แตกต่าง



กันต่อสองปัจจัยหลัก คือ ก.2 และ ค.1 ส่วนที่เหลือมีความเห็นไม่แตกต่างกัน

วิศวกรโยธาที่ทำงานใน “ประเภทงานก่อสร้าง” (X5) ปัจจุบันที่แตกต่างกัน มีความเห็นแตกต่างกันต่อสามปัจจัยหลัก คือ ก.2 ก.5 และ ค.3 และ “พื้นที่ทำงาน” (X7) แตกต่างกันต่อปัจจัยหลัก ก.2 ก.4 และ ก.5 แต่ส่วนที่เหลือ มีความเห็นไม่แตกต่างกัน

ตารางที่ 5 ผลการวิเคราะห์ค่า Sig. ของปัจจัยหลัก (Y2)

Sig.							
Y2	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7
ก.1	0.56	0.14	0.53	0.37	0.12	0.45	0.59
ก.2	0.92	0.81	0.45	0.03	0.01	0.24	0.03
ก.3	0.98	0.03	0.64	0.74	0.05	0.92	0.12
ก.4	0.86	0.23	0.64	0.35	0.07	0.75	0.04
ก.5	0.69	0.04	0.87	0.24	0.01	0.42	0.03
ข.1	0.95	0.18	0.53	0.41	0.32	0.19	0.58
ข.2	0.90	0.02	0.46	0.73	0.12	0.16	0.47
ข.3	0.99	0.06	0.96	0.99	0.26	0.61	0.30
ค.1	0.87	0.32	0.61	0.04	0.19	0.18	0.42
ค.2	0.91	0.02	0.87	0.26	0.11	0.46	0.67
ค.3	0.95	0.00	0.80	0.23	0.05	0.32	0.58

4.3.3 สาเหตุความล่าช้าตามปัจจัยย่อย

เนื่องจากงานวิจัยนี้ได้จำแนกปัจจัยย่อยที่เป็นสาเหตุความล่าช้าถึง 49 ปัจจัย ผลการทดสอบสมมติฐานจึงมีเป็นจำนวนมาก ดังนั้นจึงรายงานเพียงภาพรวมของผลการวิเคราะห์โดยสังเขปว่า ตัวแปรต้น “ประสิทธิภาพการทำงาน” (X1) และ “ลักษณะงานที่ความรับผิดชอบ” (X3) ไม่มีผลต่อความเห็น

“บทบาทงาน” (X2) มีความเห็นที่แตกต่างกันต่อ 10 ปัจจัยย่อย จากทั้งหมด 49 ปัจจัย

“มูลค่างานโครงการ” (X4) มีความเห็นแตกต่างกันต่อสามปัจจัยย่อย

“ประเภทงานก่อสร้าง” (X5) มีความเห็นแตกต่างกันต่อเจ็ดปัจจัยย่อย

“สังกัดหน่วยงาน” (X6) มีความเห็นแตกต่างกันต่อสองปัจจัยย่อย

“พื้นที่ทำงาน” (X7) มีความเห็นที่แตกต่างกันต่อห้าปัจจัยย่อย

ข้อสังเกตต่อผลลัพธ์ในทัศนภาพรวมของวิศวกรโยธากลุ่มตัวอย่าง มีความเห็นสอดคล้องกันว่า ปัจจัยย่อยที่เป็นสาเหตุความล่าช้าในลำดับความสำคัญต้น ๆ มาจากความรับผิดชอบของฝ่ายผู้รับเหมา คือ การขาดแคลนแรงงาน การขาดสภาพคล่องทางการเงิน และการไม่จ่ายเงินค่าแรงคนงานหรือผู้รับเหมาช่วงตามกำหนด ทำให้เห็นได้ว่า ฝ่ายผู้รับเหมาเป็นผู้แบกรับความรับผิดชอบหนักที่สุดในการดำเนินโครงการให้เสร็จสิ้นตามกำหนด

สำหรับสาเหตุจากการปฏิบัติงานของฝ่ายผู้ออกแบบและควบคุมงานในทัศนของวิศวกรโยธามีความเห็นว่ กระบวนการตัดสินใจล่าช้า บุคลากรควบคุมงานขาดประสบการณ์และความเชี่ยวชาญ และการกำหนดแผนงานไม่สอดคล้องกับเงินทุนหมุนเวียน ล้วนเป็นสาเหตุความล่าช้าที่สำคัญ

และในทัศนของวิศวกรโยธาต่อการปฏิบัติงานของฝ่ายเจ้าของโครงการที่ส่งผลสำคัญต่อความล่าช้า คือ การเปลี่ยนแปลงเนื้องานระหว่างดำเนินการ และการกำหนดขอบเขตและวัตถุประสงค์ของงานไม่ชัดเจน

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบผลจากการวิจัยนี้กับการวิจัยในอดีต ปรากฏความสอดคล้องกับ [9] และ [10] คือ ปัจจัยการขาดแคลนแรงงานก็เป็นสาเหตุสำคัญที่สุดของความล่าช้าในงานก่อสร้าง และรองลงมาเป็นการขาดสภาพคล่องทางการเงินของผู้รับเหมา นอกจากนี้งานวิจัย [8] ยังบ่งชี้สาเหตุสำคัญจากแต่ละกลุ่มองค์กรของโครงการสอดคล้องกับผลการวิจัยนี้ คือ สาเหตุมาจากผู้รับเหมาคือ ความขาดแคลนแรงงาน สาเหตุจากเจ้าของโครงการคือ การกำหนดขอบเขต และวัตถุประสงค์ของงานไม่ชัดเจน และสาเหตุจากผู้ออกแบบและควบคุมงานคือ กระบวนการตัดสินใจล่าช้า

5. บทสรุป

การสำรวจและรวบรวมข้อมูลจากแบบสอบถามในทัศนะความเห็นของวิศวกรโยธา ต่อสาเหตุของความล่าช้าของงานก่อสร้างจากแต่ละฝ่ายทั้งสามขององค์กรก่อสร้าง และถูกจัดแยกเป็นปัจจัยหลักและปัจจัยย่อยด้านต่าง ๆ ตามลำดับ สรุปได้ว่าปัจจัยย่อย 10 ลำดับแรก มาจากผู้รับเหมามากที่สุด หกปัจจัยย่อย (จากสาม ปัจจัยหลัก) ส่วนผู้ออกแบบและควบคุมงานสองปัจจัยย่อย (จากสองปัจจัยหลัก) และมาจากเจ้าของโครงการสองปัจจัยย่อย (จากปัจจัยหลักด้านการกำหนดขอบเขตของงาน) ดังแสดงในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ลำดับสาเหตุความล่าช้าในทัศนะของวิศวกรโยธา

ลำดับ	ปัจจัยย่อย	ปัจจัยหลัก	องค์กร
1	การขาดแคลนแรงงาน	ปัจจัยภายในองค์กร	ผู้รับเหมา
2	การขาดสภาพคล่องทางการเงิน	ปัจจัยด้านการเงิน	ผู้รับเหมา
3	การเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขระหว่างดำเนินการ	ปัจจัยการกำหนดขอบเขตของงาน	เจ้าของโครงการ
4	การกำหนดขอบเขต และวัตถุประสงค์ของงานไม่ชัดเจน	ปัจจัยการกำหนดขอบเขตของงาน	เจ้าของโครงการ
5	ไม่จ่ายค่าแรงคนงาน หรือผู้รับเหมาช่วงตามกำหนด	ปัจจัยด้านการเงิน	ผู้รับเหมา
6	กระบวนการตัดสินใจล่าช้า	ปัจจัยวิธีการทำงาน	ผู้ออกแบบและควบคุม
7	บุคลากรควบคุมงานขาดประสบการณ์และความเชี่ยวชาญ	ปัจจัยภายในองค์กร	ผู้ออกแบบและควบคุม
8	ไม่จ่ายชำระหนี้วัสดุก่อสร้างตามกำหนด	ปัจจัยด้านการเงิน	ผู้รับเหมา
9	บุคลากรไม่เพียงพอ/ไม่เหมาะสมกับงาน	ปัจจัยการบริหารงานก่อสร้าง	ผู้รับเหมา
10	การสื่อสารและประสานงานกับเจ้าของโครงการไม่มีประสิทธิภาพ	ปัจจัยการบริหารงานก่อสร้าง	ผู้รับเหมา

งานวิจัยนี้ทำการทดสอบสมมติฐานเพื่อหาความเชื่อมโยงระหว่างคุณลักษณะของกลุ่มตัวอย่างกับความเห็นต่อปัจจัยของความล่าช้า ผลทดสอบสมมติฐานบ่งชี้ว่า วิศวกรโยธา 110 คน ที่มีประสบการณ์บทบาทงาน และลักษณะงานที่รับผิดชอบแตกต่างกัน แต่มีความเห็นต่อสาเหตุความล่าช้าทั้งระดับกลุ่มบทบาทขององค์กร ระดับปัจจัยหลัก และปัจจัยย่อย ไม่ได้แตกต่างกันทั้งหมด ดังนั้น จึงสรุปได้ว่า มีเพียง



บางตัวแปรต้นเท่านั้น มีผลต่อตัวแปรตามอย่างมีนัยสำคัญ ตารางที่ 7 แสดงร้อยละของจำนวนปัจจัยที่มีความเห็นแตกต่างกันและไม่แตกต่างกันของผลการทดสอบสมมติฐาน สรุปได้ว่า กลุ่มตัวอย่างมีทัศนะทั่วไปว่าสาเหตุความล่าช้ามาจากฝ่ายอื่นที่ไม่ใช่ฝ่ายเดียวกับตนเอง จึงสะท้อนเป็นร้อยละความเห็นที่แตกต่างกันสูงในตัวแปรต้น “บทบาทงาน” (X2) (ร้อยละ 67, 45, 20 ของจำนวนปัจจัยที่วิเคราะห์ในแต่ละระดับ บทบาทองค์กร (Y1) ปัจจัยหลัก (Y2) และปัจจัยย่อย (Y3) ตามลำดับ)

ความเห็นที่แตกต่างกันสูงยังเกิดกับตัวแปรต้น “ประเภทงานก่อสร้าง” (X5) (ร้อยละ 33, 27, 18 ของจำนวนปัจจัยที่วิเคราะห์ในแต่ละระดับ บทบาทองค์กร (Y1) ปัจจัยหลัก (Y2) และปัจจัยย่อย (Y3) ตามลำดับ) สะท้อนว่า ประเภทงานก่อสร้างแต่ละประเภทมีเงื่อนไข และความซับซ้อนของงานแตกต่างกัน สร้างให้เกิดปัจจัยสาเหตุของความล่าช้าได้แตกต่างกันเฉพาะตัวของประเภทงานก่อสร้างนั้น ๆ

ตารางที่ 7 สรุปผลทดสอบสมมติฐานความล่าช้าในทัศนะของวิศวกรโยธา

ตัวแปรต้น	ร้อยละของปัจจัยย่อย		ร้อยละของปัจจัยหลัก		ร้อยละของกลุ่มบทบาท	
	ความเห็นแตกต่าง	ความเห็นไม่แตกต่าง	ความเห็นแตกต่าง	ความเห็นไม่แตกต่าง	ความเห็นแตกต่าง	ความเห็นไม่แตกต่าง
X1	-	100	-	100	-	100
X2	20	80	45	55	67	33
X3	-	100	-	100	-	100
X4	6	94	9	91	-	100
X5	18	82	27	73	33	67
X6	4	96	-	100	-	100
X7	10	90	27	73	-	100

วิศวกรโยธาผู้ตอบแบบสอบถามที่เป็นฝ่ายเจ้าของโครงการ มีความเห็นว่า การติดต่อขออนุญาตต่อหน่วยราชการที่เกี่ยวข้องในพื้นที่ทำงาน เป็นสาเหตุให้งานก่อสร้างล่าช้ามากที่สุด ซึ่งเป็นปัจจัยที่มาจากฝ่ายตนเอง ขณะที่ฝ่ายผู้ออกแบบและควบคุมงาน และฝ่ายผู้รับเหมา เห็นพ้องกันว่าสาเหตุจากการขาดแคลนแรงงานทำให้งานล่าช้ามากที่สุด ซึ่งเป็นปัจจัยจากฝ่ายตนเองคือผู้รับเหมา

วิศวกรโยธาที่ปฏิบัติงานทั้งสามฝ่ายมีความเห็นตรงกันว่า ปัจจัยการขาดสภาพคล่องทางการเงินในกลุ่มปัจจัยหลักด้านการเงินของผู้รับเหมา เป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้งานล่าช้า ซึ่งทั้งปัจจัยการขาดแคลนแรงงานและปัจจัยการขาดสภาพคล่องทางการเงินนี้เป็นประเด็นด้านทรัพยากรของโครงการที่มักเป็นสาเหตุสำคัญที่สุดของความล่าช้าของประเทศกำลังพัฒนา และแตกต่างจากสาเหตุของประเทศที่พัฒนาแล้วที่มีมากมาจากประเด็นภัยธรรมชาติ [2]

ดังนั้น ผลวิจัยนี้ทำให้ทราบว่า ก่อนการดำเนินโครงการ ฝ่ายผู้รับเหมาจะต้องเตรียมแรงงาน และเงินทุนหมุนเวียนให้เพียงพอ และมีสภาพคล่องมากพอสำหรับจ่ายให้แก่คนงานและผู้รับเหมาช่วงตามกำหนด สำหรับฝ่ายเจ้าของโครงการเองจะต้องกำหนดขอบเขตเนื้องานให้ชัดเจน และสมบูรณ์ที่สุด เพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเนื้องานระหว่างก่อสร้างน้อยที่สุด และสำหรับฝ่ายผู้ออกแบบและควบคุมงานจะต้องเตรียมความพร้อมของบุคคลากรทั้งจำนวน ประสิทธิภาพ และความเชี่ยวชาญให้เพียงพอ เพื่อให้กระบวนการตัดสินใจรวดเร็ว เป็นเอกภาพ

6. เอกสารอ้างอิง

[1] Zidane Y J T, and Andersen B (2018). The top 10 universal delay factors in construction projects. *International Journal of Managing Projects in Business*, 11(3): 650–672.

[2] Durdyev S, and Hosseini M R (2020). Causes of delays on construction projects: a comprehensive list. *International Journal of Managing Projects in business*, 13(1): 20–46.

[3] Johnson R M, and Babu R II (2020). Time and cost overruns in the UAE construction industry: a critical analysis. *International Journal of Construction Management*, 20(5): 402–411.

[4] Wang T K, Ford D N, Chong H Y, and Zhang W (2018). Causes of delays in the construction phase of Chinese building projects. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 25(11): 1534-1551.

[5] Muhwezi L, Acai J, and Otim G (2014). An assessment of the factors causing delays on building construction projects in Uganda. *International Journal of Construction Engineering and Management*, 3(1): 13–23.

[6] Nafe Assafi M, Hoque M I, and Hossain M M (2022). Investigating the causes

of construction delay on the perspective of organization-sectors involved in the construction industry of Bangladesh. *International Journal of Building Pathology and Adaptation* [Preprint].

[7] Bramble B B and Callahan M T (1987). *Construction Delay Claims*, New York. John Wiley & Sons Inc.

[8] วุฒิพงศ์ อ่อนศรีสมบัติ (2556). การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความล่าช้าในโครงการก่อสร้างอาคารในเขตภาคตะวันออกเฉียงเหนือ. *โครงการหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการบริหารงานก่อสร้างและสาธารณูปโภค สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี*.

[9] วรพล จันทนสิน (2553). *แนวทางการป้องกันและแก้ไขความล่าช้าในงานก่อสร้าง กรณีศึกษาอาคารชุดในเขตกรุงเทพมหานคร. วิทยานิพนธ์สถาปัตยกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาสถาปัตยกรรม คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์และผังเมือง มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์*.

[10] โสภณ ศรีทอง (2559). *สาเหตุที่ทำให้เกิดความล่าช้าในโครงการก่อสร้างขององค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นในเขตอำเภอโกสุมพิสัย จังหวัดมหาสารคาม. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต การจัดการงานวิศวกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม*.

[11] วรานนท์ คงสง และ ชัยวัฒน์ ภูวรกุลชัย (2562). *มูลเหตุของความล่าช้าในโครงการก่อสร้างโดยวิเคราะห์ดัชนีความสัมพันธ์. วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ* 29 (2): 270-281.



- [12] Fashina A A, Omar M A, Sheikh A A, and Fakunle F F (2021). Exploring the significant factors that influence delays in construction projects in Hargeisa. *Heliyon*, 7(4): e06826. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06826>.
- [13] Doloi H, Sawhney A, Iyer K C, and Rentala S (2012). Analysing factors affecting delays in Indian construction projects. *International journal of project management*, 30(4): 479–489.
- [14] Haseeb M, Bibi A, and Rabbani W (2011). Problems of projects and effects of delays in the construction industry of Pakistan. *Australian journal of business and management research*, 1(5): 41–50.
- [15] Kazaz A, Ulubeyli S, and Tuncbilekli N A (2012). Causes of delays in construction projects in Turkey. *Journal of Civil Engineering and Management*, 18(3): 426–435.
- [16] Fugar F D, and Agyakwah-Baah A B (2010). Delays in building construction projects in Ghana. *Australasian Journal of Construction Economics and Building*, 10(1): 128–141.
- [17] Yamane T (1967). *Statistics: An Introductory Analysis*. 2nd Ed., New York: Harper and Row.

ผลของรูปแบบและขนาดรูเจาะที่มีต่อการชะลอการร้าวความล้าในเหล็กแผ่นภายใต้แรงดัด

Effect of Stop-hole Arrangement and Diameter on Crack Growth Retardation of Steel Plate under Flexural Loading

สัจจา จันทรักษา ดนัย สุขพลับพลา และ ปิยะ โชติกไกร
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
E-mail: satja.j@ku.th, danai3010@hotmail.com, fengpyc@ku.ac.th



บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอผลรูปแบบและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะแบบเดี่ยว รูเจาะแบบคู่ และรูเจาะแบบขนานข้างที่มีต่อการยืดอายุความล้าของแผ่นเหล็กภายใต้แรงดัดนอกระนาบ ผลของรูปแบบการเจาะรูที่มีต่อการชะลอการขยายตัวของรอยร้าวความล้าได้รับการทดสอบในตัวอย่างแผ่นเหล็กจำนวนหกตัวอย่าง ที่มีรอยร้าวทะลุความหนากลางแผ่นเหล็กภายใต้อัตราส่วนความเค้น -1 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ได้รับการพัฒนาเพื่อประเมินตัวประกอบความเข้มของความเค้นที่ปลายรอยร้าว และความเค้นหนาแน่นรอบรูเจาะ ผลการทดลอง และการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่า การเจาะรูสามารถชะลอการขยายตัวของรอยร้าวภายใต้แรงดัดได้อย่างมีประสิทธิภาพ แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่พิจารณาการสัมผัสของผิวรอยร้าวให้ตัวประกอบความเข้มของความเค้น และทิศทางการขยายตัวของรอยร้าวได้อย่างเหมาะสม ความเค้นหนาแน่นรอบรูเจาะลดลงตามการเพิ่มขึ้นของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูเจาะสำหรับขนาดรูเจาะที่เท่ากันรูเจาะแบบขนานข้างให้ความเค้นหนาแน่นรอบรูเจาะต่ำสุด และมีอายุความล้าของรอยร้าวออกจากรูเจาะมากกว่ารูเจาะแบบคู่และแบบเดี่ยว ตามลำดับ ตำแหน่งรูเจาะแบบขนานข้างที่มีระยะระหว่างปลายรอยร้าวและจุดศูนย์กลางรูเจาะเท่ากับ -0.25 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูเจาะสามารถชะลอการขยายตัวของรอยร้าวได้สูงสุด



คำสำคัญ:

การชะลอการขยายตัวของรอยร้าว; รอยร้าวความล้า; ไฟไนต์เอลิเมนต์; รูเจาะ; ตำแหน่งรูเจาะ



Abstract

This paper presents the effects of stop-hole arrangement and diameter (D) of a single stop-drill hole (SDH), double SDH, and crack flank holes (CFH) on the fatigue life



extension of steel plate under out-of-plane flexural loading. The effect of stop-hole configurations on fatigue crack retardation was experimentally investigated on six steel plate specimens with a central through-thickness crack and a stress ratio (R) of -1. Finite element models were developed to evaluate the stress intensity factor at crack tips and the stress concentration around SDH. The experimental and analytical results showed that SDH effectively retarded the propagation of fatigue cracks under flexural loading. The finite element models considering crack surface interference provided a reasonable estimate of the stress intensity factor at crack tips and a prediction of the crack growth direction. The stress concentration around stop holes decreased with an increase in D . For the same D , CFH gave the lowest stop-hole stress concentration, which provided the longest fatigue life initiation from the drilled hole, followed by double SDH and single SDH, respectively. The CFH with a distance between the crack tip and center of the drilled holes of $-0.25D$ provided the most significant fatigue crack retardation.

Keywords: crack growth retardation; fatigue crack; finite element; stop-drill hole; stop-hole location

1. บทนำ

โครงสร้างเหล็กเมื่อมีแรงกระทำซ้ำซ้อนอาจเกิดรอยร้าวความล้าจากตำแหน่งที่มีความเค้นหนาแน่น (Stress Concentration, K_t) สูง รอยร้าวจะมีการขยายความยาว และความลึกตามจำนวนรอบของแรงกระทำจนอาจกลายเป็นรอยร้าวทะลุความหนา (through-thickness crack) ซึ่งส่งผลต่อกำลังรับน้ำหนัก และความปลอดภัยในการใช้โครงสร้างสำหรับโครงสร้างที่ไม่สามารถเปลี่ยนชิ้นส่วนทดแทนหรือเสริมกำลังได้ทันทีหลังจากการตรวจพบรอยร้าวจะมีความจำเป็นต้องชะลอหรือหยุดการขยายตัวของรอยร้าวที่เกิดขึ้น การเจาะรู (stop drill hole, SDH) เป็นวิธีหนึ่งที่มีประสิทธิภาพในการชะลอ หรือ

หยุดการขยายตัวของรอยร้าวความล้าด้วยการเปลี่ยน stress singularity ที่ปลายรอยร้าวให้กลายเป็นรอยบาก (notch) [1] การเกิดรอยร้าวใหม่ออกจากรูเจาะจะต้องอาศัยจำนวนรอบของแรงกระทำที่เพิ่มขึ้น การเจาะรูจึงช่วยยืดอายุการใช้งานของโครงสร้างได้ โดยประสิทธิภาพของการเจาะรูในการยืดอายุความล้าขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ขนาด และตำแหน่งของรูเจาะ ขนาดของรอยร้าว ประเภทแรงกระทำ และความเค้นคงค้างรอบรูเจาะ ในอดีตได้มีการศึกษา รูปแบบการเจาะรูชะลอความล้าในทางปฏิบัติของสะพานเหล็กที่บริเวณคานขวาง ผังของสัน (Wall Ribs) และเอวของคานเหล็ก [2-4] และการศึกษา

ประสิทธิภาพของการเจาะรูหนึ่งรู [5] และหลายรู [6-8] ในการชะลอรอยร้าวความล้าภายใต้แรงดึงในห้องปฏิบัติการ

การเจาะรูแบบหนึ่งรู หรือ Single SDH เป็นการเจาะรูเดียวที่บริเวณปลายรอยร้าว โดยอาจมีตำแหน่งของรูเจาะที่ปลายรอยร้าว หรือเยื้องปลายรอยร้าว การเจาะรูเยื้องปลายรอยร้าวนอกจากจะสามารถช่วยยืดอายุความล้าแล้ว ยังช่วยเบี่ยงเบนทิศทางการขยายตัวของรอยร้าวได้ Hu *et al.* [9] ศึกษาผลของขนาด ตำแหน่ง และรูปร่างของ Single SDH ในการยืดอายุความล้าของตัวอย่าง Compact Tension Specimen (CT) ด้วยการเจาะรูเยื้องจากปลายรอยร้าว ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า การเพิ่มขนาดรูเจาะช่วยเบี่ยงเบนทิศทางของรอยร้าวและยืดอายุความล้าได้มากขึ้น โดยรูเจาะวงรีมีประสิทธิภาพในการยืดอายุความล้าได้ดีกว่ารูเจาะวงกลม Song and Shieh [10] แสดงให้เห็นว่าอายุความล้าของตัวอย่างทดสอบ CT ที่มีการเจาะรูแบบ Single SDH ที่ตำแหน่งปลายรอยร้าวจะเพิ่มขึ้นตามขนาดรูเจาะ วิธีการเจาะรูแบบ single SDH ที่ตำแหน่งปลายรอยร้าวมีประสิทธิภาพในการชะลอการขยายตัวของรอยร้าวภายใต้แรงดึงตั้งฉากกับระนาบรอยร้าว (mode 1) แรงเฉือนบนระนาบรอยร้าว (mode 2) และภายใต้แรงกระทำในหลายทิศทาง (mixed mode) [11] Razavi *et al.* [12] ศึกษาผลของขนาด และตำแหน่งรูเจาะแบบ Double SDH ซึ่งเป็นการเจาะรูสองรูที่มีขนาดเท่ากัน ซ้อนทับกันบนปลายรอยร้าวที่มีต่ออายุความล้าของเหล็กกำลังสูงภายใต้แรงดึงกระทำตั้งฉากกับระนาบรอยร้าว ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า รูเจาะแบบ Double SDH

สามารถยืดอายุความล้าได้ดีกว่าการเจาะรูแบบ Single SDH ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากัน โดยระยะเยื้องระหว่างระนาบรอยร้าว และจุดศูนย์กลางรูเจาะเท่ากับ 0.75 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูเจาะสามารถยืดอายุความล้าได้สูงสุด และอายุความล้าเพิ่มขึ้นตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูเจาะ การชะลอการขยายตัวของรอยร้าวด้วยการเจาะรูสองรูขนาดด้านข้างกับแนวการขยายตัวของรอยร้าว หรือรูเจาะแบบ Crack Flank Holes (CFH) ภายใต้แรงดึงตั้งฉากกับระนาบรอยร้าวได้รับ การวิเคราะห์ โดย Ayatollahi *et al.* [13] เจาะแบบ CFH ที่มีแนวของขอบรูเจาะทั้งสอง อยู่ที่ปลายรอยร้าวสามารถยืดอายุความล้าได้ดีกว่าตำแหน่งอื่นของรูเจาะ เนื่องจากตัวประกอบความเข้มของความเค้น (Stress Intensity Factor, K) ที่ปลายรอยร้าวลดลง เมื่อรอยร้าวมีการขยายตัวเข้าไปในพื้นที่ระหว่างรูเจาะ โดยอายุความล้ามีค่าเพิ่มมากขึ้นตามระยะห่างในแนวตั้งระหว่างระนาบรอยร้าว และขอบรูเจาะที่ลดลง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูเจาะที่เพิ่มขึ้น

ประสิทธิภาพของการเจาะรูในการชะลอการขยายตัวของรอยร้าวความล้าภายใต้แรงดึงได้มีการศึกษาอย่างแพร่หลาย อย่างไรก็ตาม งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการเจาะรูรูปแบบต่าง ๆ ในการยืดอายุความล้า โดยเฉพาะรอยร้าวภายใต้แรงดัดออกนอกกระนาบ (Out-of-Plane Bending) ซึ่งเป็นลักษณะของแรงกระทำบนแผ่นพื้นสะพาน [14] ยังมีอยู่อย่างจำกัด โดยแรงดัดออกนอกกระนาบจะทำให้เกิดการเปิดและปิดของรอยร้าว และความเค้นมีค่าไม่คงที่ตลอดความหนา การศึกษาวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นศึกษาประสิทธิภาพของ



การเจาะรูรูปแบบต่าง ๆ และผลของตำแหน่งและขนาดของรูเจาะที่มีต่อการยืดอายุความล้าของเหล็กแผ่นภายใต้แรงดัด โดยอาศัยการทดสอบในห้องปฏิบัติการและการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

2. วิธีดำเนินการวิจัย

การดำเนินการวิจัยประกอบด้วยการทดสอบความล้าของตัวอย่างเหล็กแผ่นภายใต้แรงดัดที่ได้รับ การเจาะรูชะลอการขยายตัวของรอยร้าวความล้ารูปแบบต่าง ๆ และการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ประกอบด้วยการดำเนินการ 2 ส่วน คือ 1) การสอบเทียบค่าพารามิเตอร์ในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลการทดสอบ และ 2) การศึกษาผลของขนาดและตำแหน่งรูเจาะแบบ Single SDH, Double SDH และ CFH ที่มีต่อการยืดอายุความล้า

2.1 การทดสอบความล้า

ตัวอย่างในการทดสอบความล้าทำจากเหล็กแผ่นชั้นคุณภาพ SS400 ตามมาตรฐานมอก. 1479-2558 [15] มีขนาดความกว้าง 300 มิลลิเมตร ความยาว 1,200 มิลลิเมตร และความหนา (t) 12 มิลลิเมตร จำนวนหกตัวอย่าง ตัวอย่างมีรอยบากทะลุความหนาเริ่มต้นยาว 130 มิลลิเมตร และกว้าง 2 มิลลิเมตร (รัศมีความโค้งปลายรอยบาก (r) 1 มิลลิเมตร) ที่กลางแผ่น (ก่อนทำรอยบากมีการเจาะรูนำร่องรอยบากรัศมี (r) 1 มิลลิเมตร เพื่อทำรอยบากได้สะดวก) ตัวอย่างติดตั้งแบบยึดแน่นที่จุดรองรับและติดตั้งมอเตอร์สั่นเขย่า (Vibration Motor) ที่ปลายอีกด้านหนึ่ง (ภาพที่ 1ก) ด้วยสลักเกลียวขนาด 20 มิลลิเมตร จำนวนสี่ตัว มอเตอร์สั่นเขย่าให้แรง

กระทำซ้ำซ้อนกับตัวอย่างด้วยความถี่ 25 Hz จากการเหวี่ยงของมวลภายใน โดยให้แรงกระทำในรูปแบบ Sine Wave มีขนาดของแรงกระทำสูงสุด 1,099 กิโลกรัม และสามารถปรับระดับค่าแรงกระทำได้ มอเตอร์สั่นเขย่าให้แรงดัดกระทำบนตัวอย่างด้วยอัตราส่วนความเค้น (stress ratio, R) -1 ระหว่างการทดสอบได้ตรวจวัดความเครียดด้วย Strain Gages จำนวนสามตัว ที่ตำแหน่งห่างจากปลายรอยบาก 10 มิลลิเมตร (SG1) 35 มิลลิเมตร (SG2) และ 60 มิลลิเมตร (SG3) โดยใช้ความถี่การเก็บข้อมูลความเครียด 500 Hz

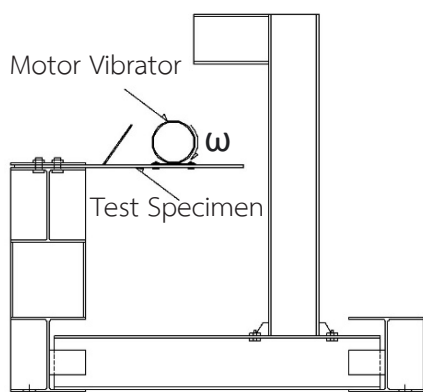
ตัวอย่างทดสอบได้รับการทดสอบความล้าแบบ High-cycle ภายใต้ช่วงความเค้นปกติสองระดับ คือ 90 MPa และ 120 MPa (ตารางที่ 1) มีการให้แรงกระทำซ้ำซ้อนในช่วงที่ 1 เพื่อทำให้เกิดรอยร้าวเริ่มต้นออกจากขอบแต่ละฝั่งของรอยบาก (a_1 และ a_2) ยาว 10 มิลลิเมตร (ภาพที่ 1ข) โดยมีค่าเฉลี่ยของจำนวนรอบแรงกระทำในช่วงแรก 330,000 รอบ และ 405,000 รอบในตัวอย่าง S120 และ S90 ตามลำดับ จากนั้นจึงทำการเจาะรูชะลอการขยายตัวของรอยร้าว โดยสามารถแบ่งตัวอย่างออกเป็น 3 รูปแบบ คือ 1) ไม่มีการเจาะรู 2) รูเจาะแบบ single SDH ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูเจาะ (D) 2 มม. ที่ปลายรอยร้าวความล้า ($H = 0.5D$ และ $V = 0$) (ภาพที่ 1ค) และ 3) รูเจาะแบบ double SDH ขนาด D เท่ากับ 2 มม. ที่ปลายรอยร้าวความล้า โดยมีระยะ $H = 0.5D$ และ $V = 0.25D$ เมื่อ H และ V คือ ระยะห่างจากปลายรอยร้าวถึงจุดศูนย์กลางรูเจาะในทิศตามแนวรอยร้าวและตั้งฉากกับแนวรอยร้าว ตามลำดับ การทดสอบเลือกตำแหน่งรูเจาะที่ $H = 0.5D$

ห่างจากปลายรอยร้าว เพื่อป้องกันผลกระทบของความคลาดเคลื่อนในการกำหนดตำแหน่งปลายรอยร้าวที่อาจมีต่อผลการทดสอบจากการใช้รูเจาะขนาดเล็ก ในช่วงที่ 2 ของการทดสอบตัวอย่างทดสอบ

ได้รับการทดสอบความล้าจนกระทั่งมีความยาวรอยร้าวรวม (a) ประมาณ 170 มิลลิเมตร หรือมีความยาวของรอยร้าวออกจากรูเจาะ 10 มิลลิเมตร

ตารางที่ 1 รายละเอียดตัวอย่างทดสอบ

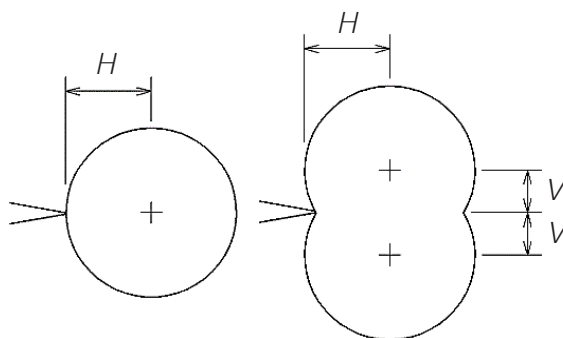
ตัวอย่าง	ช่วงความเค้นปกติ (MPa)	รูปแบบการเจาะรู	ความยาวรอยร้าวก่อนเจาะรู (a, มิลลิเมตร)	H, V
S90H0-1	90	ไม่มีการเจาะรู	-	-
S90H0-2	90	ไม่มีการเจาะรู	-	-
S90H1	90	Single SDH	153	0.5D, 0
S90H2	90	Double SDH	152	0.5D, 0.25D
S120H1	120	Single SDH	152	0.5D, 0
S120H2	120	Double SDH	149.5	0.5D, 0.25D



ก) การติดตั้งตัวอย่างทดสอบ



ข) การวัดระยะความยาวรอยร้าว

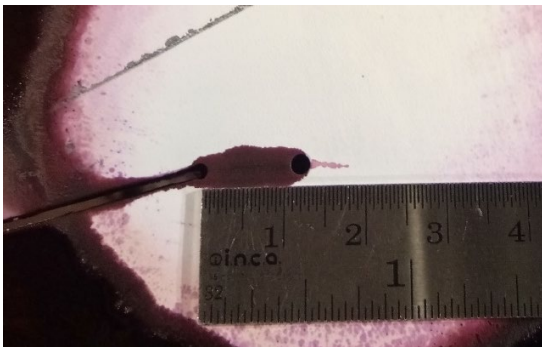


ค) ตำแหน่งรูเจาะของการทดสอบ

ภาพที่ 1 การทดสอบความล้าของตัวอย่างทดสอบ



การระบุตำแหน่งปลายรอยร้าว และวัดความยาวรอยร้าวระหว่างการทดสอบใช้วิธีสารแทรกซึม (penetrant testing) ร่วมกับกล้อง microscope ที่มีกำลังขยาย 50 เท่า และมีความละเอียดในการวัดความยาว 0.02 มิลลิเมตร (ภาพที่ 2) โดยมีการวัดความยาวรอยร้าวที่ถูกรอบแรงกระทำ 45,000 รอบ



ก) วิธีสารแทรกซึม (penetrant testing)



ข) กล้อง microscope

ภาพที่ 2 การระบุตำแหน่งและวัดความยาวรอยร้าว

2.2 การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
ได้ใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ศึกษาตัวประกอบ

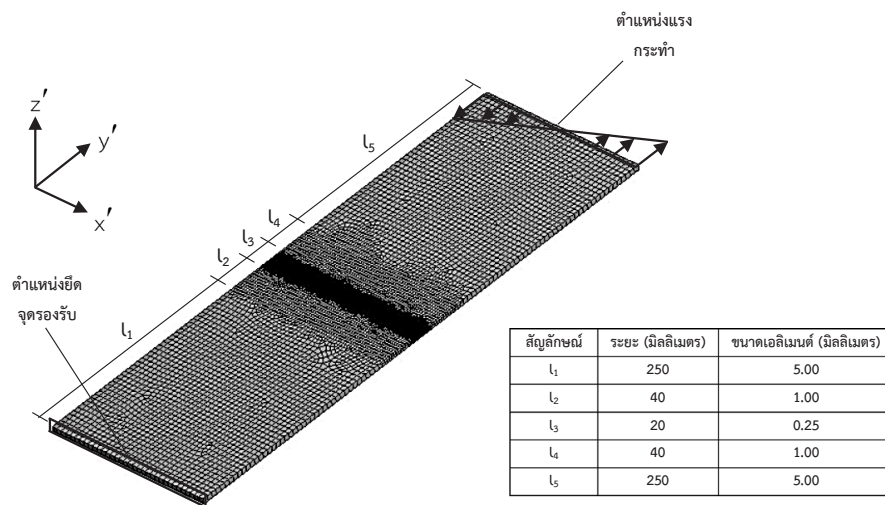
ความเข้มของความเค้น (stress intensity factor, K) ที่ปลายรอยร้าว และความเค้นหนาแน่น (stress concentration, K_t) รอบรูเจาะ ซึ่งเป็นพารามิเตอร์สำคัญในการประเมินการขยายตัวของรอยร้าวและการเกิดรอยร้าวออกจากรูเจาะ ตามลำดับ แบบจำลองตัวอย่างเหล็กแผ่นได้รับการพัฒนาในโปรแกรม ANSYS โดยสามารถแบ่งแบบจำลองออกเป็นสองกลุ่ม คือ 1) แบบจำลองสำหรับเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลการทดสอบ และ 2) แบบจำลองสำหรับศึกษาผลของตำแหน่งและขนาดรูเจาะที่มีต่อการยืดอายุความล้า แบบจำลองกลุ่มที่ 1 และกลุ่มที่ 2 มีรอยร้าวออกจากรอยบากยาว 10 มิลลิเมตร ตามการทดสอบความล้า ในช่วงที่ 1 โดยแบบจำลองกลุ่มที่ 1 มีรูปแบบรูเจาะตามการทดสอบในตารางที่ 1 แบบจำลองกลุ่มที่ 2 มีขนาด D และตำแหน่งรูเจาะแตกต่างกัน โดยแบ่งออกเป็นสามกลุ่มย่อย (ตารางที่ 2) เพื่อศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการเจาะรูรูปแบบต่าง ๆ ต่อการยืดอายุความล้า (กลุ่มที่ 2ก) และผลของตำแหน่งการเจาะรู (ระยะ V และ H) ที่มีต่อการขยายตัวของรอยร้าวเข้ารูเจาะ และการเกิดรอยร้าวออกจากรูเจาะแบบ CFH (กลุ่มที่ 2ข และ 2ค)

แบบจำลองทั้งสองกลุ่มใช้เอลิเมนต์ SOLID186 ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น 200 GPa และอัตราส่วนของปัวซอง 0.3 บริเวณใกล้รอยบากและรูเจาะ (ห่างจากรอยบากและรูเจาะไม่เกิน 10 มิลลิเมตร) ใช้เอลิเมนต์ละเอียดขนาด 0.25 มิลลิเมตร. (ภาพที่ 4ก) บริเวณห่างจากรอยบากที่อยู่ภายใต้ของแรงดัด ใช้เอลิเมนต์ขนาด 1 มิลลิเมตร พื้นที่จุดรองรับและพื้นที่ติดตั้งมอเตอร์ใช้เอลิเมนต์ขนาด 5 มิลลิเมตร

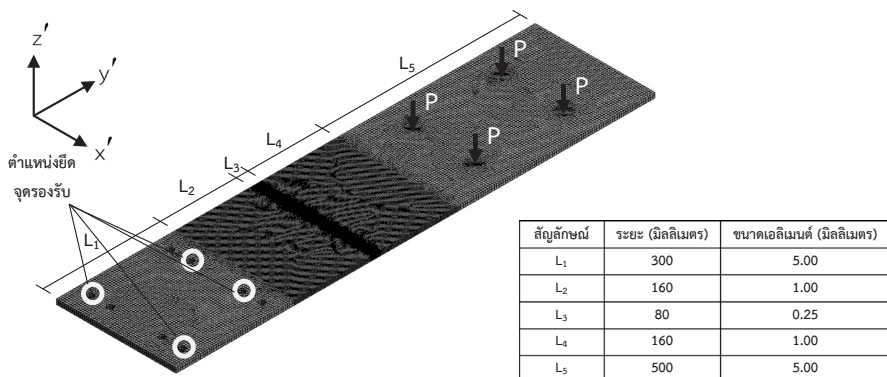
รอบรูเจาะ (ภาพที่ 4ค) มีการแบ่งเอลิเมนต์ในแนวรัศมีวงกลมออกเป็น 60 ส่วนเท่า ๆ กัน (6 องศาต่อเอลิเมนต์) [16,17] และที่ตำแหน่งปลายรอยร้าว (ภาพที่ 4ข) มีการแบ่งเอลิเมนต์ในแนวรัศมีวงกลมออกเป็น 30 ส่วนเท่า ๆ กัน (12 องศาต่อเอลิเมนต์) [16,17] ผิวรอยร้าวใช้ Contact แบบ Frictional [18] ในการป้องกันการซ้อนทับกันของผิวรอยร้าว ภายใต้แรงดัด ตำแหน่งจุดรองรับของแบบจำลองมีการจำกัดการเคลื่อนตัว และจำกัดการหมุนในแนวแกน x' แกน y' และแกน z' (Fixed Support) แรงกระทำจากมอเตอร์จำลองด้วยแรงกระทำแบบกระจาย (P) ขนาด 0.537 MPa และ 0.396 MPa สำหรับตัวอย่าง S120 และ S90 ตามลำดับ ในทิศ $\pm U_z$, บนพื้นที่สี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 22×22 มิลลิเมตร

จำนวนสี่จุด ตามตำแหน่งการยึดมอเตอร์เข้ากับตัวอย่างทดสอบ

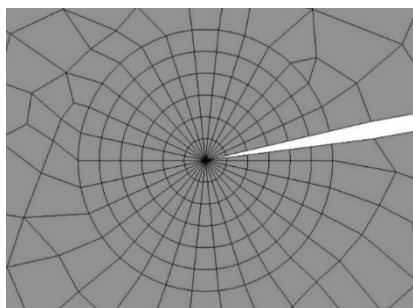
แบบจำลองที่ใช้ในการศึกษาได้นำมาเปรียบเทียบกับงานวิจัยในอดีต [19] ที่ศึกษาผลกระทบของการสัมผัสของผิวรอยร้าวที่มีต่อตัวประกอบความเข้มของความเค้น โดยใช้แผ่นเหล็กที่มีอัตราส่วนความยาวรอยร้าวกลางแผ่นต่อความกว้างแผ่น (a/w) 0.5 รับโมเมนต์ดัดในระนาบดังแสดงในภาพที่ 3 การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการศึกษานี้ให้ค่าอัตราส่วนตัวประกอบความเข้มของความเค้นกรณีที่ยึดกันและไม่ได้ป้องกันการซ้อนทับการของผิวรอยร้าว (K_{eff}/K) ที่ปลายรอยร้าวฝั่งแรงดึงเท่ากับ 1.15 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับ 1.14 ที่ได้จากผลการวิจัยในอดีต



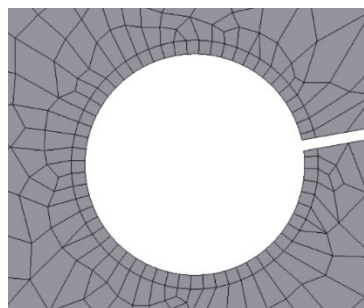
ภาพที่ 3 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของตัวอย่างทดสอบเปรียบเทียบกับงานวิจัยในอดีต



ก) การแบ่งเอลิเมนต์ของตัวอย่างทดสอบ



ข) การแบ่งเอลิเมนต์ที่ปลายรอยร้าว



ค) การแบ่งเอลิเมนต์รอบรูเจาะ

ภาพที่ 4 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของตัวอย่างทดสอบ

ตารางที่ 1 รายละเอียดตัวอย่างทดสอบ

No.	D (มม.)	ระยะ H	ระยะ V	หมายเหตุ
2ก	2, 4, 6, 8, 10	$0.5D$	0, $0.25D$, $1D$, $1.5D$	ผลของ D และรูปแบบการเจาะรู (Single SDH, Double SDH และ CFH) ที่มีต่อการขยายตัวของรอยร้าวออกจากรูเจาะ
2ข	4, 8	$0.5D$	$0.6D$, $0.7D$, $0.8D$, $0.9D$, $1.0D$, $1.25D$, $1.5D$	ผลของ D และระยะ V ในรูเจาะแบบ CFH ที่มีต่อการขยายตัวของรอยร้าวออกจากรูเจาะ
2ค	4	$-D$, $-0.75D$, $-0.5D$, $-0.25D$, 0 , $0.25D$, $0.5D$, $0.75D$, D	$0.8D$	ผลของระยะ H ที่มีต่อการขยายตัวของรอยร้าวเข้ารูเจาะ และการขยายตัวของรอยร้าวออกจากรูเจาะแบบ CFH

3. ผลการทดสอบความล้า

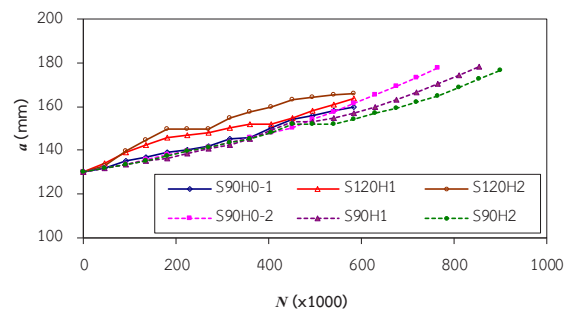
ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวรอยร้าวรวม (a) และจำนวนรอบของแรงกระทำ (N) หลังจากช่วงที่ทำให้เกิดรอยร้าวเริ่มต้นของตัวอย่างทดสอบ (ภาพที่ 5) ตัวอย่างในแต่ละกลุ่มของแรงกระทำ (S90 และ S120) มีอัตราการขยายตัวของรอยร้าวค่อนข้างคงที่ โดยตัวอย่าง S90 มีอัตราการขยายตัวของรอยร้าวในช่วงเริ่มต้นต่ำกว่า S120 เนื่องจากระดับของความเค้นปกติที่น้อยกว่า รอยร้าวในทุกตัวอย่างมีการขยายตัวในทิศทางมุมประมาณ 10 องศา จากแนวรอยบากเอียงไปยังฝั่งจุดรองรับ (ภาพที่ 6) ตัวอย่างที่ได้รับการเจาะรูมีการชะลอการขยายตัวของรอยร้าวทันทีที่มีการเจาะรูที่ a ประมาณ 150 มิลลิเมตร ตัวอย่าง S120 ที่มีการเจาะรูปแบบ Single SDH และ Double SDH สามารถรับ N ได้ประมาณ 45,000 รอบ และ 90,000 รอบ ตามลำดับ ก่อนที่รอยร้าวขยายตัวออกจากรูเจาะ โดยรูเจาะแบบ double SDH มีการขยายตัวของรอยร้าวออกจากรูเจาะฝั่งใกล้หน้าหน้ากระทำและมีทิศการขยายตัวของรอยร้าวเอียงไปยังจุดรองรับเช่นเดียวกับตัวอย่างที่ไม่มีการเจาะรู ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า การเจาะรูสามารถชะลอการขยายตัวของรอยร้าวภายใต้ภายใต้แรงดัด โดยรูเจาะแบบ Double SDH ชะลอการขยายตัวของรอยร้าวได้ดีกว่าแบบ Single SDH เมื่อใช้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูเจาะเท่ากัน ความสัมพันธ์ระหว่าง a และ N ที่ได้จากการทดสอบได้นำมาใช้คำนวณช่วงตัวประกอบความเข้มของความเค้น (ΔK) โดยใช้สมการของ Paris ที่รวมผลของการปิดของรอยร้าวภายใต้ความเค้นอัด [20]

$$da/dN = C(\Delta K_{eff})^m \quad (1)$$

$$\Delta K_{eff} = q_o \Delta K \quad (2)$$

เมื่อ da/dN คืออัตราการขยายตัวของรอยร้าว C และ m คือค่าคงที่ของวัสดุมีค่าเท่ากับ 1.916×10^{-11} เมตร/รอบ และ 3 ตามลำดับ [21] q_o คือ ผลของการปิดของรอยร้าว โดย da/dN คำนวณได้จากความชันของเส้นกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง a และ N ในภาพที่ 5 และ q_o คำนวณได้จากสมการที่ (3)

$$q_o = \begin{cases} 1 & \text{for } R \geq 0 \\ \frac{1-0.5 \cdot R}{1-R} & \text{for } R < 0 \end{cases} \quad (3)$$



ภาพที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่าง a และ N



ก) รอยร้าวออกจากรอยบาก



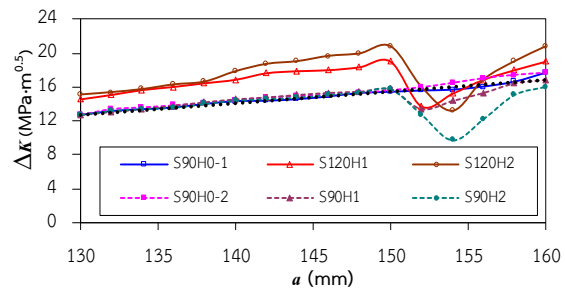
ข) ตัวอย่าง S120H1



ค) ตัวอย่าง S120H2

ภาพที่ 6 รอยร้าวออกจากรอยบาก และรูเจาะ

ความสัมพันธ์ระหว่าง ΔK และ a (ภาพที่ 7) ก่อนการเจาะรู ΔK มีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มความยาวรอยร้าว โดยมีค่าอยู่ในช่วง 12.73 - 15.09 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{0.5}$ ในตัวอย่าง S90 และ 15.41 - 20.74 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{0.5}$ ในตัวอย่าง S120 สำหรับ a ในช่วง 130 - 150 มม. เมื่อมีการเจาะรู ΔK ลดลงและค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจนมีค่าใกล้เคียงกับค่าเดิมก่อนการเจาะรู เมื่อรอยร้าวออกจากรูเจาะและมีค่า a ในช่วง 150 - 160 มิลลิเมตร โดยตัวอย่างที่รับขนาดของแรงกระทำเท่ากัน รูเจาะแบบ Double SDH ทำให้ ΔK ลดลงมากกว่ารูเจาะแบบ Single SDH จึงทำให้ชะลอการขยายตัวของรอยร้าวความล้าได้มากกว่า

ภาพที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่าง ΔK และ a

4. ผลการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

4.1 แบบจำลองตัวอย่างทดสอบ

ภาพที่ 8 แสดงตัวอย่างความเค้น Von Mises ที่บริเวณปลายรอยร้าว และรอบรูเจาะ ตัวอย่างที่ไม่มีการเจาะรูมีความเค้นสูงที่บริเวณปลายรอยร้าว เมื่อเจาะรูแบบ Single SDH และ Double SDH ทำให้ขนาดของความเค้นมีค่าลดลง ความเค้นมีค่าสูงที่ผิวตัวอย่าง และมีค่าลดลงบริเวณกึ่งกลางความหนา โดยรูเจาะแบบ Double SDH มีความเค้นรอบรูเจาะฝั่งใกล้หน้าหนักกระทำสูงกว่ารูเจาะฝั่งใกล้จุดรองรับ ซึ่งตำแหน่งที่มีความเค้นสูงนี้สอดคล้องกับตำแหน่งที่ตรวจพบรอยร้าวออกจากรูเจาะในตัวอย่างทดสอบ นอกจากนี้ เนื่องจากความเค้นมีค่าไม่คงที่ตลอดความหนา จึงทำให้ขอบการขยายตัวของรอยร้าวไม่เป็นเส้นตรงตามความหนาของแผ่นตัวอย่าง (ภาพที่ 9)

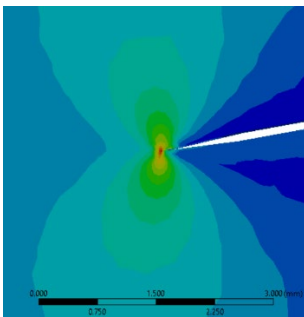
ผลการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ได้นำมาใช้ในการคำนวณ ΔK และมุมการขยายตัวของรอยร้าว (θ) โดยพิจารณาผลของแรงกระทำตั้งฉาก (mode 1) และแรงเฉือนบนระนาบรอยร้าว (mode 2) โดยคำนวณได้จาก [22]

$$\Delta K = \frac{\Delta K_I}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{\Delta K_I^2 + 4(\alpha_1 \Delta K_{II})^2} \quad (4)$$

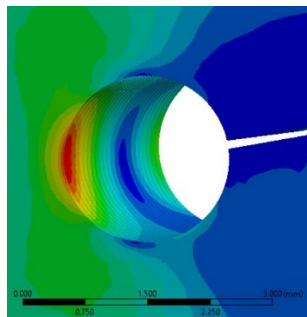
$$\theta = \pm \left[155.5 \frac{|K_{II}|}{|K_I| + |K_{II}|} \right] - 83.4 \left[\frac{|K_{II}|}{|K_I| + |K_{II}|} \right]^2 \quad (5)$$

เมื่อ K_I และ K_{II} คือ ตัวประกอบความเข้มของความเค้น mode 1 และ mode 2 ตามลำดับ และ θ คือ ทิศทางการขยายตัวของรอยร้าว (องศา) มีค่าเป็นลบเมื่อ $K_{II} > 0$ ภาพที่ 10 แสดงค่า ΔK ตามความหนาจากตำแหน่งกึ่งกลางความหนา ($z = 0$ มิลลิเมตร หรือ $z/t = 0$) ถึงผิวด้านนอก ($z = 6$ มิลลิเมตร หรือ $z/t = 0.5$) ของตัวอย่างทดสอบที่มีรอยร้าวออกจากรอยบากแต่ละด้านยาว 10 มม. ($a = 150$) มม. ΔK มีค่ามากที่สุดที่ผิวด้านนอกเท่ากับ

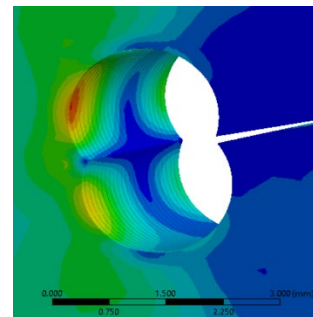
14.39 และ 19.49 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{0.5}$ ในตัวอย่าง S90H0 และ S120H0 ตามลำดับ โดยมีมุม θ เท่ากับ 4.03 องศา ผลการวิเคราะห์ให้มุม θ ที่น้อยกว่าการทดสอบทั้งนี้อาจเนื่องจากผลของแรงกระทำในแนวราบจากการเหวี่ยงของมอเตอร์ร่วมกับรูปแบบการติดตั้งตัวอย่างทดสอบที่จู่ตรงรับด้วยสลักเกลียวจำนวนจำกัด ทำให้การกระจายความเค้นบนหน้าตัดภายใต้แรงกระทำในแนวราบมีความไม่สม่ำเสมอ อย่างไรก็ตามก็ตี ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่า แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่พิจารณาผลของการเปิดและปิดของรอยร้าวภายใต้โมเมนต์ดัดให้ค่า ΔK ที่ใกล้เคียงกับการทดสอบ และสามารถใช้คำนวณทิศทางการขยายตัวของรอยร้าวได้



ก) ตัวอย่าง S90H0

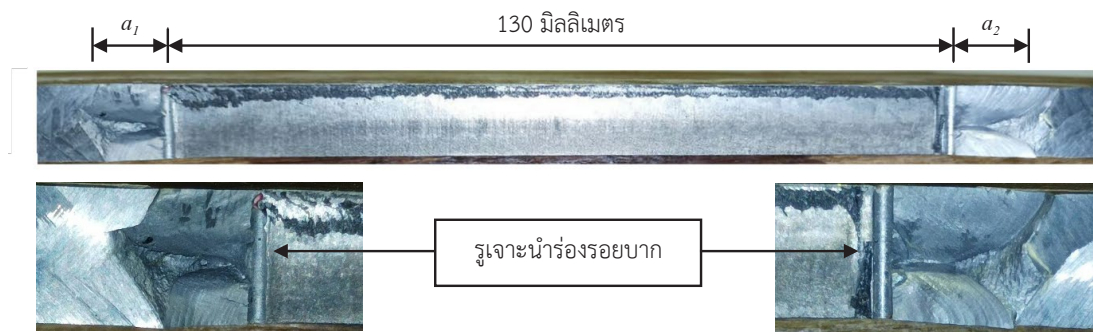


ข) ตัวอย่าง S90H1

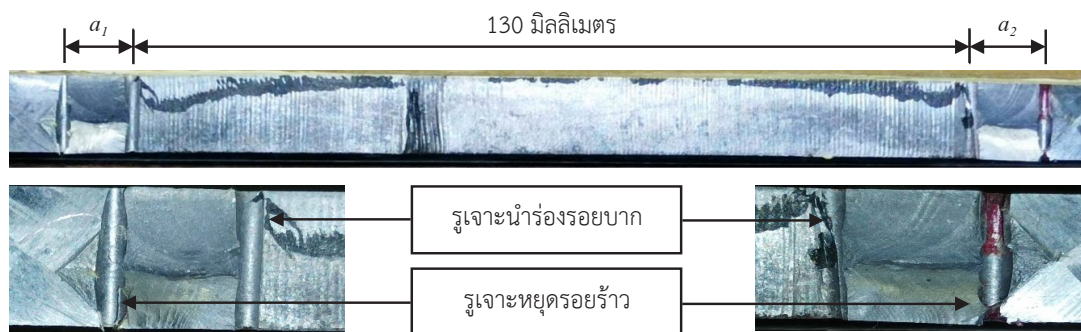


ค) ตัวอย่าง S90H2

ภาพที่ 8 ความเค้นรอบรูเจาะ Single hole และ Double holes

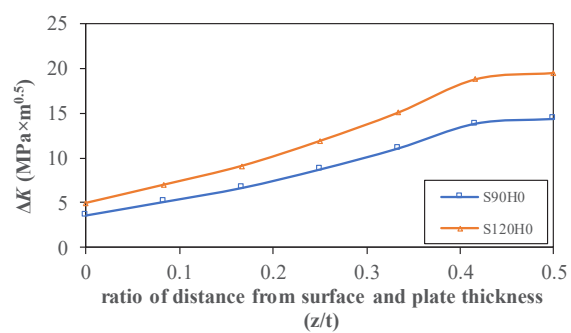


ก) ตัวอย่าง S90H0



ข) ตัวอย่าง S90H2

ภาพที่ 9 ผิวยรอยแตกร้าวของตัวอย่างทดสอบ



ภาพที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่าง ΔK

และอัตราส่วนระหว่างระยะจากกึ่งกลางความหนาต่อความหนาของเหล็กแผ่น (z/t)

4.2 แบบจำลองที่มีการเจาะรูรูปแบบต่าง ๆ

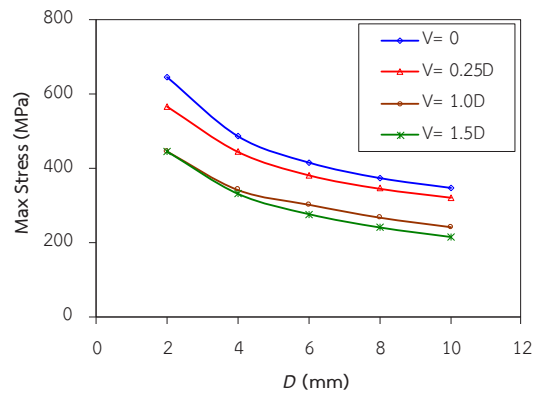
4.2.1 ผลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูเจาะ (D) และรูปแบบรูเจาะต่อการยืดอายุความล้า

ภาพที่ 12 แสดงอัตราส่วนระหว่างความเค้น Von Mises รอบรูเจาะและตำแหน่งที่ไม่มีอิทธิพลของรูเจาะ (far-field Von Mises stress) ที่ผิวด้านนอกของรูเจาะแบบ Single SDH, Double SDH และ CFH ที่มี V เท่ากับ 1.0D รูเจาะฝังใกล้แรงกระทำและจุดรองรับแทนด้วยสัญลักษณ์ DL และ DS ตามลำดับ อัตราส่วนความเค้นรอบรูเจาะลดลงตามขนาด D ที่เพิ่มขึ้นในทุกรูปแบบของรูเจาะ โดยตำแหน่งที่มีอัตราส่วนความเค้นสูงสุดรอบรูเจาะเป็นตำแหน่งที่จะเกิดการขยายตัวของรอยร้าวออกจากรูเจาะ รูเจาะแบบ Single SDH มีอัตราส่วนความเค้นสูงสุดที่ตำแหน่ง 12 องศาจากแนวแกน x รูเจาะแบบ Double SDH มีอัตราส่วนความเค้นสูงสุดรอบรูเจาะ DL ที่ตำแหน่ง 18 องศาจากแนวแกน x ในทุกขนาด D โดยความแตกต่างระหว่างอัตราส่วนความเค้นสูงสุดรอบรูเจาะ DL และ DS ลดลงเมื่อ D มีค่าเพิ่มมากขึ้น รูเจาะแบบ CFH มีอัตราส่วนความเค้นสูงสุดในฝั่งใกล้รอยร้าวรอบรูเจาะ DL และ DS ที่มุม 204 - 216 องศา และ 150 - 156 องศาตามลำดับ ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ได้รับอิทธิพลจากปลายรอยร้าว และรอยร้าวมีโอกาสที่ขยายตัวเข้ารูเจาะในตำแหน่งดังกล่าว นอกจากนี้ รอยร้าวมีแนวโน้มที่จะขยายตัวออกจากรูเจาะ CFH ที่มี V เท่ากับ 1.0D ที่รูเจาะ DL ในตำแหน่ง 18 องศาเช่นเดียวกับรูเจาะแบบ Double SDH

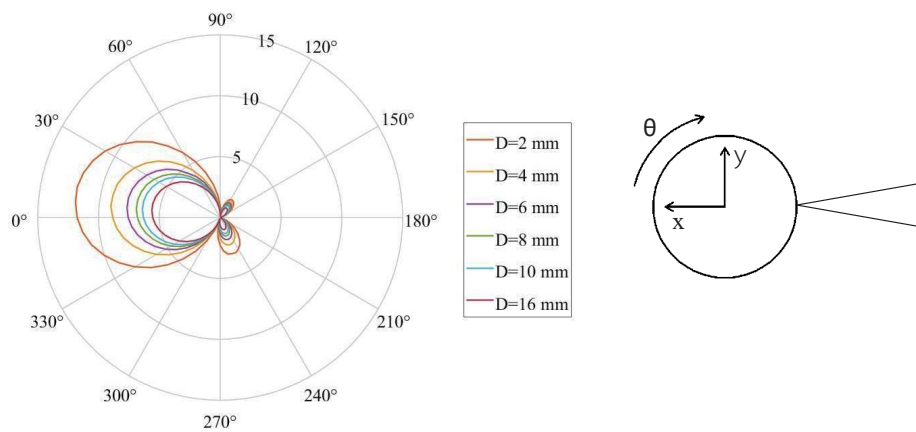
ผลกระทบของขนาด D และรูปแบบการเจาะรูที่มีต่ออัตราส่วนความเค้นแสดงในภาพที่ 11 อัตราส่วนความเค้นมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อมีการเพิ่มขนาด D จาก 2 มิลลิเมตร เป็น 4 มิลลิเมตร และมีอัตราการลดของอัตราส่วนความเค้นที่ลดลงในรูเจาะที่มีขนาดเพิ่มขึ้น สำหรับรูเจาะขนาดเดียวกัน CFH ($V = 1.0D$ และ $1.5D$) มีอัตราส่วนความเค้นสูงสุดรอบรูเจ้าน้อยกว่า Double SDH และ Single SDH ตามลำดับ ซึ่งผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่ารูเจาะแบบ CFH และ Single SDH มีประสิทธิภาพในการยืดอายุความล้าออกจากรูเจาะมากที่สุดและน้อยสุด ตามลำดับ Dexter and Ocel [1] ได้ให้สมการในการคำนวณขนาด D ที่เหมาะสมในการเจาะรูแบบ Single SDH เพื่อหยุดการขยายตัวของรอยร้าวความล้า ดังนี้

$$\frac{\Delta K}{\sqrt{D/2}} \leq 10.5\sqrt{\sigma_y} \quad (6)$$

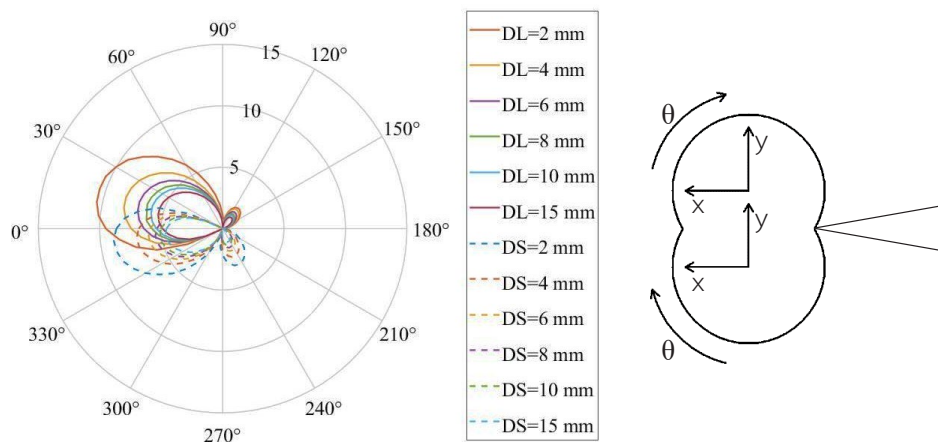
เมื่อ σ_y คือ ความเค้นครากของแผ่นเหล็ก (MPa) สำหรับตัวอย่างทดสอบ S90 ที่มี ΔK เท่ากับ $14.39 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{0.5}$ จะได้ขนาด D ของรูเจาะแบบ Single SDH เท่ากับ 16 มิลลิเมตร ซึ่งรูเจาะแบบ Double SDH และ CFH ที่มีขนาด D เท่ากับ 13 และ 6 มิลลิเมตร ตามลำดับ จะให้ขนาดความเค้นสูงสุดรอบรูเจาะที่เท่ากัน ดังนั้น การเจาะรูแบบ Double SDH และ CFH จะสามารถช่วยลดขนาดรูเจาะได้



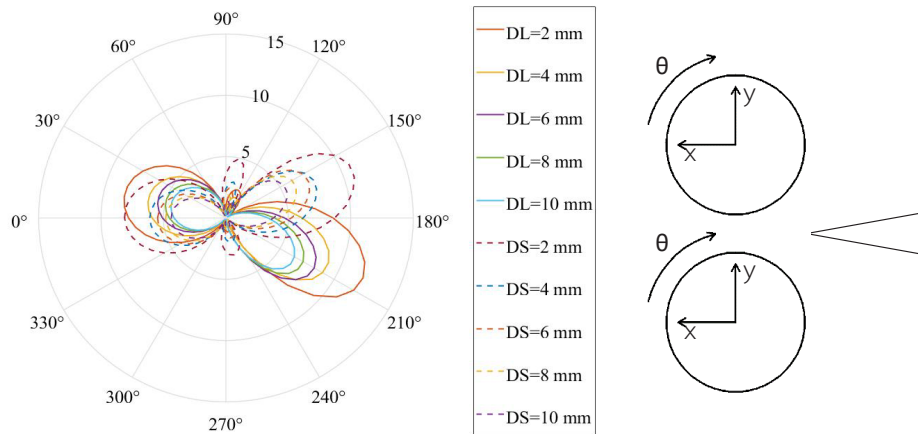
ภาพที่ 11 ผลของ D และรูปแบบการเจาะรูที่มีต่อความเค้นสูงสุดรอบรูเจาะ



ก) รูเจาะแบบ Single hole



ข) รูเจาะแบบ Double holes



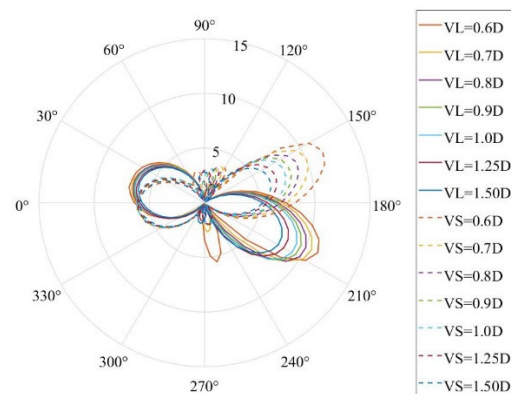
ค) รูเจาะแบบ Flank holes ที่มี $V = 1.0D$

ภาพที่ 12 ความเค้นรอบรูเจาะ

4.2.2 ผลของระยะ V และ H ต่อการขยายตัวของรอยร้าวเข้า และออกจากรูเจาะแบบ CFH

อัตราส่วนความเค้น Von Mises รอบรูเจาะและตำแหน่งที่ไม่มีอิทธิพลของรูเจาะที่ผิวด้านนอกในรูเจาะแบบ CFH ที่มีระยะ V ในช่วง 0.6D ถึง 1.5D แสดงในภาพที่ 13 โดยระยะ V ของรูเจาะ DL และ DS แสดงด้วยสัญลักษณ์ VL และ VS ในภาพ ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าระยะ V ของรูเจาะแบบ CFH มีผลต่อการชะลอการขยายตัวของรอยร้าวออกจากรูเจาะค่อนข้างน้อย แต่มีผลกระทบมากต่อความเค้นสูงสุดฝั่งใกล้กับปลายรอยร้าวในกรณีที่รูเจาะมีระยะ V มากอาจทำให้รอยร้าวไม่ขยายตัวเข้ารูเจาะ แต่การเจาะรูจะเป็นเพียงการชะลอการขยายตัวของรอยร้าว เมื่อรอยร้าวขยายตัวเข้าไปในพื้นที่ที่ได้รับอิทธิพลจากการเจาะรู ดังนั้น การเจาะรูแบบ CFH จึงควรเลือก

ระยะ V ที่ใกล้กับปลายรอยร้าว เพื่อลดขนาดความยาวของรอยร้าวเข้ารูเจาะและทำให้รอยร้าวขยายตัวเข้ารูเจาะได้

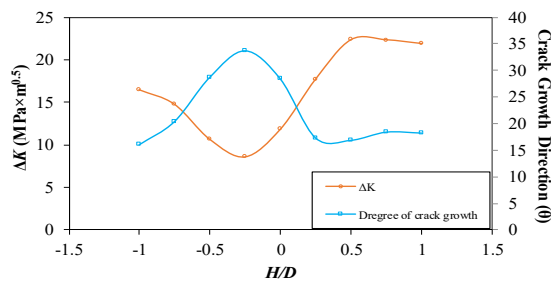


ภาพที่ 13 อัตราส่วนความเค้นรอบรูเจาะแบบ CFH ที่มีขนาด D 4 มิลลิเมตร และ H เท่ากับ 0.8D

อิทธิพลของระยะ H ในการเจาะรูแบบ CFH ที่มีต่ออัตราการขยายตัวของรอยร้าว และทิศทาง



การขยายตัวของรอยร้าว (ภาพที่ 14) ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่า ตำแหน่งการเจาะรูที่มี $H/D = -0.25$ จะให้ค่า ΔK มีค่าลดลงต่ำสุด และมีการเบี่ยงเบนทิศทางของรอยร้าวสูงสุด ซึ่งการเจาะรูที่ตำแหน่งนี้ หรือเมื่อรอยร้าวมีการขยายตัวถึงตำแหน่งนี้ จะมีการชะลอการขยายตัวของรอยร้าวต่ำสุด หลังจากนั้นเมื่อปลายรอยร้าวขยายตัวผ่านบริเวณที่ได้รับอิทธิพลของรูเจาะ จะมีค่า ΔK เพิ่มขึ้นอีกครั้ง



ภาพที่ 14 ผลของระยะ H/D ที่มีต่อ ΔK ในรูเจาะแบบ CFH (ที่ระยะ $V=0.8D$)

5. บทสรุป

ผลการศึกษาประสิทธิภาพของการเจาะรูแบบ single SDH, double SDH และ CFH ในการชะลอการขยายตัวของรอยร้าวความล้าทะลุความหนาภายใต้แรงดัดนอกระนาบสามารถสรุปผลการศึกษาดังนี้

1.) แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่พิจารณาปฏิสัมพันธ์ของผิวรอยร้าวสามารถทำนายอัตราการขยายตัวและทิศทางการขยายตัวของรอยร้าวความล้าได้อย่างเหมาะสม

2.) รูเจาะแบบ Single SDH, Double SDH และ CFH สามารถชะลอการขยายตัวของรอยร้าว

ความล้าภายใต้แรงดัดได้โดยประสิทธิภาพการชะลอการขยายตัวของรอยร้าวความล้าเพิ่มขึ้นตามขนาด D เมื่อใช้ขนาด D เท่ากัน รูเจาะแบบ CFH ให้ค่าความเค้นรอบรูเจาะต่ำสุดตามด้วยรูเจาะแบบ Double SDH และ Single SDH

3.) ในการชะลอการขยายตัวของรอยร้าวความล้าของ CFH ขึ้นอยู่กับขนาด D และตำแหน่งการเจาะรู โดยตำแหน่งรูเจาะที่มี H/D เท่ากับ -0.25 มีประสิทธิภาพในการชะลอการขยายตัวของรอยร้าวสูงสุด

6. เอกสารอ้างอิง

[1] R J Dexter and J M Ocel (2013). Manual for repair and retrofit of fatigue cracks in steel bridges. Federal Highway Administration, FHWA-IF-13-020.

[2] L Fang, Z Fu, B Ji, and Q Wang (2023). Interference of cracking and drilling on opposite side of steel deck components. Journal of Constructional Steel Research, 208: 107996.

[3] FHWA (2013). Manual for Repair and Retrofit of Fatigue Cracks in Steel Bridges.

[4] FHWA (2012). Manual for Design, Construction and Maintenance of orthotropic steel deck bridges.

[5] H Wu, A Imad, N Benseddiq, J T P D Castro, and M A Meggiolaro (2010). On the prediction of the residual fatigue life of

cracked structures repaired by the stop-hole method. *International Journal of Fatigue*, 32: 670-677.

[6] C S Shin, C M Wang, and P S Song (1996). Fatigue damage repair: a comparison of some possible methods. *International Journal of Fatigue*, 18: 535-546.

[7] M S Ferdous, C Makabe, M S Rana, and T Miyazaki (2011). Improving the fatigue strength of a multiple hole specimen by applying additional holes or notches, *Engineering Failure Analysis*, 18: 75-87.

[8] S M J Razavi, M R Ayatollahi, and F Berto (2018). Assessment of fatigue crack growth behavior of cracked specimens repaired by indentation. *Procedia Structural Integrity*, 13: 69-73.

[9] Y Hu, M Song, J Liu, and M Lei (2020). Effects of stop hole on crack turning, residual fatigue life and crack tip stress field. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 42: 216.

[10] P S Song, Y L Shieh (2004). Stop drilling procedure for fatigue life improvement. *International Journal of Fatigue*, 26: 1333-1339.

[11] M R Ayatollahi, S M J Razavi, and M Y Yahya (2015). Mixed mode fatigue crack initiation and growth in a CT specimen repaired by stop hole technique. *Engineering*

Fracture Mechanics, 145: 115-127.

[12] S M J Razavi, M R Ayatollahi, C Sommitsch, and C Moser (2017). Retardation of fatigue crack growth in high strength steel S690 using modified stop-hole technique, *Engineering Fracture Mechanics*, 169: 226-237.

[13] M R Ayatollahi, S M J Razavi, and H R Chamani (2014). A numerical study on the effect of symmetric crack flank holes on fatigue life extension of a SENT specimen. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, 37: 1153-1164.

[14] M Li, Y Suzuki, K Hashimoto, K Sugiura (2018). Experimental study on fatigue resistance of rib-to-deck joint in orthotropic steel bridge deck. *Journal of Bridge Engineering*, 23(2): 04017128.

[15] มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก. 1479-2558) (2558).เหล็กกล้าทรงแบนรีดร้อนสำหรับงานโครงสร้างทั่วไป, สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, กระทรวงอุตสาหกรรม.

[16] IIW (2012). Recommendations for fatigue design of welded joints and components.

[17] M Li, K Hashimoto, and K Sugiura (2014). Influence of Asphalt Surfacing on Fatigue Evaluation of Rib-to-Deck Joints in Orthotropic Steel Bridge Decks. *Journal of Bridge Engineering*, 04014038.

[18] G M Sayeed Ahmed, A Algahtani, E R I Mahmoud, and I A Badruddin (2018).



Experimental evaluation of interfacial surface cracks in friction welded dissimilar metals through image segmentation technique (IST).

International Journal of Materials, 11: 2460.

[19] P Albrecht, and A Lenwari (2006). Stress intensity factor for center-cracked plate with crack surface interference. Engineering Fracture Mechanics, 73: 1035-1045.

[20] Y Lei (2008). Finite element crack closure analysis of a compact tension

specimen. International Journal of Fatigue, 30: 21–31.

[21] NASGRO (2010). Fracture mechanics and fatigue crack growth analysis software (version 6.0), reference manual, NASA Johnson Space Center and Southwest Research Institute.

[22] H A Richard, B Schramm, and N H Schirmeisen (2014). Cracks on Mixed Mode loading-Theories, experiments, simulations. International Journal of Fatigue, 62: 93-103.

การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดในการจัดหาและการจัดการสินค้าคงคลัง ของผู้ผลิตทุเรียนแช่เยือกแข็ง

Procurement and Inventory Optimization of a Frozen Durian Manufacturer

ธนพงษ์ ร่วมสุข¹ พรธิภา องค์คุณารักษ์^{2*} และ ทวีพันธ์ เลียงพิบูลย์³

ภาควิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเกษตร คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์¹

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์²

ภาควิชาการตลาดและการจัดการโซ่อุปทานอาหารและบรรจุภัณฑ์ วิทยาลัยธุรกิจสัตว์

มหาวิทยาลัยเวสเทิร์นมิชิแกน³

E-mail: thanapong.ru@ku.th, pornthipa.o@ku.ac.th, Duke.leingpibul@wmich.edu

* ผู้ประพันธ์บรรณกิจ (corresponding author)



บทคัดย่อ

งานวิจัยฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอตัวแบบเชิงคณิตศาสตร์ในการจัดการสินค้าคงคลังวัตถุดิบที่เป็นทุเรียนแช่เยือกแข็งทั้งลูกภายใต้เป้าหมายที่ต้องการลดต้นทุนโลจิสติกส์ให้ต่ำที่สุด และเพื่อกำหนดนโยบายการดำเนินงานด้านการจัดซื้อและการจัดเก็บสินค้าของบริษัทกรณีศึกษา โดยการวิจัยเริ่มจากการศึกษากระบวนการโลจิสติกส์และโซ่อุปทาน ได้แก่ การจัดซื้อและจัดเก็บวัตถุดิบ การผลิต และการขนส่ง จากนั้นออกแบบโปรแกรมจำนวนเต็มเพื่อนำมาใช้หาคำตอบของปัญหาภายใต้สมการวัตถุประสงค์ที่ต้นทุนต่ำที่สุด และหาผลลัพธ์ของแบบจำลองบนโปรแกรม CPLEX Studio และทดสอบผลลัพธ์โดยใช้ข้อมูลย้อนหลังและวิเคราะห์ความไวของพารามิเตอร์ พบว่า แบบจำลองสามารถช่วยตัดสินใจในการกำหนดช่วงเวลาที่เหมาะสมในการรับซื้อวัตถุดิบและวิธีการจัดเก็บวัตถุดิบภายใต้ตัวเลือกการจัดเก็บที่ห้องเย็นของโรงงานและห้องเย็นภายนอก 2 แห่ง ทั้งนี้พบว่าต้นทุนค่าวัตถุดิบเป็นต้นทุนหลักคิดเป็น 97.16% ของต้นทุนรวม แบบจำลองกำหนดวิธีการจัดซื้อ 2 ช่วงราคา คือ หากราคาต่ำกว่า 81.50 บาทต่อกิโลกรัม จะจัดซื้อเพื่อจัดเก็บ และราคาช่วง 82-85 บาทต่อกิโลกรัม จะจัดซื้อเพื่อผลิต และให้ความสำคัญกับการจัดเก็บวัตถุดิบที่ห้องเย็นของโรงงานมากที่สุด รองลงมาคือห้องเย็นภายนอกที่ 1 และ 2 ตามลำดับ



คำสำคัญ:

โปรแกรมจำนวนเต็ม; การจัดการสินค้าคงคลัง; การจัดหา; ทุเรียนแช่เยือกแข็ง



Abstract

The aim of this research is to propose a mathematical model for effectively managing the inventory of whole frozen durian as raw materials, with the objective of minimizing logistics costs and formulating the procurement and storage policies of the company.



The research commences by investigating logistics processes and supply chain, with a specific focus on the areas of procurement and storage of raw materials, production, and transportation. To accomplish this, an integer programming is developed to solve the problem by optimizing the objective function of minimizing costs. The obtained results are analyzed using CPLEX Studio, and the model's performance is evaluated using historical data while assessing the sensitivity of various parameters. The findings reveal that the raw material expenses constitute a significant portion, accounting for 97.16% of the total costs. Consequently, the model establishes two distinct price ranges: raw materials will be procured for storage if the price falls below 81.50 baht per kilogram, whereas the range of 82-85 baht per kilogram will be considered for production purposes. Subsequently, the raw materials will be stored in external cold storage facilities, with priority given to the first and second facilities, respectively.

Keywords: Integer programming; Inventory Management; Procurement; Frozen durian

1. บทนำ

สำหรับการจัดการโซ่อุปทานสินค้าเกษตร (Agri-food supply chains: ASC) ในช่วงหลายทศวรรษที่ผ่านมาแตกต่างจากโซ่อุปทานสินค้าอื่นเนื่องจากเป็นสินค้าที่มีข้อจำกัด ได้แก่ สินค้าเกษตรเน่าเสียง่าย การจัดการต้องมีการควบคุมสภาวะแวดล้อมหลังการเก็บเกี่ยว การผลิตมีความเป็นฤดูกาล ปริมาณผลผลิตในแต่ละปีไม่มีเสถียรภาพ และคุณภาพมีการเปลี่ยนแปลง [1-3] โดยผู้ผลิตสินค้าเกษตรแปรรูปจึงต้องพยายามบริหารจัดการโซ่อุปทานเพื่อให้มีสินค้าเพียงพอกับการจำหน่ายในแต่ละฤดูกาล การเลือกใช้คลังสินค้าควบคุมอุณหภูมิหรือห้องเย็น (Cold storage) ถือเป็นวิธีสำคัญต่อการคงคุณภาพสินค้า ชะลอการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์และปฏิกิริยาเคมีในอาหารที่ส่งผลให้เกิดการเน่าเสียช้าลง

รวมทั้งช่วยในการบริหารสินค้าคงคลังให้เพียงพอตลอดทั้งปี ดังนั้นการตัดสินใจเพื่อจัดหาและจัดเก็บวัตถุดิบ (Raw material procurement and inventory problem) ที่เกี่ยวข้องกับการกำหนดหน้าที่ความรับผิดชอบในการจัดเก็บ การผลิต การจัดส่ง และการเลือกที่ตั้งในการสนับสนุนการดำเนินงาน ภายใต้ข้อจำกัดต่างๆ เช่น ช่วงเวลาและปริมาณความต้องการของลูกค้า ขนาดพื้นที่จัดเก็บ และความสามารถในการผลิต [4-7] รูปแบบการศึกษานี้สามารถนำไปใช้กับการตัดสินใจเชิงกลยุทธ์เพื่อเลือกดำเนินงานเอง (In-house) หรือจัดจ้างบุคคลภายนอก (Outsource) ซึ่งเป็นปัญหาที่ผู้ประกอบการไม่มั่นใจในการตัดสินใจ เนื่องจากส่งผลต่อต้นทุนการดำเนินงานและระดับการให้บริการลูกค้า บริษัท

กรณีศึกษาเป็นผู้ประกอบการผลิตและจัดจำหน่ายผลไม้แปรรูปแห้งแบบเยือกแข็งที่มีวัตถุดิบหลักเป็นทุเรียนผลสดภายในจังหวัดจันทบุรีและภาคใต้โดยเมื่อจัดซื้อแล้วจะมีการตัดแต่งและเก็บในรูปแบบของการแช่เยือกแข็งภายในห้องเย็นตัวเอง และเมื่อมีคำสั่งซื้อจึงมีการนำออกไปผลิต ด้วยวิธีในปัจจุบันที่ใช้การประมาณการล่วงหน้าและจัดซื้อวัตถุดิบเพื่อไว้สำหรับการผลิตในฤดูกาลถัดไป และความไม่แน่นอนของปริมาณวัตถุดิบ ราคา และคุณภาพ ผู้วิจัยจึงนำเสนอตัวแบบเชิงคณิตศาสตร์ในการจัดหา การขนส่ง และการจัดเก็บวัตถุดิบทุเรียนแช่เยือกแข็งภายในห้องเย็นของบริษัทและห้องเย็นภายนอก เพื่อลดต้นทุนการจัดการโลจิสติกส์ให้ต่ำที่สุด

2. การทบทวนวรรณกรรม

2.1 โครงสร้างต้นทุนกับกิจกรรมโลจิสติกส์

โครงสร้างต้นทุนถือเป็นสิ่งที่ผู้ประกอบการระดับ SMEs ต้องคำนึงเพื่อพัฒนาความสามารถทางการแข่งขัน ซึ่งสัมพันธ์โดยตรงกับต้นทุนโลจิสติกส์ที่ประกอบไปด้วยต้นทุนประเภทต่างๆ ได้แก่ ต้นทุนในการขายสินค้า (Cost of goods sold) คือต้นทุนในการจำหน่ายสินค้า ต้นทุนดูแลรักษาสินค้าคงคลัง (Holding cost) คือต้นทุนในการบริหารสินค้าคงคลังให้เพียงพอกับการจัดจำหน่ายไม่มากหรือน้อยไปจนกลายเป็นค่าเสียโอกาสในการขายหรือค่าความเสียหายที่เกิดจากสินค้าที่หมดอายุ ต้นทุนการจัดการคลังสินค้า (Warehousing costs) คือต้นทุนในการบริหารคลังสินค้า กิจกรรมในคลังสินค้า การเลือกสถานที่ตั้งของคลังสินค้า โดยปริมาณการจัดเก็บที่

เหมาะสมจะช่วยประหยัดค่าใช้จ่ายในการขนย้ายสินค้า ต้นทุนการสั่งซื้อ (Ordering costs) คือต้นทุนในการสั่งซื้อ การวางแผน และจัดการข้อมูลในการรับคำสั่งจากลูกค้า ต้นทุนสินค้าที่จัดซื้อ (Purchasing costs) คือค่าสินค้าที่จ่ายไปในการสั่งซื้อสินค้า ต้นทุนขนส่งสินค้า (Transportation costs) คือต้นทุนที่เกี่ยวข้องกับการขนส่งขึ้นอยู่กับรูปแบบการขนส่ง เส้นทาง และการวางแผนขนส่ง [8, 9]

หลักการที่นำมาใช้บริหารจัดการต้นทุนโลจิสติกส์ เริ่มจาก 1) การจัดการต้นทุนโลจิสติกส์มหภาคที่ต้องคำนึงถึงต้นทุนหลัก ได้แก่ ต้นทุนบริหารสินค้าคงคลัง ต้นทุนขนส่ง และค่าเสียโอกาส ซึ่งต้องคำนึงถึงผู้เกี่ยวข้อง เช่น ซัพพลายเออร์ ผู้กระจายสินค้า และลูกค้า เพื่อให้สามารถลดต้นทุนโลจิสติกส์ได้ทั้งหมดโดยสรุป 2) พิจารณาทางเลือกการขนส่งหลายรูปแบบที่สมดุลภายใต้เงื่อนไขต้นทุนการขนส่ง ระยะเวลาการขนส่ง ความต้องการของลูกค้า และระดับของคุณภาพการให้บริการ 3) การบริหารจัดการระดับสินค้าคงคลัง โดยเฉพาะจำนวนวันที่ใช้ในการจัดเก็บสินค้าและการผลิตที่ควรมีมาตรใกล้เคียงหรือดีกว่าอุตสาหกรรมเดียวกัน 4) การบริหารความเสี่ยงจากความไม่แน่นอนด้านการขนส่งทั้งในและต่างประเทศ การบูรณาการผู้ให้บริการขนส่งในลักษณะ Integrated door to door services และติดตามงานและแก้ปัญหาจะช่วยลดปัญหาได้ 5) การจ้างผู้เชี่ยวชาญโลจิสติกส์ (3PLs) เพื่อมาบริหารงานด้านโลจิสติกส์ให้มีประสิทธิภาพเพิ่มมากยิ่งขึ้น พร้อมกับช่วยควบคุมและประเมินต้นทุนโลจิสติกส์อย่างเป็นระบบ [10]

2.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อการหาทางเลือกที่ดีที่สุด

การวิจัยการดำเนินงานเป็นการประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีวิจัยเชิงปริมาณ เพื่อให้ได้การตัดสินใจที่ดีขึ้น เพื่อแก้ปัญหาที่ซับซ้อน และเพื่อจัดการระบบคน เครื่องจักร วัตถุดิบ และการเงิน ซึ่งมีหลักเกณฑ์การตัดสินใจภายใต้เงื่อนไขที่มีทรัพยากรจำกัด การสร้างตัวแบบทางคณิตศาสตร์จากปัญหาที่เกิดขึ้นจริง โดยตั้งสมมติฐานว่าทุกตัวแปรที่สัมพันธ์กันเป็นเชิงปริมาณนั้นมีความสัมพันธ์ของตัวแปรอยู่ในรูปฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ ดังนั้น การค้นหาผลลัพธ์ที่ดีที่สุด (Optimization) เป็นกระบวนการค้นหาค่าที่ดีที่สุดของตัวแปรด้วยหลักเกณฑ์หนึ่งๆ โดยการวัดผลลัพธ์อย่างใดอย่างหนึ่ง องค์ประกอบของปัญหาที่ต้องการผลลัพธ์ที่ดีที่สุด

การแก้ปัญหาคัดเลือกตัดสินใจเพื่อจัดหา ขนส่ง และจัดเก็บวัตถุดิบโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ถูกนำมาใช้ในงานวิจัยต่าง ๆ เช่น การจัดซื้อและผลิตเหล็กแท่งแบนและเหล็กคอกอยล์เพื่อให้คุณค่าสูงสุด [6] การจัดสรรพื้นที่จัดเก็บภายในท่าเรือด้วยเป้าหมายต้นทุนการดำเนินงานต่ำที่สุด [7] การกระจายสินค้าในคลังสินค้าเพื่อตอบสนองความต้องการของลูกค้าด้วยเป้าหมายต้นทุนและเวลาที่ต่ำสุด [11] การผลิตและขนส่งในอุตสาหกรรมป่าไม้เพื่อเป้าหมายต้นทุนการดำเนินงานต่ำสุด [12] การจัดสรรแรงงาน วัสดุ และอุปกรณ์สำหรับการซ่อมบำรุงเครื่องบินด้วยเป้าหมายต้นทุนดำเนินงาน [13] การจัดสรรเส้นทางการขนส่งระหว่างเกษตรกร ลานรับซื้อข้าวเปลือก และโรงสีข้าวเพื่อต้นทุนการขนส่งต่ำที่สุด [14] และการจัดสรรวัตถุดิบส่วนเกินเพื่อการผลิตเพิ่มภายใต้เงื่อนไขต้นทุนรวมต่ำสุด [15]

3. ระเบียบวิธีวิจัย

การเลือกวิธีการตัดสินใจที่เหมาะสมของปัญหานี้ใช้แนวคิดโปรแกรมจำนวนเต็มในการตัดสินใจจัดหาปริมาณสินค้าที่จัดซื้อ ปริมาณที่ขนส่งและจัดเก็บภายในห้องเย็นของตนเอง และปริมาณที่จัดเก็บในห้องเย็นภายนอก เพื่อให้บรรลุเป้าหมายด้านต้นทุนโลจิสติกส์และช่วงเวลาที่ต้องการสินค้าเพื่อการผลิตและจัดจำหน่าย โดยกระบวนการวิจัยเริ่มจากการรวบรวมข้อมูลการวางแผนและการดำเนินงานใน 2 ส่วน คือ ความต้องการสินค้าของลูกค้าในรอบ 1 ปีที่ผ่านมา พร้อมกับแนวโน้มความต้องการสินค้าในอนาคตของตลาด และผลผลิตที่ออกสู่ตลาดได้แก่ ปริมาณ ราคาวัตถุดิบในอดีต และอนาคต ซึ่งมีอิทธิพลจากความต้องการการส่งออก การจัดการวัตถุดิบจากสวนตนเองและฟาร์มภายใต้สัญญา (Contract farm) และช่วงเวลาในการจัดซื้อวัตถุดิบนอกพื้นที่เพื่อให้เพียงพอต่อการผลิตตลอดทั้งปี โดยมีห้องเย็นที่ผู้ประกอบการสนใจจัดเก็บ 2 แห่งที่มีข้อจำกัดแตกต่างกัน ขั้นตอนถัดมาคือการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ประกอบด้วย 1) ตัวแปรตัดสินใจ (Decision Variables) ที่เป็นปริมาณการจัดซื้อ ปริมาณสินค้าคงคลังที่จัดเก็บในห้องเย็น และปริมาณสินค้าที่ขนส่ง 2) ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective Function) กำหนดเป็นต้นทุนโลจิสติกส์ต่ำที่สุดที่ประกอบด้วยกิจกรรมการจัดซื้อวัตถุดิบ การเก็บภายในห้องเย็นที่โรงงานตนเองและห้องเย็นภายนอก และต้นทุนขนส่งสินค้าด้วยยานพาหนะควบคุมอุณหภูมิ 3) เงื่อนไขบังคับ (Constraints) เป็นการกำหนดเงื่อนไขในการคำนวณ เช่น ความจุ

ของห้องเย็นแต่ละแห่ง และสมการสมดุลปริมาณสินค้าที่เข้าและออกจากห้องเย็น

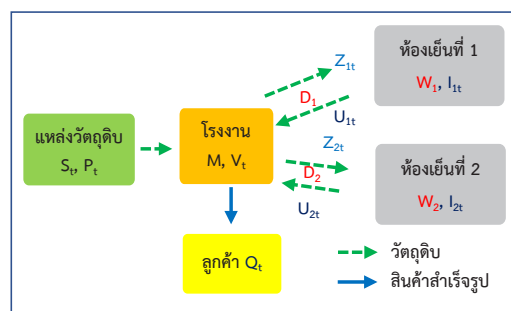
จากนั้นสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อจัดหาวัตถุดิบ ปริมาณที่ขนส่ง และปริมาณการจัดเก็บสินค้าในห้องเย็นแต่ละแห่ง โดยสร้างข้อมูลในสเปรดชีตที่ประกอบด้วยความจุห้องเย็นในโรงงาน ต้นทุนการจัดเก็บโดยเฉลี่ย ความจุของห้องเย็น ค่าเช่า และระยะทางในการเดินทางจากโรงงานไปยังห้องเย็นภายนอก ความต้องการของลูกค้าในสินค้า และราคาวัตถุดิบที่จัดซื้อเข้ามาผลิต จากนั้นแก้ปัญหาด้วยโปรแกรม IBM ILOG CPLEX Optimization Studio Version: 12.4 เพื่อคำนวณหาสถานะที่เหมาะสมในการจัดซื้อและจัดเก็บในแต่ละสัปดาห์ภายใต้ต้นทุนต่ำที่สุด และวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อกำหนดแนวทางการบริหารงานในอนาคต

4. ผลการดำเนินงานวิจัย

4.1 การศึกษาข้อมูลการจัดการโลจิสติกส์ของวัตถุดิบและสินค้าของกรณีศึกษา

รูปแบบการดำเนินงานจัดซื้อวัตถุดิบ การจัดเก็บของโรงงานและภายนอก และการขนส่ง ประกอบด้วย 4 ส่วน ดังภาพที่ 1 ได้แก่ 1) ซัพพลายเออร์วัตถุดิบ (Source) แหล่งวัตถุดิบของโรงงาน ปริมาณที่รับซื้อ (S_t) จะขึ้นกับราคาขายและความต้องการสินค้าของลูกค้าในแต่ละช่วงเวลา (P_t) 2) โรงงานแปรรูปกรณีศึกษา (Plant) สินค้าที่จัดเก็บส่วนใหญ่อยู่ในรูปสินค้าแช่เยือกแข็ง ขนาดห้องเย็นของโรงงาน (M) ต้นทุนการจัดเก็บหรือการดำเนินงานของคลังห้องเย็นโรงงาน (K) และมีปริมาณการจัดเก็บในแต่ละช่วงเวลา t (V_t) 3) ห้องเย็น (WH) ที่ให้บริการภายในพื้นที่รัศมี 200

กิโลเมตร มีห้องเย็น 2 แห่งมีพื้นที่ให้บริการ (W_n) ปริมาณสินค้าที่รับจัดเก็บในแต่ละช่วงเวลา (I_{jt}) และระยะทางมายังโรงงาน (D_n) 4) ลูกค้า (Customers) โดยลูกค้ามีความต้องการสินค้าที่เป็นสินค้า ณ เวลา t (Q_t) ทั้งนี้กำหนดปริมาณสินค้าคงคลังเริ่มต้นของโรงงานและห้องเย็น 1 และ 2 คือ 20 ตัน ($V_0 = I_{10} = I_{20} = 20$) และตัวแปรตัดสินใจให้ค่าเป็นจำนวนเต็มเพื่อความสะดวกในการตัดสินใจ



ภาพที่ 1 แบบจำลองของปัญหา

4.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ออกแบบภายใต้ขอบเขตการส่งวัตถุดิบไปจัดเก็บยังห้องเย็นภายนอก 2 แห่งที่อยู่ภายใต้รัศมีที่กำหนดมีลักษณะเป็นแบบจำลองแบบ Procurement model โดยมีเป้าหมายเพื่อกำหนดต้นทุนโลจิสติกส์รวมที่ต่ำสุดภายใต้เงื่อนไขที่สามารถผลิตสินค้าและส่งมอบให้ลูกค้าได้ทันตามกำหนด โดยดัชนี เซต ค่าพารามิเตอร์ และตัวแปรดังนี้

ดัชนีและเซต (Index and set):

- j = ดัชนีของห้องเย็นภายนอก
- N = จำนวนห้องเย็นภายนอก ($N=2$)
- t = ดัชนีของเวลา (สัปดาห์)
- T = จำนวนเวลาที่พิจารณา ($T=52$ สัปดาห์)

ค่าพารามิเตอร์ (Parameter):

M = ความจุของห้องเย็นของโรงงานสูงสุด (ตัน)

K = ต้นทุนการถือครองสินค้าของโรงงาน (บาทต่อตันต่อสัปดาห์)

W_j = ความจุสูงสุดของห้องเย็นที่ j (ตัน)

H_j = ต้นทุนการถือครองสินค้าของห้องเย็นที่ j (บาทต่อตันต่อสัปดาห์)

C = ค่าขนส่งด้วยรถห้องเย็นหกล้อ (บาทต่อตันต่อกิโลเมตร)

D_j = ระยะทางจากโรงงานไปยังห้องเย็นที่ j (กิโลเมตร)

Q_t = ความต้องการสินค้า ณ สัปดาห์ที่ t (ตัน)

P_t = ราคาวัตถุดิบในสัปดาห์ที่ t (บาทต่อตัน)

ตัวแปรตัดสินใจ (Decision variable):

S_t = ปริมาณการสั่งซื้อวัตถุดิบ ณ สัปดาห์ที่ t (ตัน)

I_{jt} = ปริมาณสินค้าคงคลังในห้องเย็นที่ j ณ สัปดาห์ที่ t (ตัน)

V_t = ปริมาณสินค้าคงคลังในโรงงาน ณ สัปดาห์ที่ t (ตัน)

Z_{jt} = ปริมาณสินค้าที่ขนส่งจากโรงงานไปยังห้องเย็นที่ j ณ สัปดาห์ที่ t (ตัน)

U_{jt} = ปริมาณสินค้าที่ขนส่งจากห้องเย็นที่ j ไปยังโรงงาน ณ สัปดาห์ที่ t (ตัน)

ในการพิจารณาสมการวัตถุประสงค์ผู้วิจัยกำหนดเป็นต้นทุนรวมที่เกิดจากผลรวมของต้นทุนการจัดซื้อวัตถุดิบ ต้นทุนการจัดเก็บสินค้าคงคลังที่โรงงานและห้องเย็นภายนอกทั้ง 2 แห่ง ต้นทุนในการขนส่งจากโรงงานไปและกลับจากห้องเย็นภายนอก ดังสมการ (1) โดยมีข้อจำกัดหรือเงื่อนไข

ของแบบจำลองได้แก่ ความจุของห้องเย็นภายในโรงงานดังสมการ (2) ความจุของห้องเย็นภายนอกดังสมการ (3) สมการสมดุลสินค้าคงคลังของห้องเย็นโรงงานดังสมการ (4) สมการสมดุลสินค้าคงคลังของห้องเย็นภายนอกที่มาจากสินค้าที่จัดเก็บและขนส่งเข้าเท่ากับที่ถูกนำออกจากคลังรวมกับสินค้าคงคลังคงเหลือดังสมการ (5) ค่าเริ่มต้นของปริมาณสินค้าคงคลังที่โรงงานและห้องเย็น (6) และตัวแปรตัดสินใจมีค่าเป็นจำนวนเต็มบวกดังสมการ (7) และ (8)

สมการวัตถุประสงค์ (Objective function):

$$\text{Min } \sum_{t=1}^{52} P_t \cdot S_t + \sum_{t=1}^{52} K \cdot V_t + \sum_{t=1}^{52} \sum_{j=1}^2 H_j \cdot I_{jt} + \sum_{t=1}^{52} \sum_{j=1}^2 C \cdot D_j \cdot (Z_{jt} + U_{jt}) \quad (1)$$

ข้อจำกัด (Subject to):

$$V_t \leq M \quad \forall t \in T \quad (2)$$

$$I_{jt} \leq W_j \quad \forall j \in N, \forall t \in T \quad (3)$$

$$V_{t-1} + S_t + \sum_{j=1}^2 U_{jt} = V_t + Q_t + \sum_{j=1}^2 Z_{jt} \quad \forall t \in T \quad (4)$$

$$I_{jt-1} + Z_{jt} = I_{jt} + U_{jt} \quad \forall j \in N, \forall t \in T \quad (5)$$

$$V_0 = I_{10} = I_{20} = 20 \quad (6)$$

$$S_t, V_t \in I^+ \quad \forall t \in T \quad (7)$$

$$I_{jt}, Z_{jt}, U_{jt} \in I^+ \quad \forall j \in N, \forall t \in T \quad (8)$$

4.3 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์**ในการจัดหาวัตถุดิบทุเรียนแช่เยือกแข็ง**

ในการจัดสรรปริมาณการจัดหาวัตถุดิบที่เป็นผลไม้แช่เยือกแข็ง เริ่มจากการสร้างข้อมูลที่เป็นค่าคงที่ในสเปรดชีต ดังตารางที่ 1 ที่ประกอบด้วยข้อมูล 1) ค่ารับฝาก ความจุ และระยะทางจาก

โรงงานไปยังห้องเย็นภายนอก 2) ปริมาณความต้องการของลูกค้าที่เป็นค่าที่ผู้วิจัยสมมติขึ้น 3) ราคาวัตถุดิบที่จัดซื้อเข้ามาผลิต อ้างอิงจากราคาทุเรียนหมอนทองเบอร์เล็กที่ตลาดไท ระหว่างเดือน ม.ค. 64 - ธ.ค. 64 [16] จากนั้นสร้างสมการเงื่อนไขด้วยโปรแกรม CPLEX Studio ที่ระบุค่าพารามิเตอร์เพิ่มเติมของโรงงาน ได้แก่ ความจุของห้องเย็น ต้นทุนการจัดเก็บจำนวนจากค่าไฟฟ้า ค่าแรงงาน และ

ค่าเสื่อมราคาของอาคารและอุปกรณ์ทำความเย็น และต้นทุนว่าจ้างขนส่งสินค้าของรถกระบะหลักห้องเย็นขนส่งน้ำหนักสูงสุด 5 ตัน คำนวณจากอัตราค่าบริการขนส่ง $2,000 + 15(X)$ บาท เมื่อ X =ระยะทาง (กม.) กรณีระยะทาง 60 กม. มีค่าขนส่ง 9.6 บาท/ตัน/กม. และระยะทาง 120 กม. มีค่าขนส่ง 6.3 บาท/ตัน/กม. ดังนั้นค่าขนส่งเฉลี่ยคิดเป็น 8 บาท/ตัน/กม.

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ประกอบการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การจัดการจัดหาวัตถุดิบ

พารามิเตอร์			ห้องเย็นโรงงาน	ห้องเย็นที่ 1		ห้องเย็นที่ 2	
ต้นทุนการถือครองสินค้าของโรงงาน (K) และค่ารับฝาก (H _i)			162	230		219	
ระยะจากโรงงาน (D _i)			-	60		120	
ความจุสูงสุดของโรงงาน (M) และห้องเย็น (W _i)			120	276		1,191	
กำหนดระดับสินค้าคงคลัง ณ สัปดาห์ที่ 0 (t=0)			20	20		20	
เดือน	สัปดาห์ (t)	ราคาวัตถุดิบ (P _i)	ความต้องการ (Q _i)	เดือน	สัปดาห์ (t)	ราคาวัตถุดิบ (P _i)	ความต้องการ (Q _i)
มกราคม	1	87,500	10	สิงหาคม	27	105,000	5
	2	81,500	10		28	105,000	12
	3	82,000	14		29	95,000	15
	4	113,000	11		30	95,000	11
กุมภาพันธ์	5	105,000	8	กันยายน	31	90,000	9
	6	92,000	6		32	85,000	7
	7	87,000	14		33	83,125	12
	8	85,000	6		34	78,500	12
มีนาคม	9	101,000	13	ตุลาคม	35	80,000	12
	10	107,000	13		36	80,000	15
	11	130,000	7		37	80,000	13
	12	158,000	7		38	90,000	12
เมษายน	13	159,000	12	พฤศจิกายน	39	105,000	6
	14	145,000	13		40	130,000	6
	15	85,000	5		41	120,000	14
	16	86,250	14		42	130,000	11
พฤษภาคม	17	86,250	8	ธันวาคม	43	85,000	13
	18	92,500	15		44	85,000	12
	19	86,875	8		45	90,000	10
	20	91,250	14		46	91,000	14
มิถุนายน	21	95,000	6	ธันวาคม	47	85,000	14
	22	97,000	12		48	96,667	17
	23	109,167	12		49	92,000	20
	24	115,000	11		50	83,750	16
กรกฎาคม	25	113,000	10		51	85,000	14
	26	105,000	15		52	90,000	18



5. ผลลัพธ์และอภิปรายผล

ผลการคำนวณด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ แสดงดังตารางที่ 2 ที่พบว่าต้นทุนการดำเนินงาน รวม คือ 44,392,188 บาท โดยเริ่มสั่งซื้อในสัปดาห์ที่ 2 ที่ราคา 81.50 บาทต่อกิโลกรัม และจัดเก็บที่โรงงานตนเอง 120 ตันและจัดเก็บที่ห้องเย็นภายนอกเพิ่มขึ้นอีก 62 ตัน และจัดซื้ออีกครั้งในสัปดาห์ที่ 3 อีก 14 ตันให้เพียงพอกับความต้องการของลูกค้า

โดยไม่มีการจัดเก็บเพิ่มเติม จากนั้นจึงทยอยนำวัตถุดิบที่เก็บในห้องเย็นภายนอก 1 มาใช้ควบคู่กับการใช้จากห้องเย็นตนเอง เพื่อให้มีพื้นที่เพียงพอที่จะจัดซื้อเพิ่มในสัปดาห์ที่ 15 อีก 70 ตัน จากนั้นจึงทยอยใช้วัตถุดิบที่เก็บในห้องเย็นภายนอก 1 และ 2 จนหมด และจัดซื้อเพิ่มในสัปดาห์ที่ 34 และ 37 เพื่อเก็บที่โรงงานตนเองและห้องเย็นภายนอก 1 โดยช่วงราคาวัตถุดิบอยู่ที่ 78.50 - 85 บาทต่อกิโลกรัม

ตารางที่ 2 ผลเฉลยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จากข้อมูลราคาวัตถุดิบและความต้องการในปีพ.ศ. 2564

t	P _t	Q _t	S _t	V _t	Z _{1t}	I _{1t}	U _{1t}	Z _{2t}	I _{2t}	U _{2t}	t	P _t	Q _t	S _t	V _t	Z _{1t}	I _{1t}	U _{1t}	Z _{2t}	I _{2t}	U _{2t}
1	87,500	10		10		20			20		27	105,000	5		47						
2	81,500	10	182	120	62	82			20		28	105,000	12		35						
3	82,000	14	14	120		82			20		29	95,000	15		20						
4	113,000	11		120		71	11		20		30	95,000	11		9						
5	105,000	8		120		63	8		20		31	90,000	9								
6	92,000	6		120		57	6		20		32	85,000	7	7							
7	87,000	14		120		43	14		20		33	83,125	12	12							
8	85,000	6		120		37	6		20		34	78,500	12	209	120	77	77				
9	101,000	13		107		37			20		35	80,000	12		108		77				
10	107,000	13		94		37			20		36	80,000	15		93		77				
11	130,000	7		87		37			20		37	80,000	13	40	120		77				
12	158,000	7		80		37			20		38	90,000	12		120		65	12			
13	159,000	12		68		37			20		39	105,000	6		120		59	6			
14	145,000	13		55		37			20		40	130,000	6		120		53	6			
15	85,000	5	70	120		37			20		41	120,000	14		120		39	14			
16	86,250	14		120		23	14		20		42	130,000	11		120		28	11			
17	86,250	8		120		15	8		20		43	85,000	13		120		15	13			
18	92,500	15		120			15		20		44	85,000	12		120		3	12			
19	86,875	8		120					12	8	45	90,000	10		113			3			
20	91,250	14		118						12	46	91,000	14		99						
21	95,000	6		112							47	85,000	14		85						
22	97,000	12		100							48	96,667	17		68						
23	109,167	12		88							49	92,000	20		48						
24	115,000	11		77							50	83,750	16		32						
25	113,000	10		67							51	85,000	14		18						
26	105,000	15		52							52	90,000	18								

การวิเคราะห์ผลของแบบจำลองเพื่อนำมาประกอบการตัดสินใจในกิจกรรมโลจิสติกส์ พบว่า

1) เมื่อพิจารณาสัดส่วนต้นทุนโลจิสติกส์ในแต่ละด้านเมื่อเทียบกับต้นทุนรวม พบว่า ต้นทุนการจัดซื้อวัตถุดิบมีสัดส่วนสูงที่สุดคิดเป็น 97.16% รองลงมาได้แก่ ต้นทุนการจัดเก็บที่โรงงานคิดเป็น 1.61% ต้นทุนการจัดเก็บที่ห้องเย็นที่ 1 คิดเป็น 0.68% ต้นทุนการจัดเก็บที่ห้องเย็นที่ 2 คิดเป็น 0.18% ต้นทุนการขนส่งจากห้องเย็นที่ 2 ไปยังโรงงานคิดเป็น 0.17% ต้นทุนการขนส่งจากโรงงานไปยังห้องเย็นที่ 1 คิดเป็น 0.15% ต้นทุนการขนส่งจากห้องเย็นที่ 2 ไปโรงงาน คิดเป็น 0.04%

2) การจัดซื้อวัตถุดิบ ข้อจำกัดของการแก้ไขปัญหาด้วยโปรแกรมจำนวนเต็มนี้ คือ ต้องทราบราคาวัตถุดิบล่วงหน้า ซึ่งได้ราคาจริงในปีพ.ศ. 2564 ซึ่งในความเป็นจริง ราคาที่ใช้ในการวางแผนจะใช้ราคาที่พยากรณ์ซึ่งนิยมใช้ราคาของปีที่ผ่านมา ทั้งนี้แบบจำลองเสนอให้รับซื้อวัตถุดิบปริมาณมากในช่วงที่ราคาต่ำถึงต่ำที่สุด 2 ช่วง คือ ต้นปีในเดือนมกราคมซึ่งเป็นปลายฤดูของทุเรียนจากภาคใต้ ก่อนเข้าสู่ช่วงต้นฤดูของทุเรียนภาคตะวันออก และช่วงที่สองกลาง-ปลายเดือนสิงหาคม ซึ่งช่วงดังกล่าวมีปัญหาเรื่องการหยุดรับซื้อทุเรียนเพื่อส่งออกของโรงคัดบรรจุ ทำให้ราคาผลผลิตต่ำกว่าปกติ ส่งผลให้ราคาเฉลี่ยของทุเรียนต่ำกว่า 82 บาทต่อกิโลกรัม (ราคานี้ไม่จำเป็นต้องเท่ากันในแต่ละปี) แบบจำลองจึงเสนอให้ซื้อสินค้าในปริมาณมากเพื่อจัดเก็บในห้องเย็นตนเองและห้องเย็นภายนอกที่ 1 ทั้งนี้ในกรณีที่

สอดคล้องกับฤดูกาลผลไม้ของภาคตะวันออกและภาคใต้ในช่วง เม.ย.-พ.ค และ ก.ค.-ส.ค. และแบบจำลองจะเสนอให้มีการจัดซื้อในราคาสูงสุดไม่เกิน 85 บาทต่อกิโลกรัม เพื่อเติมเต็มสินค้าในห้องเย็นตนเองในกรณีที่สินค้าลดลงครึ่งหนึ่ง และหากทราบว่าในต้นฤดูกาลถัดไปราคาจะลดลงก็อาจมีการลดระดับสินค้าคงคลังให้ลดลงเกินครึ่งได้ หรือหากราคาสินค้ามีราคาเท่ากับหรือต่ำกว่า 82 บาทต่อกิโลกรัม และสินค้าคงคลังยังมีปริมาณมาก แบบจำลองจะเสนอให้มีการจัดซื้อสินค้าเพื่อผลิตเท่านั้น และเมื่อพิจารณาปริมาณและช่วงเวลาที่ได้รับซื้อ พบว่าส่วนใหญ่รับซื้อ 3 ช่วงคือ เดือน ส.ค - ก.ย. 50.19% และเดือน ม.ค. 36.70% ที่ตรงกับผลผลิตทุเรียนจากภาคใต้ และเดือน เม.ย. 13.11% ที่ตรงกับภาคตะวันออก ส่วนแนวทางการรับซื้อทุเรียนในอนาคตควรเลือกซื้อช่วงนอกฤดูกาลและกำหนดเพดานการรับซื้อที่เหมาะสม เนื่องจากในการจัดซื้อจริงนั้นระบบแนะนำปริมาณการรับซื้อที่สูงมาก ซึ่งในสถานการณ์จริงอาจไม่สามารถจัดหาทุเรียนได้ทั้งในเชิงปริมาณและคุณภาพ นอกจากนี้ควรเปลี่ยนรูปแบบทุเรียนสดเป็นการจัดซื้อทุเรียนที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแล้วภายในจังหวัด เพื่อลดต้นทุนการดำเนินงาน

3) การจัดเก็บวัตถุดิบ ผลเฉลยที่ดีที่สุดแนะนำการตัดสินใจซื้อเลือกซื้อวัตถุดิบปริมาณมากในช่วงที่ราคาทุเรียนต่ำแล้วจึงจัดเก็บไว้ใช้ในช่วงที่ทุเรียนมีราคาสูงขึ้น ทั้งนี้ในสถานการณ์จริงไม่สามารถทราบราคาทุเรียนล่วงหน้า ต้องใช้การพยากรณ์ราคาเป็นหลัก ดังนั้นความถูกต้องของการพยากรณ์จึงมีส่วนสำคัญให้การตัดสินใจซื้อถูกต้องหรือไม่ ทั้งนี้โรงงาน

ควรจัดเก็บสินค้าเข้าห้องเย็นตนเองให้เต็มก่อน เนื่องจากมีค่าจัดเก็บที่ต่ำกว่า และไม่ต้องเสียค่าขนส่ง จากนั้นระบบเลือกจัดเก็บห้องเย็นที่ 1 เนื่องจากค่าขนส่งสูงกว่า 50% ขณะที่ค่าจัดเก็บต่อตันแพงกว่าเพียง 5% และโรงงานเลือกนำสินค้าจากห้องเย็นที่ 1 เข้ามาใช้ผลิตก่อน ส่วนห้องเย็นที่ 2 ระบบไม่แนะนำให้ใช้จนกว่าสินค้าคงคลังของห้องเย็นที่ 1 ถูกใช้จนหมด

เมื่อวิเคราะห์ปริมาณการจัดเก็บสินค้าคงคลัง ดังตารางที่ 3 ที่พบว่าต้นทุนการจัดเก็บมากที่สุดเกิดที่โรงงาน ที่มีการจัดเก็บที่ห้องเย็นโรงงาน 48 สัปดาห์ ปริมาณจัดเก็บสะสม 4,410 ตัน ต้นทุนจัดเก็บ 714,420 บาท ทั้งนี้มี 4 สัปดาห์ที่แบบจำลองเสนอว่าไม่ต้องการจัดเก็บแต่ให้ใช้วิธีซื้อมาเพื่อผลิตและจำหน่ายโดยตรง เนื่องจากเป็นช่วงที่ราคาสินค้าต่ำสุด รองลงมาคือห้องเย็นที่ 1 ที่แบบจำลองเลือกให้มีการจัดเก็บ 28 สัปดาห์ จัดเก็บสะสม 1,322 ตัน มีค่ารับฝาก 304,060 บาท และสุดท้ายห้องเย็นที่ 2 ที่มีการจัดเก็บเพียง 19 สัปดาห์ จัดเก็บสะสม 372 ตัน และมีค่ารับฝาก 81,468 บาท

ตารางที่ 3 การวิเคราะห์ปริมาณการจัดเก็บสินค้าคงคลังของแต่ละแห่งในปีพ.ศ. 2564

สถานที่จัดเก็บ	จำนวนวันจัดเก็บ (สัปดาห์)	การจัดเก็บสะสม (ตัน)	การจัดเก็บเฉลี่ย (ตัน)	ค่าจัดเก็บต่อปี (บาท)
ห้องเย็นโรงงาน	48 (92.3%)	4,410	91.9	714,420
ห้องเย็นที่ 1	28 (53.8%)	1,322	47.2	304,060
ห้องเย็นที่ 2	19 (36.5%)	372	19.6	81,468

หากวิเคราะห์ต้นทุนโลจิสติกส์ในแต่ละส่วน ด้วยการวิเคราะห์ความไวของคำตอบเมื่อปรับระดับค่าพารามิเตอร์ต้นทุน 4 ค่า ได้แก่ 1) ราคาทุเรียน 2) ต้นทุนการจัดเก็บที่โรงงานและห้องเย็น 3) ต้นทุนการขนส่งต่อระยะทาง 4) ระยะทางระหว่างโรงงานไปยังห้องเย็นภายนอก โดยพิจารณาที่มีการเพิ่มขึ้นจากฐานต้นทุนเดิม 20, 40, 60, 80 และ 100% ตามลำดับ ดังตารางที่ 4 ตัวอย่างการวิเคราะห์ผลการเปลี่ยนแปลงที่ 20% 1) ค่าทุเรียนเพิ่มขึ้น 20% มีผลทำให้ต้นทุนรวมเพิ่มขึ้น 19.34% ซึ่งมีอัตราเพิ่มขึ้นน้อยกว่าอัตราการเพิ่มขึ้นของค่าทุเรียนเล็กน้อย 2) ค่าการจัดเก็บต่อหน่วยที่โรงงานเพิ่มขึ้น 20% มีผลให้ต้นทุนรวมเพิ่มขึ้น 0.31% เช่นเดียวกับห้องเย็นที่ 1 และ 2 ที่เพิ่มขึ้น 0.11% และ 0.01% ตามลำดับ 3) ค่าขนส่งต่อระยะทางเพิ่มขึ้น 20% จะส่งผลต่อต้นทุนรวมเพิ่มขึ้นเพียง 0.08% และ 4) ระยะทางจากโรงงานไปยังห้องเย็นที่ 1 และ 2 เพิ่มขึ้น 20% ส่งผลให้ต้นทุนรวมเพิ่มขึ้นเพียง 0.06% และ 0.01%

ดังนั้นเมื่อพิจารณาทั้ง 5 อัตราการเพิ่มขึ้นในตารางที่ 4 จึงสรุปได้ว่าต้นทุนที่มีผลต่อการดำเนินงานเรียงลำดับจากมากที่สุดไปน้อยสุดใน 7 ปัจจัย คือ (1) ราคาวัตถุดิบ ราคาวัตถุดิบส่งผลต่อการเพิ่มต้นทุนรวมในอัตราที่น้อยกว่าการเพิ่มของราคาวัตถุดิบเล็กน้อย แต่เป็นสัดส่วนที่สูงที่สุดเมื่อเทียบกับอีก 6 ปัจจัย (2) ต้นทุนการจัดเก็บที่โรงงาน เนื่องจากต้นทุนการจัดเก็บที่โรงงานมีค่าต่ำกว่าห้องเย็นภายนอก และไม่มีค่าขนส่งเพิ่มเติม ทำให้แบบจำลอง

แนะนำให้จัดเก็บสินค้าที่โรงงานเป็นหลัก (3) ต้นทุนการจัดเก็บที่ห้องเย็นที่ 1 ซึ่งในปัจจุบันมีต้นทุนสูงกว่าห้องเย็นที่ 2 แต่มีระยะทางไกลโรงงานมากกว่า จึงทำให้แบบจำลองแนะนำให้จัดเก็บสินค้าที่ห้องเย็นที่ 1 ก่อนไปจัดเก็บที่ห้องเย็นที่ 2 (4) ต้นทุนการขนส่งต่อระยะทาง เมื่อพิจารณาการเพิ่มขึ้นในช่วง 20%-60% มีสัดส่วนการเพิ่มขึ้นน้อยกว่าต้นทุน

การจัดเก็บที่ห้องเย็นที่ 1 แต่เมื่อเพิ่มขึ้นในช่วง 80%-100% กลับมีผลต่อการเพิ่มต้นทุนโดยรวมมากกว่า ต้นทุนการจัดเก็บที่ห้องเย็นที่ 1 (5) ระยะทางระหว่างโรงงานไปยังห้องเย็นภายนอกที่ 1 (6) ต้นทุนการจัดเก็บที่ห้องเย็นที่ 2 (7) ระยะทางระหว่างโรงงานไปยังห้องเย็นภายนอกที่ 2 ซึ่งมีผลน้อยที่สุดใน 7 ปัจจัย

ตารางที่ 4 สัดส่วนการเพิ่มขึ้นของต้นทุนรวมเมื่อพารามิเตอร์ในแต่ละประเภทเพิ่มขึ้นจากเดิม 20-100%

อัตราการเพิ่มขึ้นของพารามิเตอร์	ค่าวัตถุดิบ (ทุเรียน)	ต้นทุนจัดเก็บต่อตันต่อสัปดาห์ของ			ค่าขนส่งต่อระยะทาง	ระยะจากโรงงานไป	
		โรงงาน	ห้องเย็นที่ 1	ห้องเย็นที่ 2		ห้องเย็นที่ 1	ห้องเย็นที่ 2
20%	19.34%	0.31%	0.11%	0.01%	0.08%	0.06%	0.01%
40%	38.63%	0.60%	0.17%	0.02%	0.12%	0.11%	0.02%
60%	57.93%	0.79%	0.20%	0.03%	0.18%	0.14%	0.03%
80%	77.22%	0.94%	0.22%	0.04%	0.23%	0.18%	0.03%
100%	96.51%	1.05%	0.23%	0.04%	0.26%	0.21%	0.04%
เฉลี่ย	57.926%	0.738%	0.186%	0.028%	0.174%	0.140%	0.026%
ลำดับความไว	1	2	3	6	4	5	7
ลำดับความไวต่อเกณฑ์รวม	1	2			3	4	

6. บทสรุป

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและนำเสนอโปรแกรมจำนวนเต็มสำหรับการจัดหา การขนส่ง และการจัดการสินค้าคงคลังของทุเรียนแช่แข็งทั้งลูก สำหรับบริษัทกรณีศึกษาเพื่อลดต้นทุนด้านโลจิสติกส์ และกำหนดนโยบายสำหรับการจัดซื้อและการจัดเก็บสินค้าคงคลัง การศึกษาเกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์การวางแผนโลจิสติกส์และโซ่อุปทาน การจัดซื้อ

การขนส่ง และการจัดเก็บวัตถุดิบ โดยแบบจำลองนี้ถูกกำหนดขึ้นเพื่อคำนวณหาคำตอบที่ดีที่สุดที่สามารถลดต้นทุนรวมในขณะที่พิจารณาถึงข้อจำกัดในด้านการจัดเก็บสินค้าคงคลังในคลังสินค้าของกรณีศึกษา หรือห้องเย็นภายนอก โดยสามารถใช้แบบจำลองดังกล่าวเพื่อกำหนดระยะเวลาที่เหมาะสมของกลยุทธ์การจัดหาทุเรียน และการจัดเก็บได้ ทั้งนี้หากพิจารณาต้นทุนที่ส่งผลต่อต้นทุนการดำเนินงานรวม พบว่า



ต้นทุนการจัดซื้อวัตถุดิบที่แบบจำลองเสนอให้จัดซื้อในช่วงราคาที่ต่ำที่สุด และเลือกจัดเก็บที่ห้องเย็นตนเองในปริมาณที่สูงสุดก่อนเนื่องจากมีต้นทุนที่ต่ำกว่าการจัดเก็บที่ห้องเย็นภายนอก ต้นทุนที่ส่งผลกระทบต่อต้นทุนการจัดเก็บที่ห้องเย็นภายนอก ส่วนต้นทุนสุดท้ายคือต้นทุนขนส่ง ที่เนื่องจากการขนส่งเกิดจากความต้องการในการผลิตแต่ละครั้ง

แนวทางการวิจัยในอนาคต 1) การศึกษาเทคนิคในการพยากรณ์ราคาทุเรียนที่เหมาะสมที่สุด 2) การวิเคราะห์ผลกระทบของต้นทุนการขนส่งสินค้าและค่ารับฝากสินค้า ห้องเย็นบางแห่งคิดค่ารับฝากและค่าขนส่งตามสัดส่วนตามปริมาณที่ลูกค้าใช้บริการ 3) การศึกษาแนวทางการลดต้นทุนในการจัดเก็บ เช่น การแปรรูปวัตถุดิบเบื้องต้นเพื่อลดน้ำหนักในการจัดเก็บ ด้วยการปกปิดเปลือกทุเรียนก่อนการจัดเก็บ ซึ่งสามารถลดพื้นที่ที่ใช้ในการจัดเก็บลงได้ สามารถเพิ่มพื้นที่ของห้องเย็นภายในบริษัท หรือการลดต้นทุนการดำเนินงานของห้องเย็น หรือการออกแบบระบบโซ่อุปทานที่มีเครือข่ายซัพพลายเออร์ผลิตสินค้าแช่เยือกแข็งหรือมีการปกปิดเปลือกสินค้าเบื้องต้น เพื่อลดปัญหาด้านแรงงาน เป็นต้น

7. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณผู้บริหารของบริษัทกรณีศึกษาที่ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูลประกอบงานวิจัยในครั้งนี้

8. เอกสารอ้างอิง

[1] Fadji T, Coetzee C, Chen L, Chukwu O, and Linus U (2016). Postharvest Biology

and Technology Susceptibility of apples to bruising inside ventilated corrugated paperboard packages during simulated transport damage. Postharvest Biology and Technology, 118: 111–119.

[2] Defraeye T, Cronjé P, Verboven P, Linus U, and Nicolai B (2015). Exploring ambient loading of citrus fruit into reefer containers for cooling during marine transport using computational fluid dynamics. Postharvest Biology and Technology, 108: 91–101.

[3] Erin Brodwin, and Samantha Lee (2017). Here's when fruits and vegetables are actually in season. Businessinsider. <https://www.businessinsider.com/fruits-vegetables-in-season-spring-summer-fall-winter-2017-4>

[4] Cooper L (1963). Location allocation problem. Operations Research, 11(3): 331–343.

[5] Love R F, and Wong J Y (1976). On Solving a One-Dimensional Space Allocation Problem With Integer Programming. INFOR: Information Systems and Operational Research, 14(2): 139–143.

[6] Yanagisawa H (2007). The material allocation problem in the steel industry. IBM Journal of Research and Development, 51(3–4): 363–374.

[7] Kim B I, Koo J, and Park B S (2009). A raw material storage yard allocation

problem for a large-scale steelworks. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 41(9–10): 880–884.

[8] McCann P (1993). The Logistics-Cost Location-Production Problem. Journal of Regional Science, 33(4): 503–516.

[9] Ongkunaruk P (2017). Introduction to Supply Chain Management for Agro-Industry. The department of Agro-Industrial Technology, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University.

[10] สุวรรณ หวังเจริญเดช. (2558). การบริหารต้นทุนโลจิสติกส์กับผลกำไรของธุรกิจ SMEs. วารสารวิชาการมหาวิทยาลัยธนบุรี, 9(18): 97-102

[11] Zhou G, Min H, and Gen M (2003). A genetic algorithm approach to the bi-criteria allocation of customers to warehouses. International Journal of Production Economics, 86(1): 35–45.

[12] Bordón M R, Montagna J M, and Corsano G (2020). Mixed integer linear programming approaches for solving the raw material allocation, routing and scheduling problems in the forest industry. International

Journal of Industrial Engineering Computations, 11(4): 525–548.

[13] Wahyudin R S, Sutopo W, Hisjam M, and Hardiono R S (2016). Resource allocation model to find optimal allocation of workforce, material, and tools in an aircraft line maintenance. In: Proceedings of the International Multi Conference of Engineers and Computer Scientists, Hongkong, pp.782–787.

[14] เอกชัย คุปตาวาทิน (2557). การประยุกต์ใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบวิวัฒนาการคำตอบสำหรับการจัดสรรวัตถุดิบในการขนส่งข้าวแบบหลายลำดับขั้น. วารสารวิชาการและวิจัย มทร. พระนคร, 8(1): 137–150.

[15] คุลิกา ดาดาช และ ปวีณา เชาวลิทวงศ์. (2565). การประยุกต์แบบจำลองโปรแกรมเชิงเส้นตรงสำหรับการสั่งผลิตจากวัตถุดิบคงคลังส่วนเกิน. วารสารวิศวกรรมศาสตร์, 29(1): 1–11.

[16] ตลาดไทคอนแทคเซ็นเตอร์. (2021). ราคาทุเรียนหมอนทอง – เบอร์เล็ก. Talaadthai. Com. <https://talaadthai.com/product/4-12-03-mon-thong-durian-small-size>

การออกแบบวงจรวัดสัญญาณส่วนหน้าอัตราการกินพลังงานต่ำและสัญญาณรบกวนต่ำ ที่มีความสามารถในการต้านการเคลือบแฝงแบบปรับได้ทางอิเล็กทรอนิกส์ สำหรับการวัดสัญญาณคลื่นไฟฟ้าหัวใจ

Design of A Low-Power Low-Noise Analog Frontend with Electronically Tunable Anti-Aliasing Capability for Electrocardiogram Recording

อินทัช ยงพานิชย์¹ วรธร วัฒนพานิชย์^{2*}

บริษัท ซิลิคอน คราฟท์ เทคโนโลยี จำกัด (มหาชน)¹

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์^{1,2}

E-mail: intouch.yongpanich@sic.co.th, fengwdw@ku.ac.th

* ผู้ประพันธ์บรรณกิจ (corresponding author)



บทคัดย่อ

งานวิจัยฉบับนี้นำเสนอการออกแบบวงจรวัดสัญญาณส่วนหน้า (Analog Frontend: AFE) ที่มีอัตราการกินพลังงานต่ำและมีสัญญาณรบกวนอ้างอิงไปที่อินพุตต่ำ ซึ่งออกแบบโดยใช้เทคนิคการสับสัญญาณ (chopping) สำหรับอุปกรณ์วัดสัญญาณคลื่นไฟฟ้าหัวใจ (Electrocardiogram: ECG) แบบติดตามตัว ที่ไม่จำเป็นต้องมีวงจรต้านการเคลือบแฝงเพิ่มเติม (Anti-aliasing filter) เนื่องจากวงจรวัดสัญญาณส่วนหน้าถูกออกแบบมาให้สามารถปรับแบนด์วิดท์ให้ต่ำลงได้ โดยใช้เทคนิค duty-cycle resistance (DCR) ซึ่งสามารถปรับแบนด์วิดท์ได้ต่ำสุดถึง 200 Hz โดยไม่เป็นการเพิ่มพื้นที่ของวงจรและไม่เป็นการเพิ่มสัญญาณรบกวนอ้างอิงไปที่อินพุตอย่างมีนัยสำคัญ โดยในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบลงบนวงจรรวมในเทคโนโลยี CMOS ขนาด 180 nm โดยวงจรรวมใช้แรงดันซัพพลาย 1.2 V กินพลังงานอยู่ที่ 2.32 μW มีอัตราขยาย 20 V/V และสามารถวัดสัญญาณรบกวนที่อินพุต (Input-referred Noise: IRN) ได้เท่ากับ 1.6 μV_{rms} ในช่วงความถี่ 1 ถึง 250 Hz



คำสำคัญ:

วงจรวัดสัญญาณส่วนหน้า; สัญญาณคลื่นไฟฟ้าหัวใจ; อัตราการกินพลังงานต่ำ; วงจรกรองต้านการเคลือบแฝง; การออกแบบวงจรรวมพลังงานต่ำ



Abstract

This paper presents the design of a low-power low-noise chopped analog frontend (AFE) for wearable electrocardiogram recording devices. The AFE has an embedded anti-aliasing filter without the need of an additional lowpass filter, which saves the chip area and overall power consumption without significantly increasing the AFE's input-referred

noise. The AFE's cutoff frequency can be tuned to the minimum value of 200 Hz via electronically tuning a resistance value with the duty-cycle resistance technique. Designed and fabricated in a 180-nm CMOS process, the AFE, operating from a 1.2-V supply voltage and occupying an area of 0.55 mm², provides a gain of 20 V/V, consumes 2.32 μ W of power, and exhibits an input-referred noise of 1.6 μ V_{rms} integrated from 1-250 Hz.

Keywords: Analog Frontend; Electrocardiogram; Low-power; Anti-aliasing filter; low-power integrated circuit

1. บทนำ

สังคมไทยได้เริ่มเข้าสู่ภาวะสังคมผู้สูงอายุ ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2548 โดยสาเหตุของการเพิ่มขึ้นของ สัดส่วนผู้สูงอายุนั้นมีสาเหตุมาจากการพัฒนาทาง เทคโนโลยีทางการแพทย์และระบบสาธารณสุข อันส่งผลให้ประชากรมีอายุที่ยืนยาวมากขึ้น และอีก เหตุผลคือ การลดลงของจำนวนการมีบุตรต่อหนึ่ง ครอบครัวที่มีสาเหตุมาจากค่านิยมทางสังคมที่เปลี่ยน ไป ทั้งสองเหตุผลที่กล่าวมาข้างต้นนี้นำไปสู่การเพิ่มขึ้น ของสัดส่วนประชากรผู้สูงอายุต่อประชากรช่วงวัย อื่น ๆ [1]

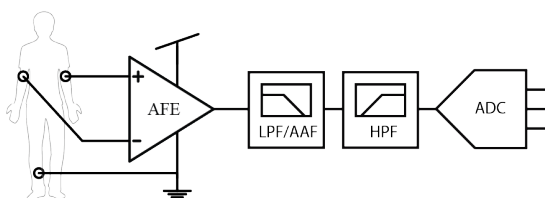
ถึงแม้จากข้อมูลสถิติจะบ่งบอกถึงการมีอายุขัย ที่มากขึ้นของประชากรเฉลี่ย แต่เพราะด้วยการเพิ่มขึ้น ของจำนวนประชากรทั้งหมดทำให้ภายในปี พ.ศ. 2562 มีอัตราการเสียชีวิตของจำนวนประชากรทั่วโลกสูง ถึง 55.4 ล้านคน โดย 32% ของอัตราการเสียชีวิต ดังกล่าว หรือคิดเป็นจำนวน 17.9 ล้านคน มาจาก โรคหัวใจและหลอดเลือด [2] ซึ่งมีแนวโน้มที่จะเพิ่ม มากขึ้นเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของประชากรในกลุ่ม ผู้สูงอายุ ซึ่งประชากรกลุ่มนี้เป็นกลุ่มที่มีความเสี่ยงสูง

ในการเป็นโรคหัวใจและหลอดเลือดเนื่องจากมีปัญหา สุขภาพเป็นทุนเดิมอยู่แล้ว อาทิ โรคเบาหวาน โรค ความดันโลหิตสูง ภาวะไขมันในเลือดผิดปกติ ในทาง กลับกัน ปัจจัยที่ช่วยลดความเสี่ยงในการเป็นโรค หัวใจและหลอดเลือด คือ การรับประทานอาหารที่มี ประโยชน์ การออกกำลังกายสม่ำเสมอ การหลีกเลี่ยง การดื่มแอลกอฮอล์ และควรหมั่นตรวจสุขภาพของ หัวใจอย่างสม่ำเสมอเพื่อป้องกันและรักษาอย่าง ทันทีทันที่ [3]

ทั้งนี้การวินิจฉัยอาการของโรคหัวใจและ หลอดเลือดนั้นจำเป็นต้องใช้เครื่องมือวัดสัญญาณ คลื่นไฟฟ้าหัวใจที่อยู่ในโรงพยาบาล ซึ่งในโรคหัวใจ บางประเภทนั้นจะแสดงอาการแค่ช่วงเวลาสั้น ๆ ส่งผลให้ผู้ป่วยต้องไปโรงพยาบาลบ่อยครั้งเพื่อใช้ เครื่องมือวัดสัญญาณคลื่นไฟฟ้าหัวใจในการวินิจฉัย อันเป็นการสร้างความไม่สะดวกสบาย และเป็นการ เพิ่มค่าใช้จ่ายแก่ผู้ป่วยด้วย ดังนั้นเครื่องมือวัดสัญญาณ คลื่นไฟฟ้าหัวใจแบบติดตามตัว (wearable electrocardiography device) จึงได้ถูกพัฒนาขึ้น

โดยมีจุดประสงค์ให้มีขนาดเล็กกะทัดรัดเพื่อให้สามารถใช้ติดตามตัวผู้ป่วยเพื่อวัดคลื่นไฟฟ้าหัวใจได้เป็นเวลานาน โดยที่ไม่กระทบต่อการใช้ชีวิตประจำวันและยังคงซึ่งคุณภาพของสัญญาณ [4-7]

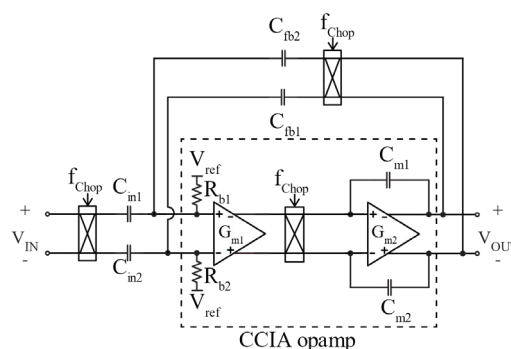
โดยทั่วไปเครื่องมือวัดสัญญาณคลื่นไฟฟ้าหัวใจแบบติดตามตัวประกอบด้วยวงจรดังในภาพที่ 1



ภาพที่ 1 วงจรสำหรับเครื่องมือวัดสัญญาณคลื่นไฟฟ้าหัวใจแบบติดตามตัว

1.1 วงจรวัดสัญญาณส่วนหน้า (Analog Frontend: AFE) ทำหน้าที่ขยายสัญญาณคลื่นไฟฟ้าหัวใจจากร่างกาย โดยในวงจรขยายนี้ต้องมีสัญญาณรบกวนอ้างอิงไปที่อินพุต (Input-referred Noise: IRN) ต่ำกว่า $30 \mu\text{V}_{\text{pp}}$ [8] ซึ่งเป็นมาตรฐานสำหรับเครื่องมือวัดสัญญาณคลื่นไฟฟ้าหัวใจ โดยเทคนิคที่นิยมนำมาออกแบบเพื่อให้สามารถควบคุมสัญญาณรบกวนได้สอดคล้องกับมาตรฐานที่กล่าวข้างต้นคือเทคนิคการสลับสัญญาณ (chopping) [9–13] ดังภาพที่ 2 เนื่องจากเทคนิคนี้จะทำการย้ายสัญญาณไปที่ความถี่สูงก่อนเข้าสู่วงจรขยายขั้นที่หนึ่ง (first stage) ซึ่งเป็นความถี่ที่สูงพอที่สัญญาณจะไม่ถูกรบกวนโดยสัญญาณรบกวนกระพริบ (flicker noise) ของทรานซิสเตอร์ต่าง ๆ ในวงจร ดังนั้นเมื่อสัญญาณถูกย้ายไปที่ความถี่สูงแล้ว การออกแบบจึงสามารถ

มุ่งไปที่การลดสัญญาณรบกวนความร้อน (thermal noise) ของวงจรเป็นหลัก ซึ่งสามารถลดได้ง่ายกว่าด้วยเทคนิคทางการออกแบบวงจรต่าง ๆ นอกจากนี้ วงจรวัดสัญญาณส่วนหน้าจำเป็นต้องมีแบนด์วิดท์ (bandwidth) ที่มากพอสำหรับการขยายสัญญาณคลื่นไฟฟ้าหัวใจ โดยสัญญาณคลื่นไฟฟ้าหัวใจนั้นมีแบนด์วิดท์อยู่ในช่วงประมาณ 0.05-150 Hz [14] ดังนั้นแบนด์วิดท์ของวงจรวัดสัญญาณส่วนหน้าจึงไม่ควรที่จะสูงเกินแบนด์วิดท์ของสัญญาณนัก เนื่องจากจะส่งผลให้วงจรส่วนหน้ารับสัญญาณรบกวนความร้อนในช่วงความถี่ที่กว้างเกินความจำเป็น อันจะทำให้สัญญาณรบกวนอ้างอิงไปที่อินพุตสูงเกินจำเป็นด้วย



ภาพที่ 2 วงจร CCIA [9]

1.2 วงจรกรองผ่านต่ำ (Lowpass filter (LPF) หรือ Anti-aliasing filter (AAF)) ทำหน้าที่กรองสัญญาณที่มีความถี่ที่สูงเกินแบนด์วิดท์ของสัญญาณคลื่นไฟฟ้าหัวใจทิ้งไป เพื่อป้องกันการเกิด การเคลือบแฝง (aliasing) ของสัญญาณรบกวนความร้อนจากการซัดตัวอย่าง (sampling) โดยวงจรแปลงสัญญาณอุปมานเป็นเชิงเลข (analog-to-digital

converter หรือ ADC) ซึ่งมีอัตราการซิกตัวอย่าง (sampling rate) ที่จำกัด ทั้งนี้วงจร AAF มีความสำคัญเนื่องจากแบนด์วิดท์ของวงจรวัดสัญญาณส่วนหน้า มักถูกออกแบบให้มีค่าสูงกว่าแบนด์วิดท์ของสัญญาณคลื่นไฟฟ้าหัวใจพอสมควร เพื่อไม่ให้พื้นที่ของวงจรที่ใหญ่เกินไป อันเป็นการประหยัดพื้นที่ของแผงวงจรรวมในการออกแบบ

ซึ่งหากพิจารณาวงจรจากงานวิจัย [9] ดังในภาพที่ 2 จะเห็นว่าแบนด์วิดท์ของวงจรหรือความถี่ตัด (cutoff frequency) ถูกกำหนดโดยสมการที่ (1)

$$f_{-3dB} = \frac{C_{fb1,2}}{(C_{in,2} + C_{fb1,2})} \times \frac{G_{m1}}{2\pi C_{m1,2}} \quad (1)$$

โดย G_{m1} หมายถึงค่าทรานส์คอนดักแทนซ์ (transconductance) ของวงจรขยาย G_{m1} หากต้องการปรับลดแบนด์วิดท์ของวงจรวัดสัญญาณส่วนหน้าด้วยการปรับค่า G_{m1} ให้ต่ำลง จะส่งผลให้สัญญาณรบกวนความร้อนของวงจรมีค่าสูงขึ้น นอกจากนี้ การปรับลดแบนด์วิดท์ด้วยการปรับเพิ่มขนาดของ $C_{m1,2}$ นั้นจะส่งผลให้วงจรกินพื้นที่ภายในชิปมากขึ้น ดังนั้นการเพิ่มขนาดของ $C_{m1,2}$ จึงสามารถทำได้อย่างจำกัด กล่าวโดยสรุปคือการปรับแบนด์วิดท์ของวงจรวัดสัญญาณส่วนหน้าให้ต่ำเพียงพอสำหรับการวัดสัญญาณคลื่นไฟฟ้าหัวใจ โดยไม่ทำให้ขนาดของวงจรใหญ่เกินไปจึงทำได้ยาก

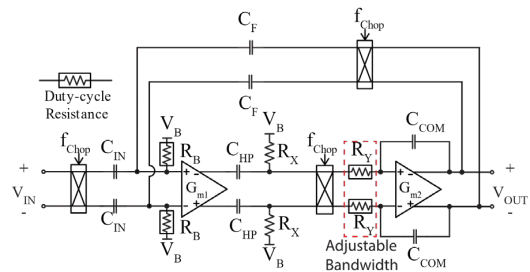
1.3 วงจรกรองผ่านสูง (High pass filter (HPF)) ทำหน้าที่กรองสัญญาณที่มีความถี่ที่ต่ำกว่าแบนด์วิดท์ของสัญญาณคลื่นไฟฟ้าหัวใจทิ้งไป โดยส่วนใหญ่จะเป็นการกำจัดค่าศักย์ไฟฟ้าออฟเซตจากอิเล็กทรอนิกส์ที่ทำการวัด

1.4 วงจร analog-to-digital converter (ADC) ทำหน้าที่แปลงสัญญาณแอนะล็อกให้เป็นสัญญาณดิจิทัลเพื่อให้ง่ายต่อการประมวลผลโดยตัวประมวลผลสัญญาณเชิงเลข (digital signal processor) ต่อไป

โดยงานวิจัยฉบับนี้ต้องการนำเสนอการออกแบบวงจรวัดสัญญาณส่วนหน้าสำหรับอุปกรณ์วัดสัญญาณคลื่นไฟฟ้าหัวใจที่ออกแบบโดยใช้เทคนิคการสับสัญญาณ (chopping) โดยมีฟังก์ชันของวงจร AAF รวมอยู่ในวงจรวัดสัญญาณส่วนหน้านี้ด้วย อันส่งผลให้ไม่จำเป็นต้องมีวงจร AAF เฉพาะเพิ่มเติม ซึ่งจะเป็นการลดขนาดและอัตราการใช้พลังงานของวงจรโดยรวม โดยการออกแบบนี้จะยังมุ่งเน้นให้วงจรวัดสัญญาณส่วนหน้ากินพลังงานต่ำและมีความสัญญาณรบกวนอ้างอิงไปที่อินพุตที่ต่ำด้วย

2. การออกแบบวงจรวัดสัญญาณส่วนหน้าสำหรับวัดสัญญาณคลื่นไฟฟ้าหัวใจที่ไม่จำเป็นต้องมีวงจร AAF

โดยวงจรที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ประกอบด้วย 2 ส่วนคือ i) วงจรขยายหลักและ ii) วงจรปรับแบนด์วิดท์ดังแสดงในภาพที่ 3



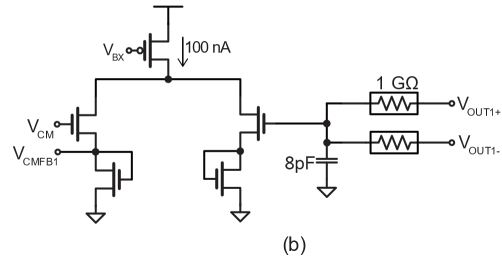
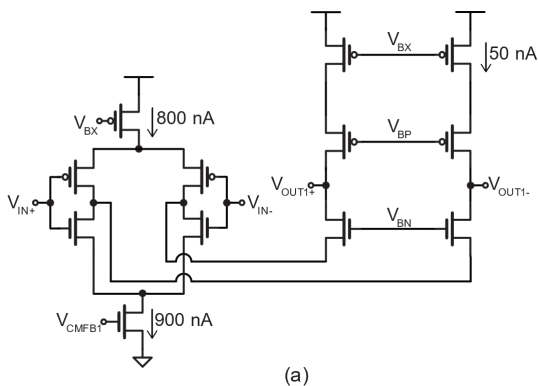
ภาพที่ 3 วงจรที่นำเสนอในงานวิจัยนี้

2.1 การออกแบบวงจรขยายหลัก

วงจรในภาพที่ 3 มีอัตราขยายในแบนด์ซึ่งถูกกำหนดโดยสัดส่วนระหว่างตัวเก็บประจุขาเข้า (C_{IN}) และตัวเก็บประจุป้อนกลับ (C_F) โดยวงจรขยายนี้ถูกออกแบบให้มีอัตราขยายเท่ากับ $C_{IN}/C_F = 20$ V/V โดยที่ C_{IN} และ C_F มีค่าเท่ากับ 5 pF และ 250 fF ตามลำดับ โดยเราใช้ความถี่การสับ (chopping frequency) เท่ากับ $f_{chop} = 10$ kHz หลังจากที่ได้ทำการออกแบบวงจรขยาย G_{m1} เพื่อให้มีความถี่หักมุมของสัญญาณรบกวนกระพริบ (flicker noise corner frequency) ที่มีค่าต่ำกว่า 10 kHz

2.1.1 การออกแบบวงจรขยาย G_{m1}

วงจรขยาย G_{m1} ถูกออกแบบโดยใช้วงจรขยายชนิด folded cascode ดังในภาพที่ 4 (a) วงจรขยายชนิดนี้มีจุดเด่นในความสัมพันธ์ของการควบคุมค่าทรานส์คอนดักแทนซ์โดยรวมของวงจร (g_m) และความต้านทานที่เอาต์พุต (output impedance) ทำให้สามารถออกแบบวงจรให้มีค่า g_m ที่สูงโดยที่ยังคงค่าความต้านทานที่เอาต์พุตให้สูงได้เช่นกัน



ภาพที่ 4 (a) วงจรขยาย G_{m1} (b) วงจรขยายแบบป้อนกลับโหมดร่วม (common-mode-feedback amplifier (CMFB)) สำหรับวงจรขยาย G_{m1}

นอกจากนี้คู่อินพุตดิฟเฟอเรนเชียล (input differential pair) ของวงจรขยาย G_{m1} ยังใช้เทคนิคการใช้กระแสซ้ำ (current reuse) เพื่อเพิ่มค่า g_m ของวงจรโดยใช้กระแสเท่าเดิม โดยกระแสโดยรวมที่ใช้ในวงจรขยาย G_{m1} มีค่าเท่ากับ 900 nA โดย 800 nA อยู่ในกิ่งของคู่อินพุตดิฟเฟอเรนเชียล และ 100 nA อยู่ในกิ่งเอาพุต โดยเอาพุตของวงจรขยาย G_{m1} จะต่อกับตัวเก็บประจุ C_{HP} และตัวต้านทาน R_X ซึ่งมีค่าเท่ากับ 8 pF และ 10 MΩ ตามลำดับ โดย C_{HP} และ R_X นี้ทำหน้าที่เป็นวงจรกรองผ่านสูง เพื่อกันไม่ให้ศักย์ไฟฟ้าออฟเซตที่เกิดจากวงจรขยาย G_{m1} ผ่านไปที่วงจรขยาย G_{m2} ได้ แต่สัญญาณจากอินพุตยังสามารถผ่านไปได้เนื่องจากที่จุดนี้สัญญาณจากอินพุตถูกย้ายมาที่ความถี่สับ (f_{chop}) แล้ว และเมื่อสัญญาณผ่านวงจรกรองผ่านสูงแล้วจะถูกย้ายกลับมาที่ความถี่เบสแบนด์จากการสับ (chopping) ที่หน้าวงจรขยาย G_{m2} (ที่ขั้วต่อทางซ้ายของตัวต้านทาน R_Y)

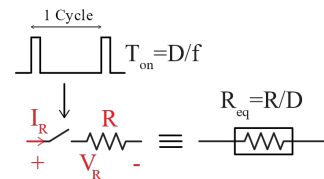
การกำหนดจุดทำงานโหมดร่วม (common mode) ที่เอาต์พุตของวงจรขยาย G_{m1} นั้นจะถูกกำหนดผ่านแรงดัน V_{CMFB1} โดยแรงดัน ณ โหนดนี้

จะถูกสร้างมาจากวงจรขยายแบบป้อนกลับโหมตร่วม (CMFB) ดังแสดงในภาพที่ 4(b) โดยวงจรนี้จะทำหน้าที่ปรับจุดทำงานโหมตร่วมที่เอาต์พุตของวงจรขยาย G_{m1} ให้มีค่าเท่ากับแรงดัน V_{CM} ที่ถูกตั้งค่าไว้ที่ครึ่งหนึ่งของไฟเลี้ยง (0.6 V) สำหรับการเลือกขนาดตัวต้านทานที่ใช้ในวงจร CMFB นั้นจะเลือกให้มีค่ามากกว่าค่าความต้านทานที่เอาต์พุตของ G_{m1} อย่างน้อย 20 เท่า เพื่อไม่เป็นการลดอัตราขยายแบบเปิดของวงจรขยาย G_{m1} ดังนั้นจึงเลือกใช้ค่าความต้านทานขนาด 1 G Ω โดยตัวต้านทานดังกล่าวนี้ถูกสร้างมาจากตัวต้านทานตั้งต้นขนาด 10 M Ω จากการใช้เทคนิค duty-cycle resistance (DCR) ในการเพิ่มขนาดตัวต้านทานให้มากขึ้นถึง 100 เท่า โดยหลักการของเทคนิค DCR นั้นจะใช้การเปิดสวิตช์ในช่วงเวลาสั้นๆ ในหนึ่งคาบ ซึ่งทำให้กระแสเฉลี่ยที่ไหลผ่านตัวต้านทานตั้งต้นนั้นมีค่าต่ำลงแบบสอดคล้องกับค่า duty ratio [10] ดังภาพที่ 5 โดยค่าตัวต้านทานสมมูลจะสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2)

$$R_{eq} = \frac{R}{D} \quad (2)$$

โดยตัวแปร R หมายถึงค่าความต้านทานตั้งต้นและ D หมายถึงค่า duty ratio ในการเปิดสวิตช์ โดยความถี่ที่ใช้ในการเปิดสวิตช์นั้นจะถูกเลือกจากแบนด์วิดท์ของสัญญาณที่ผ่าน R_{eq} โดยต้องเลือกความถี่ให้สูงกว่าอย่างน้อยสองเท่าของแบนด์วิดท์ของสัญญาณเพื่อป้องกันการเกิดการเคลือบแฝงของสัญญาณขึ้น เนื่องจากเทคนิค DCR เป็นเทคนิค

การชักตัวอย่าง และเนื่องจากสัญญาณที่เอาต์พุตของวงจรขยาย G_{m1} ซึ่งเป็นสัญญาณที่เข้าสู่วงจร CMFB ได้ถูกย้ายไปที่ความถี่ f_{chop} ซึ่งมีค่าเท่ากับ 10 kHz ดังนั้นความถี่ที่ใช้สำหรับควบคุมสวิตช์ DCR ตัวนี้จึงถูกเลือกให้มีค่าเท่ากับ 20 kHz และมีค่า duty ratio เท่ากับ 0.01 นอกจากนี้ยังใช้ตัวเก็บประจุขนาด 8 pF ที่ขาเกทของทรานซิสเตอร์ขาเข้าของวงจร เพื่อสร้างโพลหลักสำหรับการเพิ่มเสถียรภาพของวงจร CMFB



Duty-cycle Resistance

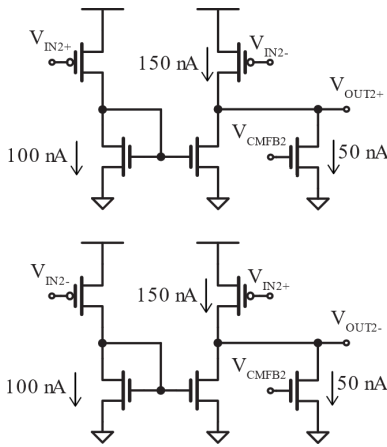
ภาพที่ 5 เทคนิค Duty-cycle Resistance (DCR)

2.1.2 การออกแบบวงจรขยาย G_{m2}

เนื่องจากวงจรขยาย G_{m2} ต้องทำหน้าที่ขับโหลดซึ่งประกอบด้วยตัวเก็บประจุ (C_{COM}) และความต้านทานประสิทธิผล (effective resistance) อันเกิดจากการสับตัวเก็บประจุ C_F การออกแบบวงจรขยาย G_{m2} จึงใช้รูปแบบวงจรแบบ Class AB ดังแสดงในภาพที่ 6 เพื่อให้สามารถขับโหลดได้ดีสำหรับการไบอัสกระแสให้กับวงจรขยาย G_{m2} จะถูกกำหนดผ่านศักย์ไฟฟ้า V_B ที่ต่อกับ R_X โดยกระแสที่ใช้ใน G_{m2} ทั้งหมดมีค่าเท่ากับ 500 nA

การกำหนดจุดทำงานแบบโหมตร่วมที่เอาต์พุตของวงจรขยาย G_{m2} ทำโดยผ่านวงจร CMFB ที่มีรูปแบบวงจรดังแสดงในภาพที่ 4(b) เช่นเดียวกับ

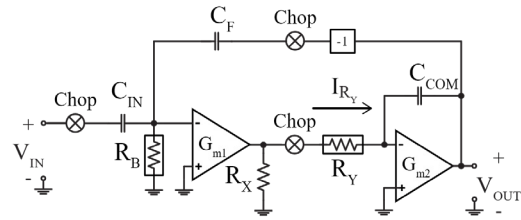
วงจร CMFB ของวงจรขยาย G_{m1} โดยตัวต้านทานที่ใช้ในวงจร CMFB สำหรับวงจรขยาย G_{m2} นั้นจะใช้เทคนิค DCR ในการเพิ่มค่าตัวต้านทานจากค่าตั้งต้น $5\text{ M}\Omega$ เป็น $500\text{ M}\Omega$ โดยสัญญาณที่ใช้ควบคุมการเปิดปิดสวิตช์ DCR จะใช้ค่าเดียวกับที่ใช้ในวงจร CMFB สำหรับวงจรขยาย G_{m1}



ภาพที่ 6 วงจรขยาย G_{m2}

2.2 การออกแบบวงจรปรับแบนด์วิดท์

การปรับแบนด์วิดท์ของวงจรวัดสัญญาณส่วนหน้านั้นใช้หลักการควบคุมปริมาณกระแสที่ไหลออกจากวงจรขยาย G_{m1} ไปสู่วงจรขยาย G_{m2} โดยสัดส่วนกระแสที่ไหลนั้นจะถูกกำหนดมาจากสัดส่วนระหว่าง R_X และ R_Y หากกำหนดให้สัญญาณจากวงจรขยาย G_{m1} ถูกย้ายไปที่ความถี่ f_{chop} ซึ่งสูงกว่า cutoff frequency ของวงจรกรองผ่านสูงที่สร้างจาก C_{HP} และ R_X นอกจากนี้ความต้านทานขาเข้าสู่วงจรปรับแบนด์วิดท์ยังมีค่าเป็น R_Y ถึงแม้จะมีกระบวนการสับสัญญาณที่หน้า R_Y ดังนั้นเราจะได้วงจรสมมูลของวงจรวัดสัญญาณส่วนหน้าเป็นดังภาพที่ 7



ภาพที่ 7 วงจรสมมูลของวงจรวัดสัญญาณส่วนหน้า

จากภาพที่ 7 เราสามารถเขียน cutoff frequency ของฟังก์ชันถ่ายโอน (transfer function) $V_{\text{OUT}}/V_{\text{IN}}$ ได้ดังสมการที่ (3)

$$f_{-3\text{dB}} = \frac{C_F}{(C_{\text{IN}} + C_F)} \times \frac{G_{m1}}{2\pi C_{\text{COM}}} \times \frac{R_X}{(R_X + R_Y)} \quad (3)$$

โดยเราจะเห็นได้จากสมการที่ (3) ว่า $f_{-3\text{dB}}$ ของวงจรจะมีค่าขึ้นอยู่กับอัตราส่วนระหว่าง R_X และ $R_X + R_Y$ ด้วย ซึ่งเราสามารถปรับอัตราส่วน $R_X / (R_X + R_Y)$ เพื่อเป็นการปรับลด $f_{-3\text{dB}}$ ลงจากค่าตั้งต้น (กรณี $R_Y = 0$) ซึ่งเราสามารถใช้การปรับค่าของ R_Y ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ในการปรับแบนด์วิดท์ของวงจรแทนที่จะเป็นการปรับค่าของ G_{m1} โดยข้อดีของวิธีนี้คือการปรับค่า R_Y ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์จะไม่เป็นการเพิ่มพื้นที่ของวงจร เช่นการปรับค่าของตัวเก็บประจุ C_{COM} ของวงจรในภาพที่ 2 และการปรับค่าของ R_Y จะไม่กระทบกับค่าของ G_{m1} ซึ่งมีผลกระทบต่อสัญญาณรบกวนอ้างอิงไปที่อินพุตของวงจรมากกว่า

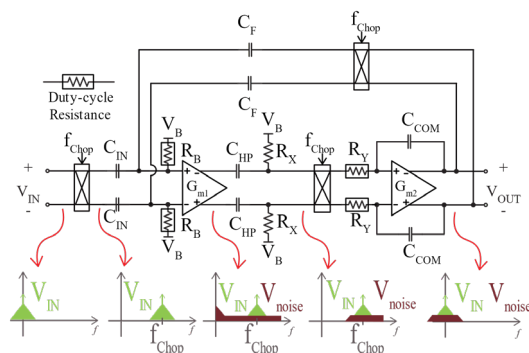
ในการสร้างตัวต้านทาน R_Y นั้นเราใช้เทคนิค DCR ในการเพิ่มค่าความต้านทานเช่นกัน โดยค่าตั้งต้นของ R_Y นั้นมีค่าเท่ากับ $500\text{ k}\Omega$ โดยความถี่ที่ใช้สำหรับควบคุมการเปิดปิดสวิตช์ DCR นั้นจะใช้ค่า

เท่ากับ 20 kHz ส่วนการปรับค่าของ R_Y เรากระทำโดยการปรับ duty ratio ของสัญญาณที่ควบคุม R_Y ซึ่งเป็นสัญญาณที่ถูกสร้างจากภายนอกชิปด้วยบอร์ด FPGA

2.3 การวิเคราะห์สัญญาณรบกวน

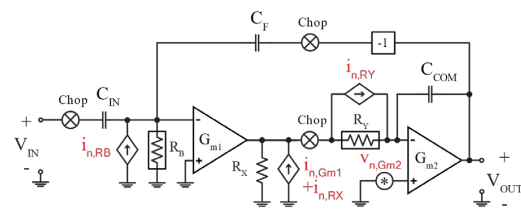
ถึงแม้การปรับค่า R_Y เพื่อปรับแบนด์วิดท์ของวงจรจะไม่กระทบต่อสัญญาณรบกวนที่อ้างอิงไปที่อินพุตเท่ากับการปรับค่า G_{m1} แต่ก็มีผลกระทบอยู่บ้าง ดังนั้น ในหัวข้อนี้เราจะทำการวิเคราะห์สัญญาณรบกวนของวงจรวัดสัญญาณส่วนหน้าโดยรวมเพื่อศึกษาว่าวิธีในการปรับแบนด์วิดท์ที่เสนอมีผลกระทบต่อสัญญาณรบกวนอ้างอิงไปที่อินพุตอย่างไร

ในการพิจารณาสัญญาณรบกวนที่จะกระทบต่อคุณภาพของสัญญาณคลื่นไฟฟ้าหัวใจ (V_{IN}) เราจำเป็นต้องทราบว่าในแต่ละตำแหน่งของวงจรวัดสัญญาณส่วนหน้านั้น สัญญาณคลื่นไฟฟ้าหัวใจอยู่ในช่วงความถี่ใด โดยภาพที่ 8 แสดงความถี่ของสัญญาณคลื่นไฟฟ้าหัวใจในแต่ละตำแหน่งของวงจรวัดสัญญาณส่วนหน้า



ภาพที่ 8 แสดงความถี่ของสัญญาณคลื่นไฟฟ้าหัวใจในแต่ละตำแหน่งของวงจรวัดสัญญาณส่วนหน้า

หากพิจารณาสัญญาณที่บริเวณเอาต์พุตของวงจรขยาย G_{m1} ซึ่งสัญญาณถูกย้ายไปที่ความถี่ f_{chop} แล้ว สัญญาณรบกวนที่มีย่านความถี่เดียวกันกับสัญญาณคลื่นไฟฟ้าหัวใจจะเป็นสัญญาณรบกวนความร้อนอันเกิดจาก R_B , G_{m1} และ R_X และหลังจากสัญญาณคลื่นไฟฟ้าหัวใจถูกย้ายมาที่ความถี่เบสแบนด์ก่อนจะเข้าสู่วงจรขยาย G_{m2} (บริเวณจุดต่อทางซ้ายของตัวต้านทาน R_Y) สัญญาณรบกวนเพิ่มเติมที่จะรบกวนสัญญาณคลื่นไฟฟ้าหัวใจนั้นจะเป็นสัญญาณรบกวนที่เบสแบนด์ของจากทั้ง R_Y และวงจรขยาย G_{m2} โดยสัญญาณรบกวนจาก R_Y จะเป็นสัญญาณรบกวนความร้อนเป็นหลัก ในขณะที่สัญญาณรบกวนจาก G_{m2} จะเป็นทั้งสัญญาณรบกวนกระพริบและสัญญาณรบกวนความร้อน อย่างไรก็ตาม เนื่องจากสัญญาณคลื่นไฟฟ้าหัวใจได้ถูกขยายมาด้วยอัตราขยายที่สูงของวงจรขยาย G_{m1} สัญญาณรบกวนจาก R_Y และ G_{m2} จะไม่ทำคุณภาพของสัญญาณคลื่นไฟฟ้าหัวใจแย่งลงมากนัก เราสามารถสรุปผลของสัญญาณรบกวนจากแหล่งต่าง ๆ ที่กล่าวมาข้างต้นด้วยวงจรสมมูลดังภาพที่ 9



ภาพที่ 9 วงจรสมมูลแสดงสัญญาณรบกวน

จากภาพที่ 9 เราสามารถเขียนสมการสัญญาณรบกวนที่ส่งผลไปที่อินพุตของวงจรได้ดังสมการที่ (4)

$$v_{n,in}^2 = \left(\frac{C_{IN} + C_F}{C_{IN} G_{m1}} \right)^2 \left[i_{n,Gm1}^2 + 2 \left(\frac{1}{R_X} \right)^2 v_{n,RX}^2 + 2 i_{n,RX}^2 + \left(\frac{1}{R_X + R_Y} \left(\frac{R_X G_{m2}}{R_X + R_Y} \left(\frac{1}{SC_{COM}} \right) \right) \right)^2 i_{n,Gm2}^2 + 2 \left(\frac{G_{m1}}{2f_{chop} (C_{IN} + C_F)} \right)^2 i_{n,RB}^2 \right] \quad (4)$$

โดยที่ $v_{n,RX}^2 = i_{n,RX}^2 R_Y^2$ และ $i_{n,Gm2}^2 = G_{m2}^2 V_{n,Gm2}^2$ ซึ่งสมการที่ (4) แสดงให้เห็นว่าสัญญาณรบกวนจากวงจรขยาย G_{m2} (พจน์ $i_{n,Gm2}^2$) จะไม่เปลี่ยนแปลงตามการปรับแบนด์วิดท์เฉพาะในช่วงความถี่ดังสมการที่ (5)

$$f < \frac{1}{2\pi(R_X + R_Y)C_{COM}} \quad (5)$$

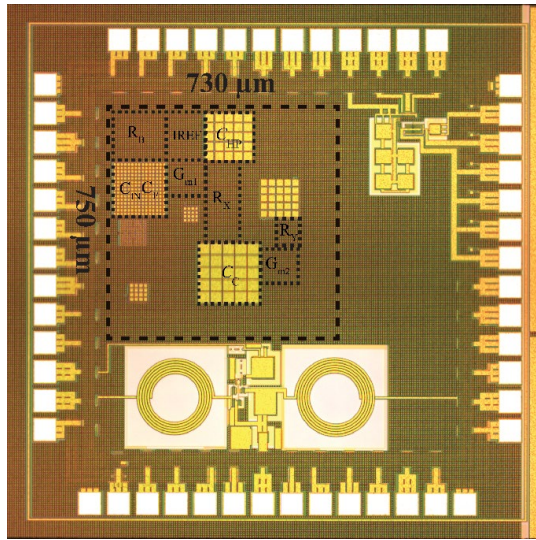
และจากสมการที่ (5) ถ้าเรากำหนดให้ C_{COM} เท่ากับ 15 pF, R_X เท่ากับ 10 MΩ และต้องการปรับแบนด์วิดท์ลงประมาณ 10 เท่าจากค่าตั้งต้น โดยทำให้ R_Y มีค่าประมาณ 100 MΩ จากค่าที่กำหนดข้างต้น จะทำให้สัญญาณรบกวนจากวงจรขยาย G_{m2} เริ่มมีค่าเพิ่มขึ้นที่ความถี่ 96 Hz นอกจากนี้การปรับแบนด์วิดท์ให้ลดลงยังส่งผลต่อสัญญาณรบกวนจาก R_Y ที่มีค่าเพิ่มขึ้น โดยสามารถเขียนสมการสัญญาณรบกวนของ R_Y ที่ส่งผลไปที่อินพุตของวงจรได้ดังสมการที่ (6)

$$v_{n,in,RX}^2 = \left(\frac{C_F + C_{IN}}{C_{IN} G_{m1}} \right)^2 \left(\frac{1}{R_X} \right)^2 2v_{n,RX}^2 \quad (6)$$

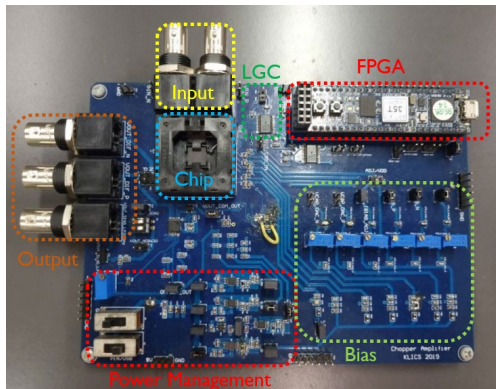
3. การวัดผลการออกแบบวงจร



วงจรไมโครชิปที่ออกแบบในงานวิจัยนี้ได้ถูกผลิตในเทคโนโลยี 180 nm CMOS จาก United Microelectronics Corp. (UMC) โดยภาพถ่ายของชิปเป็นดังแสดงในภาพที่ 9 โดยวงจรกินพื้นที่ทั้งหมดเท่ากับ 0.55 mm² ภาพที่ 10 แสดงแผงวงจรพิมพ์ (printed circuit board) สำหรับการทดสอบชิปที่ถูกผลิตมา โดยบนแผงวงจรพิมพ์มีการใช้ FPGA รุ่น Cmod A7-35T ในการสร้างสัญญาณนาฬิกาสำหรับการสับสัญญาณ และสัญญาณควบคุมสำหรับตัวต้านทานบนชิปที่ใช้เทคนิค DCR ทั้งหมด และจากการทำงานที่แรงดันซัพพลาย 1.2 V วงจรมีการกินกระแสเท่ากับ 1.96 μA



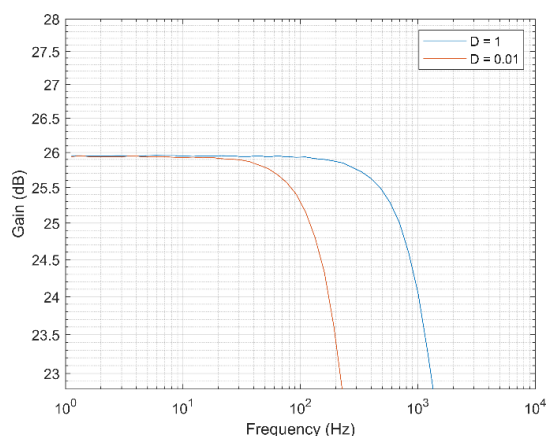
ภาพที่ 9 ภาพถ่ายไมโครชิป (Microchip)



ภาพที่ 10 บอร์ดสำหรับวัดผล

3.1 ผลการวัดการปรับแบนด์วิดท์

สำหรับการวัดผลการปรับแบนด์วิดท์ของวงจร ขยายส่วนหน้าสุดในงานวิจัยนี้จะใช้การวัดฟังก์ชันถ่ายโอนจากอินพุตสู่เอาต์พุตด้วย Network Analyzer ที่อยู่ในอุปกรณ์ Analog Discovery 2 โดยจะทำการวัดเทียบกัน 2 กรณีคือ duty ratio ของ R_Y เท่ากับ 1 และ 0.01 ซึ่งส่งผลให้ได้ cutoff frequency เท่ากับ 1.3 kHz และ 200 Hz ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 11

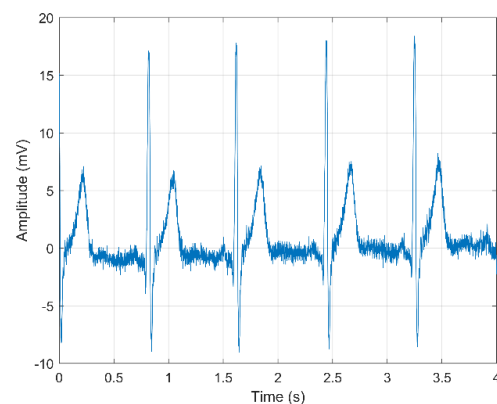


ภาพที่ 11 ผลการวัด Signal Transfer Function ของวงจรขยายส่วนหน้าสุด

ดังนั้นจะเห็นได้ว่าการใช้ duty ratio ของ R_Y เท่ากับ 0.01 จะส่งผลให้วงจรวัดสัญญาณส่วนหน้ามีแบนด์วิดท์ที่ใกล้เคียงกับแบนด์วิดท์ที่ต้องการสำหรับการวัดคลื่นไฟฟ้าหัวใจโดยไม่ต้องลดขนาดของ G_{m1} หรือเพิ่มขนาดของ C_{COM}

3.2 ผลการวัดสัญญาณ ECG

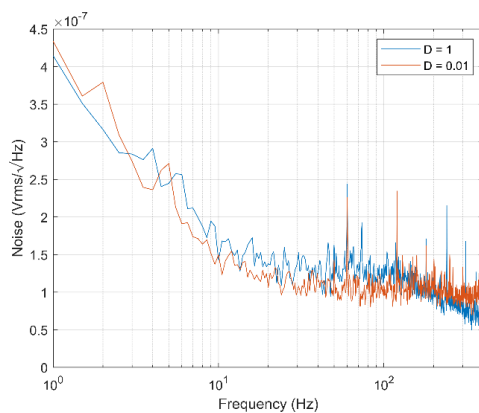
สำหรับการวัดสัญญาณคลื่นไฟฟ้าหัวใจจากร่างกายนั้นจะเป็นการวัดสัญญาณคลื่นไฟฟ้าหัวใจแบบ 1 lead โดยอิเล็กโทรดแรกจะแปะที่แขนขวา สำหรับอินพุตด้านบวก อิเล็กโทรดที่สองแปะที่แขนซ้ายสำหรับอินพุตด้านลบและอิเล็กโทรดที่สามแปะที่ขาขวาสำหรับต่อกราวด์ของวงจร โดยประเภทอิเล็กโทรดที่ใช้ทั้งสามนั้นจะเป็นอิเล็กโทรดแบบเปียก (Monitoring Electrode 2239, 3M Ltd.) และปรับ duty ratio ของ R_Y เท่ากับ 0.01 เพื่อให้ได้แบนด์วิดท์ของวงจรขยายส่วนหน้าสุดเท่ากับ 200 Hz จากนั้นวัดสัญญาณด้วยออสซิลโลสโคปจากอุปกรณ์ Analog Discovery 2 โดยผลที่ได้จากการวัดเป็นดังแสดงในภาพที่ 12



ภาพที่ 12 ผลการวัดสัญญาณคลื่นไฟฟ้าหัวใจที่วัดได้จากร่างกายด้วยวงจรขยายส่วนหน้าสุด

3.3 ผลการวัดสัญญาณรบกวน

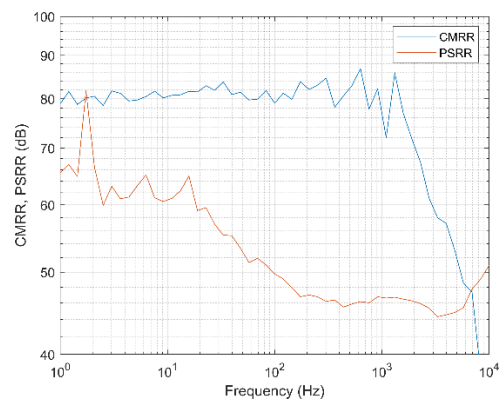
สำหรับการวัดสัญญาณรบกวนจากวงจรขยาย ส่วนหน้าสุดนั้นจะทำการไบอัสอินพุตของวงจรด้วย แรงดันโหมตรวมที่มีค่าเท่ากับ 0.6 V จากนั้นวัด สัญญาณรบกวนที่เอาต์พุตของวงจรด้วยเครื่องมือ วิเคราะห์สเปกตรัม (spectrum analyzer, รุ่น SR780 โดย Stanford Research Systems) โดยจะทำการ วัดเทียบกับ 2 กรณีคือ duty ratio ของ R_Y เท่ากับ 1 และ 0.01 โดยจะได้ cutoff frequency เท่ากับ 1.3 kHz และ 200 Hz ตามลำดับ จากผลการวัดดัง ที่แสดงในภาพที่ 13 สามารถวัดสัญญาณรบกวน อ้างอิงไปที่อินพุตในช่วงความถี่ 1-250 Hz ได้กับ $1.54 \mu V_{rms}$ และ $1.60 \mu V_{rms}$ ตามลำดับ



ภาพที่ 13 ผลการวัด Input Referred Noise ของวงจรขยายส่วนหน้าสุด

3.4 ผลการวัด PSRR และ CMRR

สำหรับการวัดผล power-supply rejection ratio (PSRR) และ common-mode rejection ratio (CMRR) ของวงจรวัดสัญญาณส่วนหน้าสุดใน งานวิจัยนี้จะวัดด้วย Network Analyzer ที่อยู่ใน อุปกรณ์ Analog Discovery 2 โดยจะทำการวัดที่ duty ratio ของ R_Y เท่ากับ 0.01 โดยได้ผลการวัด ดังแสดงในภาพที่ 14



ภาพที่ 14 ผลการวัด CMRR และ PSRR ของ วงจรขยายส่วนหน้าสุด

4. บทสรุป

จากการวัดผลการออกแบบวงจรวัดสัญญาณ ส่วนหน้าสำหรับวัดสัญญาณคลื่นไฟฟ้าหัวใจในงาน วิจัยนี้สามารถปรับ cutoff frequency ได้ระหว่าง 1.3 kHz และต่ำสุดเท่ากับ 200 Hz ซึ่งต่ำเพียงพอที่ จะไม่ต้องการวงจร AAF โดยอิงจากแบนด์วิดท์ของ

การวัดสัญญาณคลื่นไฟฟ้าหัวใจที่ต้องการ cutoff frequency เท่ากับ 150 Hz [14] โดยผลการปรับ cutoff frequency นั้นทำให้สัญญาณรบกวนอ้างอิงไปที่อินพุตเพิ่มขึ้นจาก $1.54 \mu V_{rms}$ ไปเป็น $1.60 \mu V_{rms}$ โดยจะเห็นได้ว่าสัญญาณรบกวนที่เพิ่มขึ้นนี้ยังอยู่ในขอบเขตที่ระบุในมาตรฐาน [8] ซึ่งมีค่า

เท่ากับ $10.67 \mu V_{rms}$ โดยวงจรวัดสัญญาณส่วนหน้านี้ใช้แรงดันซัพพลาย 1.2 V และมีอัตราการกินพลังงานอยู่ที่ $2.32 \mu W$ มีอัตราขยาย 20 V/V และได้นำผลการออกแบบวงจรในงานวิจัยนี้เปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ใกล้เคียงดังที่แสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

	(Fan et al., 2011)	(S. Song, 2015)	(W. Bai, 2018)	(Liu et al., 2020)	This Work
Power (μW)	1.8	$1.17^b, 0.3^c$	1.5	1.8	2.32
Supply voltage	1	$0.3^d, 0.6^e$	1.8	1.2	1.2
Gain	100	20	20	100	20
Input-referred noise (μV_{rms})	1.45^g (0.5-100 Hz)	$0.34^b, 1.01^c$ (0.7-182 Hz)	3.4 (1-500 Hz)	0.67 (0.5-200 Hz)	$1.60^i, 1.54^j$ (1-250 Hz)
NEF	3.3	1.74	7.16	2.88	6.05
Anti-aliasing filter	No	Yes	Yes	Yes	No
BW _{-3dB}	0.5-600 Hz	0.7-182 Hz	1-500 Hz	0.5-200 Hz	0-200 Hz ⁱ 0-1.3 kHz ^j
Input-impedance	30 M Ω	300 M Ω	300 M Ω	1 G Ω	7.6 M Ω
f_{chop}	5 kHz	4 kHz ^b , 400 Hz ^c	23.44 kHz	10 kHz	10 kHz
Area (mm ²)	0.1 ^g	1.6 ^g	0.24 ^h	0.2 ^g	0.55 ^g
Technology	65 nm	180 nm	180 nm	180 nm	180 nm

^a ไม่รวมวงจร DC Servo Loop (DSL), ^b โหมดสัญญาณรบกวนต่ำ, ^c โหมดพลังงานต่ำ, ^d อินพุตสแตจ, ^e เอาพุตสแตจ, ^f เอาพุตสแตจ, ^g เฉพาะวงจร AFE, ^h รวมทั้งระบบ, ⁱ แบนด์วิดท์ต่ำสุด, ^j แบนด์วิดท์สูงสุด

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากทุนพัฒนานักวิจัย (ทุนรุ่นกลาง) สำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ภายใต้รหัสโครงการ N41A640139

6. เอกสารอ้างอิง

[1] แสงทอง จ. (2017). สังคมผู้สูงอายุ (อย่างสมบูรณ์): ภาวะสูงวัยอย่างมีคุณภาพ. RUSAMILAE JOURNAL, 38(1), 6–28.

- [2] The World Health Organization (2021). Cardiovascular Diseases (CVDs). [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/cardiovascular-diseases-\(cvds\)](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/cardiovascular-diseases-(cvds)). Jun. 2021
- [3] Abramson J H, Gofin R, Hopp C, Gofin J, Donchin M, and Habib J (1981). Evaluation of a community program for the control of cardiovascular risk factors: the CHAD program in Jerusalem. *Israel journal of medical sciences*, 17(2-3): 201–212.
- [4] Censi F, Calcagnini G, Mattei E, Gargaro A, Biancalana G, and Capucci A (2013). Simulation of monitoring strategies for atrial arrhythmia detection. *Annali dell'Istituto superiore di sanita*, 49(2): 176–182.
- [5] Bansal A, and Joshi R (2018). Portable out-of-hospital electrocardiography: A review of current technologies. *Journal of arrhythmia*, 34(2): 129–138.
- [6] Mohebbali D, and Kittleson M M (2021). Remote monitoring in heart failure: current and emerging technologies in the context of the pandemic. *Heart (British Cardiac Society)*, 107(5): 366–372.
- [7] Prieto-Avalos G, Cruz-Ramos N A, Alor-Hernández G, Sánchez-Cervantes J L, Rodríguez-Mazahua L, and Guarneros-Nolasco L R (2022). Wearable Devices for Physical Monitoring of Heart: A Review. *Biosensors*, 12(5): 292.
- [8] ANSI/AAMI EC11 (2001). Diagnostic Electrocardiographic Devices.
- [9] Fan Q, Sebastiano F, Huijsing J H, and Makinwa K A (2011). A 1.8- μ W 60 nV/VHz capacitively-coupled chopper instrumentation amplifier in 65-nm CMOS for wireless sensor nodes. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 46: 1534-1543.
- [10] Chandrakumar, Hariprasad & Markovic, Dejan (2017). A High Dynamic-Range Neural Recording Chopper Amplifier for Simultaneous Neural Recording and Stimulation. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*. PP. 1-12. 10.1109/JSSC.2016.2645611.
- [11] Bai, Wenbin & Zhu, Zhangming & Li, Yani & Liu, Lianxi. (2018). A 64.8 μ W > 2.2G Ω DC-AC Configurable CMOS Front-End IC for Wearable ECG Monitoring. *IEEE Sensors Journal*. PP. 1-1. 10.1109/JSEN.2018.2809678.
- [12] Liu, Lianxi & Hua, Tianyuan & Zhang, Yi & Junchao, Mu & Zhu, Zhangming. (2019). A Robust Bio-IA with Digitally-Controlled DC-Servo Loop and Improved Pseudo-Resistor. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*. PP. 1-1. 10.1109/

TCSII.2019.2922423.

[13] Song, Shuang & Rooijakkers, Michael & Harpe, Pieter & Rabotti, Chiara & Mischi, Massimo & Roermund, Arthur & Cantatore, E.. (2015). A Low-Voltage Chopper-Stabilized Amplifier for Fetal ECG Monitoring With a 1.41 Power Efficiency Factor. IEEE

transactions on biomedical circuits and systems. 9. 10.1109/TBCAS.2015.2417124.

[14] Rijnbeek, Peter & Kors, Jan & Witsenburg, Maarten. (2002). Minimum Bandwidth Requirements for Recording of Pediatric Electrocardiograms. Circulation. 104. 3087-90. 10.1161/hc5001.101063.

การประเมินเศรษฐศาสตร์ของการผลิตน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพเชิงพาณิชย์จากน้ำมันพืช

Economic assessment of commercial bio-lubricant production from vegetable oils

เนติพล สกลชาห์¹ พรปวีณ์ พหลพลญาณ¹ แพรวา มณี¹ กฤษฎ์พรปวีณ์ พินดิษฐ์² ณัฏพล เจียรสำราญ¹
เมธี สายศรีหยุด¹ อนุสิทธิ์ ธนะพิมพ์เมธา¹ และ เพ็ญจิตร ศรีนพคุณ^{1, 2*}

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์¹

ศูนย์ความเป็นเลิศทางวิชาการด้านสบูดำ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์²

E-mail: netipon.sa@ku.th, pornpaweerwb@gmail.com, parewa.manee.pare@gmail.com,
kritpornpawee.pi@gmail.com, fengnpc@ku.ac.th, fengmts@ku.ac.th, fengjrc@gmail.com,
fengpjs@ku.ac.th

* ผู้ประพันธ์บรรณกิจ (corresponding author)



บทคัดย่อ

น้ำมันหล่อลื่นเป็นผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียมที่มีความสำคัญต่อการผลิตในอุตสาหกรรมทุกประเภท งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพจากน้ำมันพืชเพื่อใช้ทดแทนน้ำมันหล่อลื่นจากปิโตรเลียม โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อจำลองกระบวนการผลิตน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพจากน้ำมันถั่วเหลืองและไขปาล์มด้วยโปรแกรม ASPEN Plus และประเมินความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์ โดยขั้นตอนในการผลิตน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพประกอบด้วย การเปลี่ยนไตรกลีเซอไรด์ให้เป็นกรดไขมันอิสระ การเพิ่มความเข้มข้นของกรดไขมันไม่อิ่มตัว และการดัดแปลงโครงสร้างของกรดไขมันไม่อิ่มตัวให้เป็นสารเอสเทอร์หรือน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพ จากนั้นทำการประเมินเศรษฐศาสตร์ของกระบวนการผลิตที่ออกแบบผลจากการศึกษา พบว่าถ้าใช้น้ำมันถั่วเหลือง 918 กิโลกรัม/ชั่วโมง และไขปาล์ม 696 กิโลกรัม/ชั่วโมง จะได้น้ำมันหล่อลื่นชีวภาพ หรือ 2-เอทิลเฮกซิลเอสเทอร์ 1,814 กิโลกรัม/ชั่วโมง และจากการคำนวณความสามารถในการทำกำไรจะได้ มูลค่าปัจจุบันสุทธิ เท่ากับ 12.60 บาท อัตราผลตอบแทนภายในร้อยละ 15.24 และมีระยะเวลาคืนทุนที่ 4 ปี 3 เดือน



คำสำคัญ: น้ำมันหล่อลื่นชีวภาพ; น้ำมันถั่วเหลือง; ไขปาล์ม; การประเมินทางเศรษฐศาสตร์



Abstract

Lubricants are essential petroleum products in any industrial production. Therefore, the possibility of bio-lubricant production from vegetable oil to replace petroleum lubricants was studied. The objectives were to construct a process model of the bio-lubricant production from soybean oil and palm fatty acid distillate using the ASPEN Plus

program. Then the economic feasibility of the proposed process was assessed. The bio-lubricant production process comprised converting triglyceride to free fatty acid, concentrating unsaturated fatty acid, and molecular modifying of unsaturated fatty acid to ester or bio-lubricant. The economic assessment showed that if 918 kg/hr of soybean oil and 696 kg/hr of palm fatty acid distillate were used as raw material, 1814 kg/hr of bio-lubricant or 2-ethylhexyl ester was produced. According to the profitability calculation, the net present value (NPV) was 12.60 Baht, the internal rate of return (IRR) was 15.24%, and the pay-back period was 4 years within 3 months.

Keywords: Bio-lubricant; Soybean oil; Palm fatty acid distillate; Economic feasibility

1. บทนำ

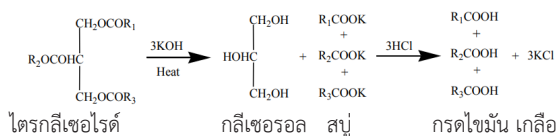
น้ำมันหล่อลื่นเป็นผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียมที่มีความสำคัญและใช้กันอย่างแพร่หลาย มีหน้าที่เป็นสารหล่อลื่นบริเวณผิวสัมผัสของชิ้นส่วนโลหะและของเครื่องยนต์ เพื่อลดการสึกหรอที่เกิดจากแรงเสียดทาน ช่วยระบายความร้อนที่เกิดจากการเสียดสีกันระหว่างโลหะ และช่วยเพิ่มประสิทธิภาพให้กับเครื่องยนต์ ซึ่งกระบวนการผลิต การใช้งาน และกระบวนการกำจัดน้ำมันหล่อลื่นที่ได้จากปิโตรเลียมนั้นล้วนส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม งานวิจัยนี้จึงได้มีแนวคิดในการผลิตน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพจากน้ำมันพืชซึ่งเป็นวัตถุดิบที่ได้จากธรรมชาติ เช่น น้ำมันถั่วเหลือง และน้ำมันปาล์ม จึงสามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติและไม่ทำให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้ยังผลิตจากวัตถุดิบน้ำมันพืชภายในประเทศ [1, 2]

งานวิจัยนี้สร้างแบบจำลองกระบวนการผลิตน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพ จากน้ำมันถั่วเหลือง และไขปาล์ม (Palm fatty acid distillate) ซึ่งได้จากการกลั่นน้ำมันปาล์มดิบ การศึกษาใช้ข้อมูลทฤษฎีภูมิของการผลิตน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพ ซึ่งประกอบด้วย 3 ขั้นตอน ดังนี้ 1) การเปลี่ยนไตรกลีเซอไรด์ให้เป็นกรดไขมันอิสระด้วยปฏิกิริยาสะaponนิฟิเคชัน และปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส 2) การแยกกรดไขมันอิ่มตัวออกไป และ 3) การดัดแปลงโครงสร้างของกรดไขมันไม่อิ่มตัว โดยปฏิกิริยาอีพอกซิเดชัน ปฏิกิริยาการเปิดวงอีพอกไซด์ (Epoxide ring opening reaction) และปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชัน จากนั้นศึกษาความเป็นไปได้เชิงเศรษฐศาสตร์ของกระบวนการผลิตน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพที่ออกแบบ วิเคราะห์ต้นทุน พิจารณามูลค่าปัจจุบันสุทธิ อัตราผลตอบแทนภายใน และระยะเวลาคืนทุน

2. การผลิตน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพจากน้ำมันถั่วเหลืองและไฮปาล์ม

2.1 การเปลี่ยนไตรกลีเซอไรด์ให้ได้กรดไขมันอิสระ

การเปลี่ยนไตรกลีเซอไรด์ให้ได้กรดไขมันอิสระโดยการทำปฏิกิริยา 2 ครั้ง ๆ แรกใช้ปฏิกิริยาสะปอนนิฟิเคชันน้ำมันถั่วเหลืองกับโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์จะได้สบู่ และครั้งที่สองทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสสบู่ที่ได้ด้วยกรดแก่ ซัลฟิวริก ได้เป็นกรดไขมันอิสระ (ภาพที่ 1) การเปลี่ยนไตรกลีเซอไรด์ให้เป็นกรดไขมันอิสระนี้มีหลายวิธีแต่วิธีนี้มีข้อดีที่ชัดเจนคือ เกิดปฏิกิริยาย้อนกลับน้อย และสามารถแยกกรดไขมันอิสระออกมาได้ง่าย [4, 5]



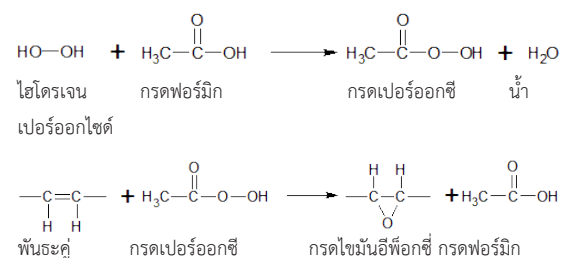
ภาพที่ 1 ปฏิกิริยาสะปอนนิฟิเคชันและไฮโดรไลซิส

2.2 การแยกกรดไขมันอิ่มตัว

การแยกกรดไขมันอิ่มตัวทำโดยการตกผลึกด้วยยูเรีย เป็นกระบวนการทั่วไปในการทำสารเคมีอินทรีย์ที่เป็นของแข็งให้บริสุทธิ์ [4] สามารถทำได้โดยละลายยูเรียและกรดไขมันอิสระที่ได้จากขั้นตอนแรกด้วยสารตัวทำละลาย จากนั้นลดอุณหภูมิลงจนเกิดการตกผลึกใหม่ของกรดไขมันอิ่มตัวและยูเรียจะมีสถานะเป็นของแข็ง แล้วกรองยูเรียและกรดไขมันอิ่มตัวออกไป [4, 5]

2.3 การดัดแปลงโครงสร้างของกรดไขมันไม่อิ่มตัว

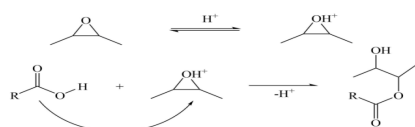
นำกรดไขมันไม่อิ่มตัวที่อยู่ในส่วนของเหลวจากขั้นตอนที่แล้วนำมาดัดแปลงโครงสร้างโดยปฏิกิริยาอีก 3 ปฏิกิริยา ได้แก่ ปฏิกิริยาอีพอกซิเดชัน ปฏิกิริยาการเปิดวงอีพอกไซด์ และปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน โดย 1) ปฏิกิริยาอีพอกซิเดชัน เป็นปฏิกิริยาเคมีที่เปลี่ยนพันธะคู่ของคาร์บอน-คาร์บอน (C – C) เป็นออกซิเรน (C – O – C โดยใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และกรดฟอร์มิคเพื่อทำให้ได้กรดเปอร์ออกซีก่อน แล้วนำกรดเปอร์ออกซีนี้นำไปทำปฏิกิริยากับกรดไขมันไม่อิ่มตัว จะได้กรดไขมันอีพอกซี (Epoxy fatty acid) ซึ่งมีหมู่ออกซิเรนในโมเลกุล และกรดฟอร์มิค กลับคืนมาดังภาพที่ 2 ซึ่งกรดฟอร์มิคสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ กระบวนการอีพอกซิเดชันนี้จะช่วยปรับปรุงคุณสมบัติในด้านความต้านทานการเกิดออกซิเดชัน (Oxidation stability) ของน้ำมัน เพิ่มความหนืด และอุณหภูมิของจุดวาบไฟ [4, 5]



ภาพที่ 2 กลไกการเกิดปฏิกิริยาอีพอกซิเดชันบนพันธะคู่ของกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัว [5]

2) ปฏิกิริยาการเปิดวงอีพอกไซด์ จะเกิดขึ้นบริเวณแขนของพันธะคาร์บอน-ออกซิเจน (C – O) ข้างใด

ข้างหนึ่งของหมู่ออกซิเรนบนโมเลกุลของกรดไขมัน อีพอกซีที่ได้จากปฏิกิริยาอีพอกซีเคชันของกรดไขมัน ไม่อิ่มตัว โดยมีกรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เมื่อเสร็จสิ้น ปฏิกิริยาที่ตำแหน่งของหมู่ออกซิเรนจะเกิดการเปลี่ยนแปลงโดยแขนข้างหนึ่งของพันธะจะกลายเป็นหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) และอีกข้างหนึ่งจะเกิดเป็นพันธะเอสเทอร์ (R-COO-R') หรือเรียกผลิตภัณฑ์ที่ได้ว่า สารประกอบไฮดรอกซีเอสเทอร์ (Hydroxy ester compounds) [4, 5]



ภาพที่ 3 ปฏิกิริยาการเปิดวงออกซิเรนด้วยกรดไขมัน อีเธอร์โดยมีกรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา [4]

3) ปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันของกรดไขมันและ แอลกอฮอล์ โดยมีกรดซัลฟิวริกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 ปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชัน [5]

3. การวิเคราะห์ การประมาณต้นทุน ความสามารถในการทำกำไรของการลงทุน

การวิเคราะห์ และการประมาณต้นทุน เป็นสิ่งจำเป็นที่สำคัญในการตัดสินใจของผู้ประกอบการ ก่อนที่จะดำเนินการซื้อและติดตั้งเครื่องจักรต่าง ๆ

รวมไปถึงการจัดหาที่ดิน สิ่งอำนวยความสะดวกในการผลิต อีกทั้งการวางท่อ การควบคุม การติดตั้งเครื่องจักรและอื่น ๆ ทั้งหมด นอกจากนี้ยังต้องมีเงินทุนเพื่อชำระค่าใช้จ่ายที่เกี่ยวข้องกับการดำเนินงานของโรงงานก่อนที่จะมีรายได้จากการขาย

เงินทุนที่จำเป็นในการจัดหาสิ่งอำนวยความสะดวกในการผลิตและสิ่งอำนวยความสะดวกในโรงงานเรียกว่าเงินลงทุนแบบคงที่หรือเงินลงทุนในสินทรัพย์ถาวร (Fixed Capital Investment; FCI) โดยต้นทุนที่ใช้ไปทั้งหมดของการลงทุนในสินทรัพย์ถาวรจะทยอยคืนในรูปค่าเสื่อมราคารายปีจนหมดตามอายุการใช้งาน ซึ่งการลงทุนในสินทรัพย์ถาวรจะประกอบด้วย ต้นทุนทางตรง (Direct Cost; D) หรือ เงินลงทุนคงที่ในส่วนของการกระบวนการผลิต หมายถึง ต้นทุนที่สามารถคำนวณแยกออกมาได้ว่ามีจำนวนเท่าไรในการผลิตสินค้าแต่ละหน่วย ต้นทุนทางอ้อม (Indirect Cost; I) หรือ เงินลงทุนคงที่ในส่วนอื่นๆของโรงงาน ซึ่งหมายถึงต้นทุนที่ไม่สามารถคำนวณแยกออกมาได้ว่ามีจำนวนเท่าไร [6]

เงินลงทุนสำหรับการดำเนินงานของโรงงานเรียกว่าเงินทุนหมุนเวียน (Working Capital; WC) คือ เงินทุนที่กิจการต้องใช้หมุนเวียนสำหรับการดำเนินงานก่อนที่จะกิจการจะได้รับเงินสดจากการขายสินค้าและบริการ โดยจะเตรียมเงินทุนหมุนเวียนสำหรับการผลิต 1 เดือนโดยประมาณ ซึ่งอัตราส่วนของเงินทุนหมุนเวียนต่อการลงทุนทั้งหมดจะแตกต่างกันไปตามบริษัทต่างๆ แต่โรงงานเคมีส่วนใหญ่ใช้เงินทุนหมุนเวียนเริ่มต้นเป็นจำนวนร้อยละ 10 ถึง



20 ของเงินลงทุนทั้งหมด และอาจเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 50 หรือมากกว่าสำหรับบริษัทที่ผลิตสินค้าตามความต้องการตามฤดูกาล และสุดท้ายเงินทุนหมุนเวียนนี้จะได้คืนเมื่อเลิกกิจการ [6]

การวิเคราะห์ความสามารถในการทำกำไรของการลงทุน ในโรงงานขนาดใหญ่มักจะใช้วิธี ที่พิจารณามูลค่าเวลาของเงินเป็นหลัก ประกอบด้วย อัตราผลตอบแทนของผลตอบแทน (Internal Rate of Return; IRR) และมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value; NPV) ส่วนโรงงาน ขนาดเล็กมักจะวิเคราะห์ด้วยระยะเวลาในการคืนทุน (Payback Period) คือระยะเวลาที่โรงงานเริ่มมีกำไร [6]

มูลค่าปัจจุบันสุทธิ เป็นการคำนวณหามูลค่าปัจจุบันรวมของเงินสดรับเมื่อนำไปหักออกด้วยเงินลงทุน โดยใช้ต้นทุนของเงินทุนเป็นอัตราในการคิดลดกระแสเงินสดรับ ในการเลือกโครงการ ค่า NPV จะแสดงให้เห็นว่าโครงการที่กำลังพิจารณา มีมูลค่าปัจจุบันสุทธิของการลงทุนเป็นมูลค่าเท่าไรเมื่อสิ้นสุดโครงการ ถ้าค่า NPV มีค่าเป็นบวก แสดงว่าโครงการดังกล่าวสมควรที่จะลงทุน ฉะนั้นจึงเลือกโครงการที่ให้ค่า NPV เป็นบวกสูงที่สุด [6]

$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{CF_t}{(1+k)^t} - I \quad (1)$$

เมื่อ CF_t คือ กระแสเงินสดรับสุทธิ ณ ปีที่ t I คือ เงินสดจ่ายลงทุนของโครงการ k คือ ค่าของทุนหรืออัตราผลตอบแทนที่ต้องการ และ n คือ อายุโครงการ

อัตราผลตอบแทนภายใน คือ อัตราลดค่า ที่ทำให้มูลค่าปัจจุบันของกระแสเงินสดที่คาดว่าจะต้องจ่ายในการลงทุนเท่ากับมูลค่าในปัจจุบันของกระแสเงินสดที่คาดว่าจะได้รับตลอดอายุโครงการ ซึ่งการคำนวณหาอัตราผลตอบแทนที่ทำได้โดยการหาอัตราลดค่าที่ทำให้ NPV มีค่าเท่ากับ 0 ถ้าอัตราผลตอบแทนภายในมีมากกว่าหรือเท่ากับค่าต้นทุน โดยทั่วไปถือว่าโครงการนั้นสมควรที่จะลงทุน [6]

$$I = \sum_{t=1}^n \frac{CF_t}{(1+k)^t} \quad (2)$$

เมื่อ CF_t คือ กระแสเงินสดรับสุทธิ ณ ปีที่ t I คือ เงินสดจ่ายลงทุนของโครงการ k คือ ค่าของทุนหรืออัตราผลตอบแทนที่ต้องการ และ n คือ อายุโครงการ

ระยะคืนทุน คือ ระยะเวลาที่กระแสเงินสดรับจากโครงการ สามารถชดเชยกระแสเงินสดจ่ายลงทุนสุทธิตอนเริ่มโครงการพอดี เนื่องจากโครงการที่ขอรับการสนับสนุน จะมีลักษณะการลงทุนเพียงครั้งเดียวในปีแรก ระยะเวลาคืนทุนเป็นเครื่องมือในการประเมินความเป็นไปได้ของการลงทุนอย่างง่าย เป็นการประเมินคร่าว ๆ และรวดเร็วเหมาะกับเงินลงทุนจำนวนไม่มาก ซึ่งในการเลือกโครงการค่าระยะเวลาคืนทุนจะแสดงให้เห็นว่าต้องใช้เวลานานเพียงใดในการได้ทุนคืน ถ้าสามารถได้ทุนคืนเร็ว โครงการก็จะน่าสนใจ [6]

$$\text{ระยะคืนทุน} = \frac{\text{เงินลงทุนสุทธิเริ่มแรก}}{\text{เงินสดรับสุทธิแต่ละปี}} \quad (3)$$

4. วิธีการดำเนินงาน



4.1 อุปกรณ์ซอฟต์แวร์ที่ใช้

Aspen plus v.11 และ Microsoft Office 2019

4.2 สมมติฐานในกระบวนการผลิต

กำหนดให้กระบวนการผลิตเป็นสภาวะคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา (Steady state) น้ำมันถั่วเหลืองประกอบด้วยไตรโอเลอิน และไตรปาลมิทิน โดยมีสัดส่วนโดยมวลเท่ากับ 0.8409 และ 0.1591 ตามลำดับ ไชปาล์มประกอบด้วยกรดปาลมิติก และกรดโอเลอิก โดยมีสัดส่วนโดยมวลเท่ากับ 0.5607 และ 0.4393 ตามลำดับ ปฏิกริยาสะปอนนิฟิเคชันและปฏิกริยาไฮโดรไลซิส มีร้อยละการเปลี่ยนแปลงสารตั้งต้นไปเป็นผลิตภัณฑ์ (%Conversion) 100 [5] ปฏิกริยาการเปลี่ยนกรดฟอร์มิกให้เป็นกรดเปอร์ออกซีด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ มีร้อยละการเปลี่ยนแปลงสารตั้งต้นไปเป็นผลิตภัณฑ์ 92.89 [5] กระบวนการดัดแปลงโครงสร้างของกรดไขมันไม่อิ่มตัว ทำโดยการรวมปฏิกริยาอีพอกซิเดชัน ปฏิกริยาการเปิดวงอีพอกไซด์ด้วยไฮปาล์ม และปฏิกริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน เข้าด้วยกันโดยกำหนดให้ไม่เหลือสารมัธยันตร์ และมีร้อยละการเปลี่ยนแปลงสารตั้งต้นไปเป็นผลิตภัณฑ์ 98 [5] ในปฏิกริยาการเปิดวงอีพอกไซด์ด้วยไฮปาล์มนั้น มีการเลือกกรดไขมันอิสระของไฮปาล์มไปใช้ในการเกิดปฏิกริยาตามอัตราส่วนโดยมวลของกรดไขมันอิสระของไฮปาล์ม

4.3 สมมติฐานในการวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์

กำหนดให้ กำลังการผลิต 13,062.71 ตัน/ปี อ้างอิงจากการดำเนินงาน 300 วันต่อปี และ 24

ชั่วโมง/วัน ระยะเวลาการผลิต (Operating time) 7,200 ชั่วโมง/ปี กระบวนการผลิตเป็นแบบ Solid - fluid processing plant อายุการดำเนินงานของโครงการ คือ 10 ปี อัตราผลตอบแทนต่ำที่สุดที่ยอมรับได้ คือร้อยละ 10 ต่อปี อัตราภาษีนิติบุคคลอยู่ที่ร้อยละ 20 ต่อปี อัตราการแลกเปลี่ยนเงิน 1 US\$ = 33.13 บาท การประมาณเงินลงทุนเริ่มต้นทั้งหมด ใช้การประมาณด้วยวิธีเทียบร้อยละของราคาต่างๆ กับราคาของอุปกรณ์ทั้งหมดในกระบวนการผลิตที่รวมค่าจัดส่ง สิทธิทรัพย์สินทางปัญญา เป็นร้อยละ 15 ของเงินลงทุนทั้งหมด การคำนวณต้นทุนผลิตภัณฑ์รวม (TPC) อ้างอิงจากสัดส่วนค่าใช้จ่ายในส่วนต่างๆ ของกระบวนการผลิตของอเมริกา ซึ่งกำหนดให้เป็นต้นทุนต่อปีในปีแรกที่มีกำลังการผลิตร้อยละ 100 [6] โดยการผลิตเป็นประเภท B (Average conditions) ค่า Operating supervision เป็นร้อยละ 15 ของ Operating Labor ข้อมูล Utilities ใช้จาก Aspen ค่าไฟ 226.56 บาท/ชั่วโมง ค่าสารทำความสะอาด 14.82 บาท/ชั่วโมง ค่าไอน้ำ 995.73 บาท/ชั่วโมง ค่าซ่อมบำรุง เป็นร้อยละ 7 ของ FCI ค่า Operating supplies เป็นร้อยละ 15 ของ Maintenance and repair ค่า Laboratory charges เป็นร้อยละ 15 ของ Operating labor ค่า Royalties เป็นร้อยละ 4 ของ TPC ค่าภาษี เป็นร้อยละ 2 ของ FCI ค่า Financing เป็นร้อยละ 5 ของเงินกู้ยืม โดยที่การกู้ยืมเงินเป็นร้อยละ 30 ของ TCI ค่าประกัน (Insurance) เป็นร้อยละ 1 ของ FCI ค่าเช่าที่ 5,000,000 บาท/ปี ค่าเสื่อมราคาเป็นร้อยละ 10 ของ FCI กำหนดให้เป็นค่าเสื่อมราคาแบบเส้นตรง และไม่มีมูลค่าซาก

ของโรงงาน ค่า Plant overhead เป็นร้อยละ 60 ของ Labor, Supervision, and Maintenance ค่า Administration เป็นร้อยละ 20 ของ Labor, Supervision, and Maintenance ค่า Distribution and selling เป็นร้อยละ 5 ของ TPC ค่าวิจัยและพัฒนา เป็นร้อยละ 5 ของ TPC ตารางที่ 1 แสดงราคาตลาดของสารที่ใช้ในกระบวนการผลิต

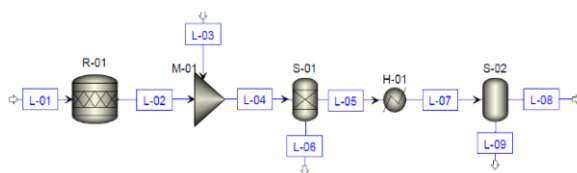
ตารางที่ 1 ราคาตลาดของสารที่ใช้ในกระบวนการ

ชื่อสารเคมี	ราคา (บาท/ตัน) [7-9]
ผลิตภัณฑ์น้ำมันหล่อลื่นชีวภาพ	117,280.20
น้ำมันถั่วเหลือง	3,147.35
โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์	9,276.40
กรดไฮโดรคลอริก	33,130.00
น้ำ	14,500.00
เอทานอล	27,350.00
ยูเรีย	2,981.70
เฮกเซน	15,604.23
กรดฟอร์มิก	11,595.50
ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	7,454.25
2-เอทิลเฮกซานอล	39,756.00
กรดพาราโทลูอินซัลโฟนิก	33,130.00
โทลูอิน	24,516.20

5. ผลการทดลอง

น้ำมันถั่วเหลือง โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ซึ่งละลายในเอทานอล และกรดไฮโดรคลอริก สารตั้งต้นทั้งหมดถูกลำเลียง (L-01) เข้าสู่ถังปฏิกรณ์ (R-01) เพื่อเปลี่ยนไตรกลีเซอไรด์ให้เป็นกรดไขมันอิสระ ด้วยปฏิกิริยาสะปอนนิฟิเคชันและปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส ความดันบรรยากาศ หลังปฏิกิริยาเสร็จสิ้น สารทั้งหมดจะถูกลำเลียง (L-02)

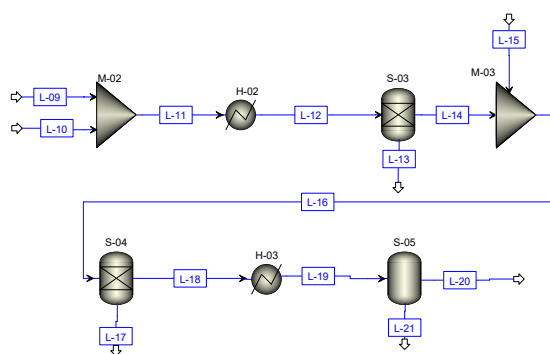
ไปยังถังผสม (M-01) เพื่อแยกกรดไขมันอิสระ โดยการเติมน้ำ (L-03) ลงไปในสารละลาย ของเหลวจะแยกเป็น 2 ชั้น โดยชั้นที่เป็นสารละลายน้ำจะอยู่ด้านล่าง และชั้นที่เป็นสารไม่ละลายน้ำจะอยู่ด้านบน จากนั้นลำเลียง (L-04) เข้าสู่เครื่องแยกของเหลว (S-01) โดยชั้นที่อยู่ด้านล่างจะถูกแยกออก (L-06) ส่วนชั้นที่อยู่ด้านบนจะถูกลำเลียง (L-05) ต่อไปเข้าสู่เครื่องทำความร้อน (H-01) เพื่อระเหยน้ำที่ยังหลงเหลือที่ 105 องศาเซลเซียส ก่อนที่จะลำเลียง (L-07) เข้าสู่เครื่องแยก (S-02) เพื่อแยกส่วนที่เป็นไอออกจากของเหลวซึ่งจะออกทางด้านบน (L-08) และกรดไขมันอิสระที่เป็นของเหลวออกทางด้านล่าง (L-09) ดังภาพที่ 5



ภาพที่ 5 แบบจำลองกระบวนการย่อยสลายพันธะเอสเทอร์ในโมเลกุลไตรกลีเซอไรด์ให้ได้กรดไขมันอิสระ

สำหรับขั้นตอนการแยกกรดไขมันอิ่มตัวทำโดยนำกรดไขมันอิสระ (L-09) ยูเรีย และเอทานอล (L-10) เข้าสู่ถังผสม (M-02) เพื่อละลายยูเรีย จากนั้นลดอุณหภูมิโดยลำเลียง (L-11) เข้าสู่เครื่องทำความเย็น (H-02) ที่อุณหภูมิ -15 องศาเซลเซียส เพื่อให้ยูเรียเกิดการตกผลึกใหม่ โดยกรดไขมันอิ่มตัวจะตกผลึกร่วมกับยูเรีย จากนั้นลำเลียง (L-12) เข้าสู่เครื่องกรอง

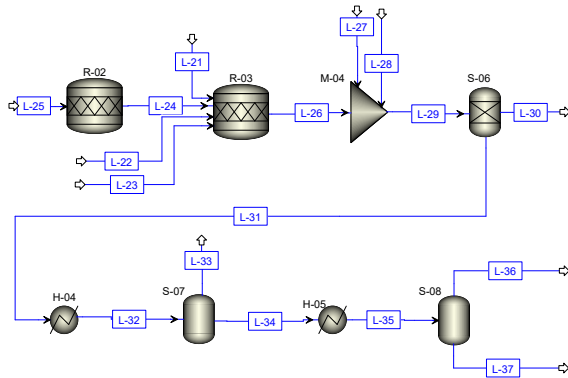
ของแข็ง (S-03) เพื่อนำฟลักซ์และกรดไขมันอิ่มตัวออก (L-13) จะได้ของเหลวที่เป็นกรดไขมันอิสระที่มีความเข้มข้นของกรดไขมันไม่อิ่มตัวมากขึ้น (L-14) จากนั้นนำเลี้ยงเข้าสู่ถังผสม (M-03) เพื่อสกัดกรดไขมันด้วยเฮกเซน (L-15) ก่อนที่จะลำเลียง (L-16) เข้าสู่เครื่องแยกของเหลว (S-04) โดยของเหลวชั้นล่างจะเป็นสารที่มีขี้ผึ้งละลายอยู่ในเอทานอล (L-17) ของเหลวชั้นบนจะเป็นสารที่ไม่มีขี้ผึ้งละลายในเฮกเซน ซึ่งจะถูกแยกและลำเลียง (L-18) เข้าสู่เครื่องทำความร้อน (H-03) ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เพื่อระเหยเฮกเซนก่อนที่จะลำเลียง (L-19) เข้าสู่เครื่องแยก (S-05) ส่วนที่เป็นไอจะถูกแยกออก (L-20) ส่วนที่เป็นของเหลวจะถูกลำเลียง (L-21) เข้ากระบวนการถัดไป ดังภาพที่ 6



ภาพที่ 6 แบบจำลองกระบวนการเพิ่มความเข้มข้นของกรดไขมันไม่อิ่มตัว

กระบวนการดัดแปลงโครงสร้างของกรดไขมันไม่อิ่มตัว กรดไขมันอิสระที่ผ่านกระบวนการในภาพที่ 6 จะถูกลำเลียง (L-21) เข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ (R-03) พร้อมกับไฮปาล์ม 2-เอทิลเฮกซานอล (L-23) และกรดเปอร์ออกไซด์ (L-24) โดยมีตัวเร่งปฏิกิริยา

กรดซัลฟิวริก และพาราโทลูอินซัลโฟนิกละลายในโทลูอิน (L-22) เพื่อดัดแปลงโครงสร้างของกรดไขมันไม่อิ่มตัวด้วยปฏิกิริยาอีพอกซิเดชัน ปฏิกิริยาการเปิดวงอีพอกไซด์ด้วยไฮปาล์ม และปฏิกิริยาเอสเตอร์ฟิเคชัน ซึ่งกรดเปอร์ออกไซด์ (L-24) เตรียมได้จากไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และกรดฟอร์มิก (L-25) ทำปฏิกิริยาเปลี่ยนให้เป็นกรดเปอร์ออกไซด์ที่เครื่องปฏิกรณ์ (R-02) เมื่อปฏิกิริยาการดัดแปลงโครงสร้างของกรดไขมันไม่อิ่มตัวเสร็จสิ้นจะได้เป็นน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพ 2-เอทิลเฮกซิลเอสเทอร์ จากนั้นลำเลียง (L-26) เข้าสู่ถังผสม (M-04) พร้อมกับเฮกเซน (L-28) และน้ำ (L-27) เพื่อสกัดสารไม่มีขี้ผึ้งด้วยเฮกเซน จากนั้นเติมน้ำไปละลายสารที่มีขี้ผึ้งแล้วลำเลียง (L-29) เข้าสู่เครื่องแยกของเหลว (S-06) โดยที่สารมีขี้ผึ้งจะอยู่ชั้นล่างและถูกแยกออก (L-30) ส่วนสารที่อยู่ชั้นบนซึ่งถูกสกัดด้วยเฮกเซนจะถูกลำเลียง (L-31) เข้าสู่เครื่องทำความร้อน (H-04) อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เพื่อระเหยแยกเฮกเซนออกไป ก่อนที่จะลำเลียง (L-32) เข้าสู่เครื่องแยก (S-07) ซึ่งสารที่เป็นไอจะถูกแยกออกทางด้านบน (L-33) ส่วนสารที่เป็นของเหลวจะถูกลำเลียง (L-34) เข้าสู่เครื่องทำความร้อน (H-05) เพื่อระเหยโทลูอินและน้ำบางส่วนที่ติดมา ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส จากนั้นจะลำเลียง (L-35) เข้าสู่เครื่องแยก (S-08) โดยที่สารที่เป็นไอจะถูกแยกออก (L-36) และส่วนที่เป็นของเหลวคือน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพ 2-เอทิลเฮกซิลเอสเทอร์ถูกแยกออกทางด้านล่าง (L-37) ก่อนที่นำไปเก็บไว้ในถังเก็บเพื่อรอจำหน่ายดังภาพที่ 7



ภาพที่ 7 แบบจำลองกระบวนการตัดแปลง
โครงสร้างของกรดไขมันไม่อิ่มตัว

เมื่อทำการจำลองการผลิตในโปรแกรม ASPEN Plus โดยใช้ NRTL เป็น property method ตามข้อสมมติฐานในการวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์ข้างต้นของกระบวนการในภาพที่ 5-7 จะได้ปริมาณของสารทั้งหมดที่เข้าและออกในกระบวนการผลิตดังตารางที่ 2 และความต้องการพลังงานรวมที่คำนวณจากโปรแกรม ASPEN Plus และราคาของอุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการผลิตน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพ ดังตารางที่ 3 รวมทั้งสาหร่ายบโภคที่ใช้ในกระบวนการผลิตดังตารางที่ 4

ตารางที่ 2 ปริมาณของสารทั้งหมดที่เข้าและออก
ในกระบวนการผลิตน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพ

ส่วนประกอบ	อัตราการไหลเชิงมวล (กก./ชม.)		
	ขาเข้า	ขาออก	
		ผลิตภัณฑ์	อื่นๆ
น้ำมันถั่วเหลือง	917.7	0.0	0.0
กรดไขมันไม่อิ่มตัว	0.0	12.9	7.4
กรดไขมันอิ่มตัว	0.0	1.4	137.7
โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์	260.1	0.0	81.9
กรดไฮโดรคลอริก	175.4	0.0	59.6

ส่วนประกอบ	อัตราการไหลเชิงมวล (กก./ชม.)		
	ขาเข้า	ขาออก	
		ผลิตภัณฑ์	อื่นๆ
กลีเซอรอล	0.0	0.0	97.5
โพแทสเซียมคลอไรด์	0.0	0.0	236.7
น้ำ	2,947.8	0.0	3,147.8
เอทานอล	1,113.5	0.0	1,113.5
ยูเรีย	875.67	0.0	875.7
เฮกเซน	1,378.5	0.6	1377.9
กรดฟอร์มิก	550.0	0.0	274.8
ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	719.2	0.0	341.6
กรดเปอร์ออกซี	0.0	0.0	370.8
โซปาล์ม	695.7	11.0	0.5
2-เอทิลเฮกซานอล	678.1	0.0	344.6
กรดพาราโทลูอินซิลโฟนิค	172.6	0.0	172.6
โทลูอิน	637.4	2.3	635.1
2-เอทิลเฮกซิลเอสเทอร์	0.0	1,814.3	3.3
กรดซัลฟิวริก	7.3	0.0	7.3
ทั้งหมด	11,129	1,843	9,286

ตารางที่ 3 ความต้องการพลังงานรวมคำนวณจาก
โปรแกรม ASPEN และราคาของอุปกรณ์ที่ใช้ใน
กระบวนการผลิตน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพ

อุปกรณ์	ความต้องการพลังงานรวม (กิโลวัตต์)	ราคา (บาท/เครื่อง)
เครื่องปฏิกรณ์ R-01	231.2	2,077,251.00
ถังผสม M-01, M-02, M-03, M-04	0.0*	450,568.00
เครื่องแยกของเหลว S-01	37.2	546,645.00
เครื่องทำความร้อน H-01	65.2	301,483.00
เครื่องแยก S-02, S-05, S-07, S-08	0.0*	546,645.00
เครื่องทำความเย็น H-02	109.3	341,239.00
เครื่องกรองของแข็ง S-03	0.1	546,645.00
เครื่องแยกของเหลว S-04	0.8	546,645.00
เครื่องทำความร้อน H-03	189.4	357,804.00
เครื่องปฏิกรณ์ R-02	33.8	1,553,797.00

อุปกรณ์	ความต้องการ พลังงานรวม (กิโลวัตต์)	ราคา (บาท/เครื่อง)
เครื่องปฏิกรณ์ R-03	565.3	2,077,251.00
เครื่องแยกของเหลว S-06	160.7	632,783.00
เครื่องทำความร้อน H-04	394.2	371,056.00
เครื่องทำความร้อน H-05	238.0	371,056.00
รวมราคา		13,712,507.00

หมายเหตุ * ความต้องการพลังงานรวม 0 กิโลวัตต์ หมายถึง อุปกรณ์ไม่มีการใช้พลังงาน

ตารางที่ 4 สาธารณูปโภคที่ใช้ในกระบวนการผลิต

สาธารณูปโภค	จำนวน	ราคาต่อหน่วย (บาท/ชม.)
ไฟฟ้า	88.24 กิโลวัตต์	226.5628
สารทำความเย็น (ฟรียอน 12)	2387.27 กก./ชม.	14.8210
ไอน้ำ (ที่ 165 PSI)	458.87 กก./ชม.	327.1087
ไอน้ำ (ที่ 400 PSI)	781.63 กก./ชม.	668.5198

คำนวณเงินลงทุนเริ่มต้นทั้งหมดสำหรับกระบวนการผลิต TPI TPC ในโปรแกรม Excel ได้ผลดังตารางที่ 5 คำนวณ NPV และ %IRR ตามสมการ 1 และ 2 ได้เท่ากับ 12.60 บาท และ 15.24 คำนวณกระแสเงินสดตลอด 10 ปีของโครงการดังตารางที่ 6 และคำนวณระยะเวลาคืนทุนตามสมการที่ 3 พบว่าจะคืนทุนในระยะเวลา 4 ปี 3 เดือน

ตารางที่ 5 ต้นทุนค่าก่อสร้างโรงงาน เงินลงทุนทรัพย์สินถาวร และเงินทุนหมุนเวียน

Title	Bio lubricant production	
Fluid processing plant		
Estimating Capital Investment based on Percentage of Delivered-Equipment Cost Method		
Component	Percent of Delivered-equipment cost	Cost in MTHB
Direct Costs		
Purchased equipment delivered	100	13.7125
Purchased equipment installation	39	5.3479
Instrumentation and controls	26	3.5653
Piping	31	4.2509
Electrical system	10	1.3713
Building	29	3.9766
Yard improvement	12	1.6455
Service facilities	55	7.5419
Total direct plant costs	302	41.4118
Indirect costs		
Engineering and supervision	32	4.3880
Construction expenses	34	4.6623
Legal expenses	4	0.5485
Contractor's fee	19	2.6054
Contingency	37	5.0736
Total indirect plant costs	126	17.2778
FCI	428	58.6895
WC = 0.15*TCI	75	10.2844
TCI	503	68.9739



ตารางที่ 6 กระแสเงินสดตลอดอายุการดำเนินงาน (ล้านบาท)

Year	Cost	Revenue	Mortgage				Depreciation	Taxable Income	Tax (20%)	ATCF	Cum. A _j
			A	I	P	R					
0	-48.28					20.69				-48.28	-38.91
1	-1517.75	1532.00	-2.68	-1.0	-1.65	19.05	-5.87	7.35	-2.20	9.37	-29.55
2	-1517.75	1532.00	-2.68	-1.0	-1.73	17.32	-5.87	7.43	-2.23	9.34	-20.21
3	-1517.75	1532.00	-2.68	-0.9	-1.81	15.51	-5.87	7.52	-2.25	9.32	-10.89
4	-1517.75	1532.00	-2.68	-0.8	-1.90	13.60	-5.87	7.61	-2.28	9.29	-1.60
5	-1517.75	1532.00	-2.68	-0.7	-2.00	11.60	-5.87	7.70	-2.31	9.26	7.66
6	-1517.75	1532.00	-2.68	-0.6	-2.10	9.50	-5.87	7.80	-2.34	9.23	16.89
7	-1517.75	1532.00	-2.68	-0.5	-2.20	7.30	-5.87	7.91	-2.37	9.20	26.09
8	-1517.75	1532.00	-2.68	-0.4	-2.31	4.98	-5.87	8.02	-2.41	9.17	35.26
9	-1517.75	1532.00	-2.68	-0.2	-2.43	2.55	-5.87	8.13	-2.44	9.13	44.39
10	-1517.75	1532.00	-2.68	-0.1	-2.55	0.00	-5.87	8.25	-2.48	9.09	53.48
10		10.28								10.28	63.77

6. สรุปผลการทดลอง



6.1 ผลสรุปด้านเทคนิคการผลิตน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพ

จากผลการสร้างแบบจำลองกระบวนการผลิตน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพโดยใช้น้ำมันถั่วเหลือง และไฮปาล์ม พบว่าในขั้นตอน 1) การเปลี่ยนไตรกลีเซอไรด์ให้เป็นกรดไขมันอิสระโดยปฏิกิริยาสะปอนนิฟิเคชัน และปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ซึ่งใช้น้ำมันถั่วเหลือง 918 กิโลกรัม/ชั่วโมง ได้กรดไขมันอิสระ 877 กิโลกรัม/ชั่วโมง ต่อมาในขั้นตอน 2) การแยกกรดไขมันไม่อิ่มตัว โดยการตกผลึกด้วยยูเรียสามารถทำให้กรดไขมันไม่อิ่มตัวเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 84.15 เป็นร้อยละ 99.64 และในขั้นตอน 3) การดัดแปลงโครงสร้างของกรดไขมันไม่อิ่มตัวด้วยปฏิกิริยาอีพอกซิเดชัน ปฏิกิริยา

การเปิดวงอีพอกไซด์ด้วยไฮปาล์ม และปฏิกิริยาเอสเตอร์ฟิเคชัน ซึ่งใช้ไฮปาล์ม 696 กิโลกรัม/ชั่วโมง เข้าทำปฏิกิริยาทำให้ได้ 2-เอทิลเฮกซิลเอสเทอร์ 1,814 กิโลกรัม/ชั่วโมง

6.2 ผลสรุปด้านเศรษฐศาสตร์ของกระบวนการผลิตน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพ

เงินลงทุนเริ่มต้นทั้งหมดสำหรับกระบวนการผลิต 68.9 ล้านบาท ต้นทุนผลิตสินค้ารวมสำหรับกระบวนการผลิตรวมค่าเสื่อมราคา 1,524.6 ล้านบาท/ปี มีรายได้จากการขายน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพ 1,531.9 ล้านบาท/ปี เมื่อนำไปวิเคราะห์หาความสามารถในการทำกำไรพบว่าโครงการนี้ควรลงทุนเนื่องจากมูลค่าปัจจุบันสุทธิเป็นบวก และสามารถคืนทุนได้ภายใน 4 ปี 3 เดือน

7. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณคุณคุณธรรธร สุวลีรัตน์ ในการช่วยเตรียมข้อมูล จัดรูปแบบ และตรวจทาน บทความ

8. เอกสารอ้างอิง

[1] Adhvaryu A, Liu Z, and Erhan S Z (2005). Synthesis of novel alkoxylated triacylglycerols and their lubricant base oil properties. *Ind. Crops Prod*, 21: 113–119.

[2] Hossain M A, Iqbal M A M, Julkapli N M, Kong P S, Ching J J, and Lee H V (2018). Development of catalyst complexes for upgrading biomass into ester-based biolubricants for automotive applications: a review. *RSC Adv.*, 8: 5559–5577.

[3] Salimon J, Abdullah B M, and Salih N (2011). Hydrolysis Optimization and Characterization Study of Preparing Fatty Acids from *Jatropha Curcas* seed Oil. *Chemistry Central Journal*, 5(1): 67.

[4] กฤษฎ์พรปวีณ์ พินดิษฐ์ (2561). การเพิ่มมูลค่าน้ำมันพืชโดยการสังเคราะห์เป็นน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, ภาควิชาวิศวกรรมเคมี, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, ประเทศไทย.

[5] Pindit K, Thanapimmetha A, Saisriyoot M, and Srinophakun P (2021). Biolubricant basestocks synthesis using 5-step reaction

from *jatropha* oil, soybean oil, and palm fatty acid distillate. *Industrial Crops & Products*, 166: 113484.

[6] Peter S, Timmerhaus D, and West E (2003). *Plant Design and Economics for Chemical Engineers*.

[7] Alibaba (2022). RD5012A factory price lubricant packages hydraulic oil additive, brand name lubricants T 6162 SL 5W/40 Gasoline engine oil additive package, T 616 0w40 5w40 liquid tackifier automotive lubricant engine oil additive, Belgium Bottled 900ml refined soybean oil soyabean refined soybean oil soya bean oil, Low Price White Flake 1310-58-3 Potassium Hydroxide 95%, Cas 7664-39-3 40% 49% 55%70% Hydrofluoric Acid HF, Best Price Urea 46% Granular Fertilizer from Ukraine, manufacturer price formic acid 85, Hydrogen peroxide, Indonesia palm oil palm fatty acid distillate PFAD in drum, High Quality P-Toluenesulfonic Acid Monohydrate CAS: 6192-52-5 with Best and Cheap Price, Sulfuric acid, sateri sodium sulphate anhydrous manufacturers sodium sulphate supplier In: Alibaba. Available via DIALOG. <https://www.alibaba.com/product-detail>. Accessed 24 Feb 2022.

[8] Echemi (2022). Toluene International



Price. In: Echemi. Available via DIALOG. <https://www.echemi.com>. Accessed 24 Feb 2022.

[9] Made-in-Chain (2022). Indonesia Palm Kernel Fatty Acid Distillate with Low

Price, 99.9% 2-Ethylhexanol / 2-Ethyl-1-Hexanol/ Isooctyl Alcohol with Best Price CAS No 104-76-7 In: zhongliantrading, hbyanxi. Available via DIALOG. <https://en.made-in-china.com/product>. Accessed 24 Feb 2022.

ชื่อ.....

ที่อยู่.....

รหัสไปรษณีย์

โทรศัพท์.....โทรสาร.....

ชื่อผู้ประสานงาน.....

โทรศัพท์.....โทรสาร.....อีเมล.....

ขอสมัครเป็นสมาชิกวารสาร “วิศวกรรมสาร มก.”

☐ สมาชิกใหม่

☐ ต่ออายุสมาชิก

☐ หนึ่งปี 2 ฉบับ ราคา 200 บาท

☐ สองปี 4 ฉบับ ราคา 400 บาท

เริ่มตั้งแต่ฉบับที่.....เดือน.....ปี.....ถึงฉบับที่.....เดือน.....ปี.....

โดยได้แนบ

☐ เงินสด (กรณีมาติดต่อด้วยตนเอง)

หรือ

☐ การชำระเงินตามใบแจ้งหนี้ (Bill Payment)

ฝ่ายสมาชิกวารสาร ติดต่อ

นางสาวสุทัตตา พานุ่มนโต

งานบริการวิชาการและวิจัย สำนักงานเลขานุการ

โทรศัพท์ 0 2797 0905 โทรสาร 0 2579 2775

อีเมล journal.eng@ku.th



คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

50 ถนนงามวงศ์วาน แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพมหานคร 10900



ธนาคารทหารไทย Comp. Code : 2561

สำหรับธนาคาร

1. ชื่อโครงการ/ชื่อผู้ฝาก.....

2. รหัสคณะ (Ref. No. 1)

0	1	0	5	0	1	0	0	1	0								

3. รหัสเลขประจำตัวประชาชน (Ref. No. 1)

4. รหัสโครงการพัฒนาวิชาการ/รหัสรายได้ (Ref. No.2)

หมายเลขเช็ค	เช็คลงวันที่	ชื่อธนาคาร / สาขา	จำนวนเงิน
☐ เงินสด Cash	โปรดเขียนจำนวนเงินเป็นตัวหนังสือ / Please write amount in words		

หมายเหตุ - กรณีชำระด้วยเช็ค มหาวิทยาลัยฯ จะถือว่าการชำระมีผลสมบูรณ์ต่อเมื่อธนาคารเรียกเก็บเงินตามเช็คได้

- ธนาคารจะรับเช็คที่อยู่ในสำนักหักบัญชีเดียวกันเท่านั้น

รหัสรายได้ (/Ref. No.2)

รหัส ประเภทการฝากเงิน

รหัส ประเภทการฝากเงิน

101 การนำฝากเงินสด

107 รายได้ค่าปรับ

102 รายได้จากการขายใบสมัคร

108 รายได้ค่าธรรมเนียมสมัครสอบเข้าทำงาน

103 รายได้จากการให้บริการวิชาการ (ที่ไม่ใช่โครงการ)

109 รายได้อื่นๆ (นอกเหนือจากที่ระบุข้างต้น)

104 รายได้ค่าเช่า

201 เงินรับฝาก เช่น เงินค่าประกัน เงินมัดจำของ

105 รายได้จากการรับบริจาค

106 รายได้ดอกเบี้ยเงินฝากจากสถาบันการเงิน

ชื่อผู้นำฝาก..... โทรศัพท์.....

ผู้รับเงิน / Collector

สำหรับธนาคาร



คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

50 ถนนงามวงศ์วาน แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพมหานคร 10900



ธนาคารทหารไทย Comp. Code : 2561

1. ชื่อโครงการ/ชื่อผู้ฝาก.....

2. รหัสคณะ (Ref. No. 1)

0	1	0	5	0	1	0	0	1	0								

3. รหัสเลขประจำตัวประชาชน (Ref. No. 1)

4. รหัสโครงการพัฒนาวิชาการ/รหัสรายได้ (Ref. No.2)

หมายเลขเช็ค	เช็คลงวันที่	ชื่อธนาคาร / สาขา	จำนวนเงิน
☐ เงินสด Cash	โปรดเขียนจำนวนเงินเป็นตัวหนังสือ / Please write amount in words		

หมายเหตุ - กรณีชำระด้วยเช็ค มหาวิทยาลัยฯ จะถือว่าการชำระมีผลสมบูรณ์ต่อเมื่อธนาคารเรียกเก็บเงินตามเช็คได้

- ธนาคารจะรับเช็คที่อยู่ในสำนักหักบัญชีเดียวกันเท่านั้น

รหัสรายได้ (/Ref. No.2)

รหัส ประเภทการฝากเงิน

รหัส ประเภทการฝากเงิน

101 การนำฝากเงินสด

107 รายได้ค่าปรับ

102 รายได้จากการขายใบสมัคร

108 รายได้ค่าธรรมเนียมสมัครสอบเข้าทำงาน

103 รายได้จากการให้บริการวิชาการ (ที่ไม่ใช่โครงการ)

109 รายได้อื่นๆ (นอกเหนือจากที่ระบุข้างต้น)

104 รายได้ค่าเช่า

201 เงินรับฝาก เช่น เงินค่าประกัน เงินมัดจำของ

105 รายได้จากการรับบริจาค

106 รายได้ดอกเบี้ยเงินฝากจากสถาบันการเงิน

ชื่อผู้นำฝาก..... โทรศัพท์.....

ผู้รับเงิน / Collector

คำแนะนำสำหรับผู้เขียน

รูปแบบการเตรียมบทความวิศวกรรมสาร มก.

ผู้เขียน¹, ผู้เขียนร่วม¹ และ ผู้เขียนลำดับสุดท้าย²

(ใส่ชื่อ และนามสกุล โดยไม่ต้องมีคำนำหน้า)

ชื่อภาควิชา หน่วยงาน บริษัท มหาวิทยาลัย (ไม่ต้องใส่ที่อยู่)

อีเมล : ผู้เขียน¹, ผู้เขียนร่วม¹ และผู้เขียนลำดับสุดท้าย

บทคัดย่อ

เอกสารฉบับนี้เป็นคำแนะนำสำหรับการเขียนบทความเพื่อลงวารสารวิศวกรรมสาร มก. บทความนี้จะจัดพิมพ์เป็นรูปเล่มเพื่อเผยแพร่ บทคัดย่อจะมีเพียงย่อหน้าเดียว (**PARAGRAPH**) และจะต้องมีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ในกรณีที่เขียนบทความภาษาไทย ส่วนบทความภาษาอังกฤษ ไม่ต้องมีบทคัดย่อภาษาไทย ภายในบทคัดย่อต้องสรุปสาระสำคัญ วัตถุประสงค์ วิธีการ ผล สรุปผล โดยจะต้องไม่อ้างถึงเอกสารรูปภาพ หรือตารางใดๆ ความยาวประมาณ 100-250 คำ ไม่เว้นบรรทัด ด้วยฟอนต์ **TH Sarabun 14** (ภาษาไทย) และ **Time New Roman 10** (ภาษาอังกฤษ)

คำสำคัญ :

คำสำคัญเป็นคำนามที่บ่งถึงบทความนั้น คำสำคัญเป็นคำนามที่ไม่ใช่ประโยค คำสำคัญไม่ใช่คำทั่วไป (คำสำคัญควรมีประมาณ 3-6 คำ ด้วยฟอนต์ 14 ชิดซ้าย)

ABSTRACT

This file provides a template for writing KU Journal will be published in a book format and also in electronic format. Please provide one paragraph abstract of 100-250 words. The abstract not contain any undefined abbreviation or unspecified references. It should be single-spaced in 10 point type, and Times New Roman font (in English) and 14 point type in TH Sarabun (in Thai).

Keywords :

keyword 1, keyword 2, keyword 3 (Please provide three to six keywords.) 10 point type, left-justified

1. บทนำ

การส่งบทความผู้เขียนควรตรวจสอบรูปแบบการเขียน และการสะกดคำผิดให้รอบคอบก่อนส่งความยาวของบทความประมาณ 8-10 หน้า เป็นแบบสองคอลัมน์ด้วยฟอนต์ TH Sarabun 16

บทความอาจเป็นภาษาไทยหรือภาษาอังกฤษก็ได้ แต่ควรเป็นภาษาเดียวกันอย่างต่อเนื่อง เนื้อเรื่องมีความยาวประมาณ 8-10 หน้าของ template เนื้อหาของบทนำ ควรเขียนถึงที่มาของปัญหา สถานภาพของความรู้ซึ่งอาจรวมการตรวจเอกสาร (Literature Review) วัตถุประสงค์ ขอบเขต วิธีการทดลองและผลสรุปที่สำคัญของงานนี้

2. รูปแบบของข้อความ

ต้นฉบับควรจัดพิมพ์ด้วยไมโครซอฟต์เวิร์ดแบบสองคอลัมน์ พร้อมด้วยรูปภาพและตารางประกอบความยาวกระดาษขนาด A4 ระยะขอบ ซ้าย ขวา 20 มม. (0.8 นิ้ว) ระยะห่างหัวกระดาษจากขอบบน และท้ายกระดาษจากขอบล่างอยู่ที่ 16 มม. (0.65 นิ้ว)

ระยะห่างบรรทัด ไม่เว้นบรรทัด หนึ่งเท่า และสองบรรทัดสำหรับก่อนและหลังหัวข้อเรื่อง และหัวข้อย่อย ระหว่างย่อหน้าไม่ต้องเว้นบรรทัด บรรทัดแรกของย่อหน้าควรห่างจากขอบประมาณ 10 มม. (0.4 นิ้ว) ตำแหน่งและรูปแบบการเขียนสามารถดูได้จากเอกสารฉบับนี้

2.1 เชิงอรรถ

รายการเอกสารอ้างอิงที่ใช้อ้างในบทความควรเป็นผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์ หรือยอมรับ

ให้ตีพิมพ์ได้ สำหรับการอ้างอิงที่เป็นการสนทนาส่วนบุคคลหรืองานที่ยังไม่ได้รับตีพิมพ์ ควรอ้างอิงอยู่ในเนื้อหาเท่านั้นไม่ควรนำมาอ้างอิงในเชิงอรรถ

2.2 ฟอนต์

เนื้อหาของบทความนี้ใช้ฟอนต์ TH Sarabun 16 หัวข้อ และหัวข้อย่อยเน้นตัวหนา ขนาดข้อความที่อยู่ในรูปภาพไม่ควรต่ำกว่า TH Sarabun 12

2.3 ตารางและรูปภาพ

2.3.1 ตาราง

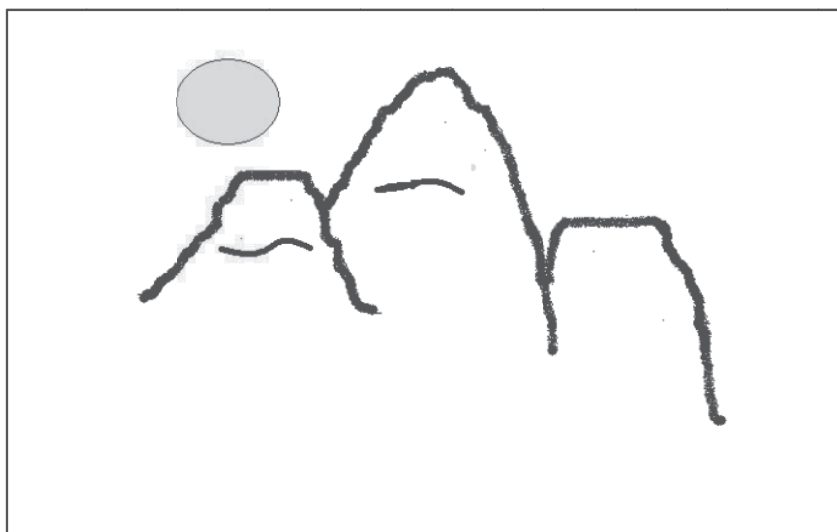
ตารางทุกตารางเรียงลำดับด้วยเลขอารบิก และปรากฏอยู่ในข้อความ ตารางทุกๆ ตารางนอกจากมีหมายเลขแล้ว ควรจะมีชื่อตารางที่กล่าวถึงตารางอย่างชัดเจนและตรงตามเนื้อหาของตาราง ชื่อตารางควรอยู่ชิดขอบตารางทางด้านซ้าย ตัวอย่างดังตารางที่ 1

2.3.2 รูปภาพ

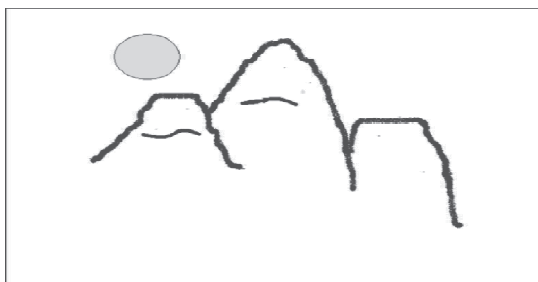
รูปภาพควรรวมอยู่ในบทความที่ส่งเข้ามาไม่ควรแยกเป็นไฟล์ต่างหาก มีความละเอียดของรูปภาพสูง (300 dpi) รูปภาพทุกรูปควรเรียงลำดับด้วยหมายเลข เป็นรูปที่ชัดเจน รูปภาพประกอบจะต้องมีความกว้างไม่เกิน 8.1 ซม. เพื่อให้ลงในสมุดได้เดียว กรณีที่เป็นภาพใหญ่จะลงในสองสมุดหรือลงเต็มหน้ากระดาษทางขวาก็ได้ แต่ไม่ควรนำไปอยู่ด้านหลังของบทความ คำแนะนำรูปภาพควรอยู่ต่อจากข้อความที่กล่าวถึง ชื่อรูปภาพควรอยู่ตำแหน่งกึ่งกลาง โดยชื่อควรขึ้นต้นด้วยคำนาม

ตารางที่ 1 ชื่อตัวอย่างตาราง

AAA	Type X				Type Y			
	Item 1	Item 2	Item 3	Item 4	Item 1	Item 2	Item 3	Item 4
BBB	18	44	41	13	17	43	40	10
CCC	24	60	61	28	26	63	65	19



ภาพที่ 1 ภาพตัวอย่าง



ภาพที่ 2 ภาพตัวอย่าง 2

ตารางที่ 2 ตัวอย่าง

AAA	Type X			
	Item 1	Item 2	Item 3	Item 4
BBB	18	44	41	13
CCC	24	60	61	28

2.4 สูตรและสมการ

สูตรและสมการควรอยู่คนละบรรทัดกับเนื้อความและในเนื้อหาต้องมีการอธิบายสูตรอย่างเข้าใจชัดเจน ลำดับของสูตรให้ใส่อยู่ในวงเล็บ เช่นสูตรหรือสมการนั้น ตัวอักษรในสูตรหรือสมการต้องเห็นอย่างเด่นชัด

$$x^2 + y^2 + z^2 = 1 \quad (1)$$

2.5 การอ้างอิงในเนื้อหา

2.5.1 การอ้างอิงในเนื้อหา

การอ้างอิงในเนื้อหาใช้รูปแบบการอ้างอิงแบบหมายเลขตามลำดับการปรากฏในเนื้อหา การอ้างอิงหมายเลขจะอยู่ในวงเล็บก้ามปู เช่น [6]

สำหรับการที่อ้างอิงจากสองแหล่งนั้น ให้ใส่ตามลำดับการปรากฏ และใช้เครื่องหมายจุลภาค “ , ” เป็นตัวแบ่ง เช่น [6, 7] หรือ [2, 8] ในกรณีที่อ้างมากกว่าสองแหล่งและเรียงลำดับกันให้ใช้เครื่องหมายยัติภังค์ “ - ” เป็นตัวแบ่ง เช่น [8-10]

3. วิธีการตีพิมพ์บทความ

3.1 หลักเกณฑ์การส่งบทความ

3.1.1 หลักเกณฑ์การส่งบทความ ก็คือ บทความฉบับนี้ต้องไม่เคยตีพิมพ์ที่ไหนมาก่อน ไม่อยู่ระหว่างการพิจารณาเพื่อรอตีพิมพ์จากหน่วยงานใด ทั้งในชื่อของผู้เขียนและผู้เขียนร่วมทุกคน ถ้าปรากฏเหตุการณ์ในลักษณะนี้ทั้งในแบบชัดแจ้งและไม่ชัดแจ้ง วิศวกรรมสาร มก. ขออนุญาตไม่พิจารณาบทความนั้น และจะไม่รับพิจารณาไม่ว่าในกรณีใดๆ ทั้งสิ้น

นอกจากนี้ถ้าผู้เขียนต้องการแทรก รูปภาพ ตาราง หรือข้อความที่ปรากฏอยู่ในบทความ ที่ได้รับก่อนหน้านี้แล้ว จะต้องได้รับอนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์ก่อน หรืออ้างอิงเจ้าของรูปภาพ ตาราง หรือข้อความนั้นๆ ในบทความ เมื่อวารสารได้รับการตีพิมพ์ รูปภาพ ตาราง หรือข้อความนั้นๆ ถ้าไม่มีการอ้างอิงจะถือว่าเป็นผลงานของเจ้าของบทความ และจะไม่รับพิจารณากรณีที่เกิดการฟ้องร้อง

3.1.2 การรับตีพิมพ์

ต้นฉบับสามารถส่งได้ทางระบบออนไลน์ <https://www.tci-thaijo.org/index.php/kuengj> โดย บทความจะได้รับการพิจารณาบทความโดยผู้ทรงคุณวุฒิ จากสาขาวิชาเดียวกันกับบทความ จำนวน 2 ท่าน เพื่อ ประเมินคุณภาพ และความเหมาะสมก่อนการตอบรับ ในกรณีที่ผลการประเมินระบุให้ต้องปรับปรุงหรือแก้ไข ผู้เขียนจะต้องดำเนินการให้แล้วเสร็จตามกำหนด

3.2 หลักเกณฑ์การประเมิน

ระบบตรวจสอบผลงานก่อนลงพิมพ์โดย ผู้ทรงคุณวุฒิ (peer review) หมายถึง มีผู้ทรงคุณวุฒิ ผู้เชี่ยวชาญในสาขาเดียวกันกับบทความ ตรวจสอบ บทความก่อนที่จะลงตีพิมพ์ จำนวน 2 ท่าน โดยที่ ผู้ทรงคุณวุฒิจะต้องตอบรับให้ตีพิมพ์ครบทั้งสองท่าน ในกรณีที่ท่านใดท่านหนึ่งไม่ตอบรับตีพิมพ์ จะต้อง มี ผู้ทรงคุณวุฒิอีกหนึ่งท่านตัดสิน

4. การละเมิดลิขสิทธิ์

ผู้เขียนจะต้องรับผิดชอบ ในกรณีที่นำผลงานใดๆ ที่มีเจ้าของไม่ว่าจะเป็นการอ้างอิง การปรับแต่งวัตถุใดๆ รวมถึงรูปภาพจากผลงานที่เผยแพร่แล้ว และคัดลอก ข้อความจากสิ่งพิมพ์อื่นๆ กองบรรณาธิการวารสาร วิศวกรรมสาร มก. และผู้พิมพ์จะไม่รับผิดชอบการกระทำ ดังกล่าวของผู้เขียน

5. บทสรุป

บทสรุปควรเป็นใจความสำคัญของบทความนี้ กระชับและแสดงทัศนะของผู้เขียนในผลการทดลอง โปรดอย่าใช้บทคัดย่อเป็นบทสรุป และบทสรุปควรชี้แจง ถึงความสำคัญของงาน การใช้งาน และความต่อเนื่อง ของงาน

เอกสารอ้างอิง

[a] บทความในวารสาร

Harris M, Karper E, Stacks G, Hoffman D, DeNiro R, and Cruz P (2001). Writing labs and the Hollywood connection. Journal of Film Writing, 44 : 213-245.

[b] หนังสือ (ผู้เขียน) et al.

Calfee RC, Valencia RR (1991). APA Guide to Preparing Manuscripts for Journal Publication Washington, DC: American Psychological Association.

[c] หนังสือรวมบทความ

O'Neill JM, Egan J (1992). Men's and women's gender role journeys: metaphor For healing, transition, and transformation. In: Wainrib BR (ed), Gender Issues Across the Life Cycle (pp. 107-123). New York: Springer.

[d] Paper presented at a conference

Phelan JC, Link BG, Stueve A, Pescosolido BA (1996). Have public conception of mental health changed in the past half Century. Does it matter Paper presented at the 124th Annual Meeting of the American Public Health Association, New York.

[e] Paper in proceedings

Mahdavi A, Spasojevic B (2007). Incorporating simulation into building systems control logic. In: Proceeding of the 10th International Building Performance Simulation Association Conference and Exhibition (BS2007), Beijing, China, pp.1175-1181.

[f] Thesis or Dissertation

Yang X (1999). Study of building material emissions and indoor air quality. PhD Dissertation, Building Technology Program, Department of Architecture, Massachusetts Institute of Technology, USA.

[g] Newspaper article

Di Rado A (1995, March 15). Trekking through college: classes explore modern society using the word of Star Trek. Los Angeles Times, p. A3.

[h] Patent

Dong J, Martin S and Waldo P. Method and system for dynamically presenting cluster analysis results. US Patent, US6380937B1, 2002-3-30.

[i] Non-English publication

Jiang Y et al. (2004). Liquid desiccant airconditioning system and its applications. Heating Ventilation & Air Conditioning. 34(11): 88-97.

[j] Online document

Doe J (1999). Title of subordinate document. In: The dictionary of substances and their effects. Royal Society of Chemistry. Available via DIALOG. <http://www.isc.org/dose/title>. Accessed 15 Jan. 1999

Template and Instructions for the Preparation of KU Engineering Journal

Author¹, Coauthor¹ and Thirdauthor² (full first- and surname, no title)

Department or Division Name

Company or College Name (no postal address)

E-mail address

ABSTRACT

This file provides a template for writing KU Engineering Journal. This Journal will be published in a book format and also in electronic format. Please provide one paragraph abstract of 100–250 words. The abstract should not contain any undefined abbreviations or unspecified references. It should be single-spaced in 10 point type, with Times New Roman font (in English) and 14 point type in Th Sarabun (in Thai).

Keywords :

keyword 1; keyword 2; keyword 3(Please provide three to six keywords.) 10 point type, left-justified

1. INTRODUCTION

It is expected that authors will submit carefully written and proofread material. Spelling and grammatical errors, as well as language usage problems, are not acceptable in the final submission. The paper length should from 8 to 10 pages and be single-spaced in 12 point type with Times New Roman font or 16 point type Th Sarabun font.

The Journal Language is Thai and English, clearly describes the background of the subject, the authors work, including the methods used, and concluding discussion on the importance of the work.

2. TEXT FORMATTING

The acceptable manuscripts should be prepared in MS WORD using this template. The format of the template is in double-column with figures and tables included within the text.

This template is an A4 format with 20 mm (0.8 inch) margins left and right. Header and footer shall be positioned 16 mm (0.65 inch) from the edge.

All text paragraphs should be single spaced, with first line intended by 10 mm (0.4 inch). Double spacing should only be used before and after headings and subheadings as shown in this example. Position and style of headings and subheadings should follow this example. No spaces should be placed between paragraphs.

2.1 Header, Footer, Page Numbering

The list of references should only include works that are cited in the text and that have been published or accepted for publication. Personal communications and unpublished works should only be mentioned in the text. Do not use footnotes or endnotes as a substitute for a reference list.

Table 1 Title of Example Table

AAA	Type X				Type Y			
	Item 1	Item 2	Item 3	Item 4	Item 1	Item 2	Item 3	Item 4
BBB	18	44	41	13	17	43	40	10
CCC	24	60	61	28	26	63	65	19

2.3.2 Figures

Illustrations should be included directly in the files you submit. They should be at high resolution (300 dpi). All illustrations must be numbered consecutively using Arabic. The colour illustrations should remain clear when

2.2 Fonts

The body of manuscript should use 12-point Times New Roman font. The styles available are bold, italic and underlined.

It is recommended that text in figures is not smaller than 9-point font size.

2.3 Tables and Figures

2.3.1 Tables

All tables are to be numbered using Arabic numerals. Tables should always be cited in text in consecutive numerical order.

For each table, please supply a table heading. The table title should explain clearly and concisely the components of the table. The following is the example for Table 1.

printed in monochrome. Centre figures on the width of the page. Position figures at the top and the bottom of a page. Do not assemble figures at the back of your paper, but place them as close as possible to where they are mentioned in the main text.

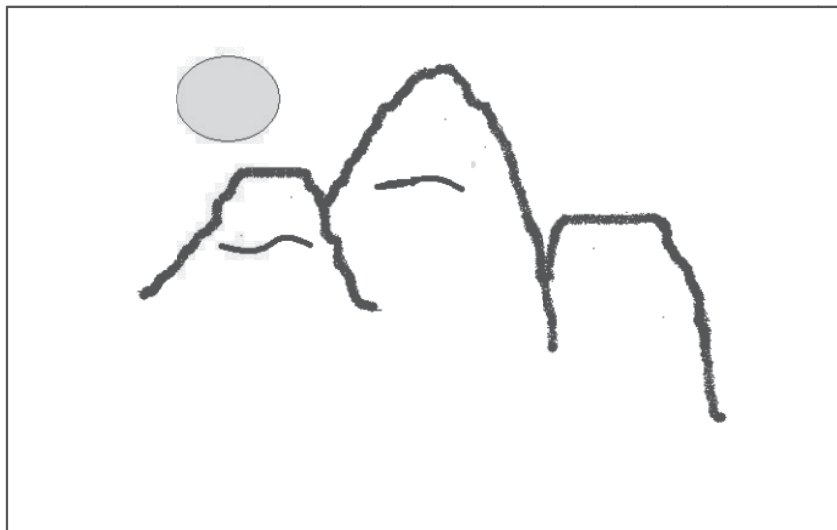


Figure 1: Caption of Example Figure

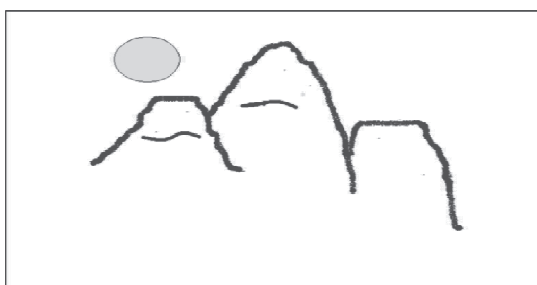


Figure 2: Caption of Example Figure

Table 2 Title of Example Table

AAA	Type X			
	Item 1	Item 2	Item 3	Item 4
BBB	18	44	41	13
CCC	24	60	61	28

2.4 Equations

Each equation should be presented on a separate line from the text with a blank space above and below. Equations should be clear and expressions used should be explained in the text. Type all equations. Flush the body of

equation to left. Equations should be numbered in parentheses. Type equation numbers in Arabic numerals in parentheses. Example:

$$x^2 + y^2 + z^2 = 1 \quad (1)$$

2.5 Citation in text

Citation in text should be cited in numerical order and according to their order of appearance. They should be numbered and enclosed in brackets.

In the case of two citations, the numbers should be separated by a comma [6,7]. In the case of more than two citations, the numbers should be separated by a dash [8-10].

3. PAPER SUBMISSION

Submission of a paper implies: that the work described has not been published before; that it is not under consideration for publication anywhere else; that its publication has been

approved by all co-authors, if any, as well as by the responsible authorities — tacitly or explicitly — at the institute where the work has been carried out. The publisher will not be held legally responsible should there be any claims for compensation.

Authors wishing to include figures, tables, or text passages that have already been published elsewhere are required to obtain permission from the copyright owner(s) and to include evidence that such permission has been granted when submitting their papers. Any material received without such evidence will be assumed to originate from the author(s).

The full paper has to be submitted by electronic format at the Kasetsart Journal web site <https://www.tci-thaijo.org/index.php/kuengj>

4. PERMISSIONS

Authors are responsible for obtaining the necessary permissions to quote or reproduce material, including figures, from already published works, and to reprint from other publications. An appropriate credit must be included. Neither the Kasetsart Journal editorial organiser nor the Publisher is responsible for clearing any permission on your behalf.

5. CONCLUSION

Conclusions should state concisely the most important propositions of the paper as well as the author's views of the practical implications of the results. Do not replicate the abstract as

the conclusion. A conclusion might elaborate on the importance of the work or suggest applications and extensions.

REFERENCES

(a) Journal article

Harris M, Karper E, Stacks G, Hoffman D, DeNiro R, and Cruz P (2001). Writing labs and the Hollywood connection. *Journal of Film Writing*, 44: 213-245.

(b) Book (authored) et al.

- [1] Calfee RC, Valencia RR (1991). APA Guide to Preparing Manuscripts for Journal Publication. Washington, DC: American Psychological Association.

(c) Book chapter

O'Neill JM, Egan J (1992). Men's and women's gender role journeys: metaphor for healing, transition, and transformation. In: Wainrib BR (ed), *Gender Issues Across the Life Cycle* (pp. 107-123). New York: Springer.

(d) Paper presented at a conference

- [2] Phelan JC, Link BG, Stueve A, Pescosolido BA (1996). Have public conceptions of mental health changed in the past half century? Does it matter? Paper presented at the 124th Annual Meeting of the American Public Health Association, New York.

(e) Paper in proceedings

- [3] Mahdavi A, Spasojevic B (2007). Incorporating simulation into building systems control logic. In: Proceedings of the 10th International Building Performance Simulation Association Conference and Exhibition (BS2007), Beijing, China, pp.1175-1181.

(f) Thesis or Dissertation

- [4] Yang X (1999). Study of building material emissions and indoor air quality. PhD Dissertation, Building Technology Program, Department of Architecture, Massachusetts Institute of Technology, USA.

(g) Newspaper article

Di Rado A (1995, March 15). Trekking through college: classes explore modern society using the world of Star Trek. Los Angeles Times, p. A3.

(h) Patent

- [5] Dong J, Martin S and Waldo P. Method and system for dynamically presenting cluster analysis results. US Patent, US6380937B1, 2002-3-30.

(i) Non-English publication

Jiang Y et al. (2004). Liquid desiccant air-conditioning system and its applications, Heating Ventilating & Air Conditioning, 34(11): 88-97. (in Chinese).

(j) Online document

- [6] Doe J (1999). Title of subordinate document. In: The dictionary of substances and their effects. Royal Society of Chemistry. Available via DIALOG. <http://www.rsc.org/dose/title>. Accessed 15 Jan. 1999.