

Journal of Engineering and Digital Technology (JEDT)

Thai-Nichi Institute of Technology

Vol.10 No.2

July - December 2022



วารสารวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีดิจิทัล
สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น
ปีที่ 10 ฉบับที่ 2 กรกฎาคม - ธันวาคม 2565

ISSN 2774-0617 (Online)

วารสารวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีดิจิทัล

Journal of Engineering and Digital Technology (JEDT)

ปีที่ 10 ฉบับที่ 2 กรกฎาคม – ธันวาคม 2565 Vol. 10 No. 2 July - December 2022

ISSN (Online) 2774-0617

ความเป็นมา

ด้วยสถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น มีนโยบายสนับสนุนการเผยแพร่บทความจากผลงานวิจัยที่มีคุณภาพ เพื่อเป็นประโยชน์ในการพัฒนาความรู้แก่สังคม โดยเฉพาะภาคธุรกิจและอุตสาหกรรม จึงได้จัดทำวารสารวิชาการ คือ วารสารวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีดิจิทัล (เดิมชื่อ วารสารสถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น : วิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี)

วัตถุประสงค์

1. เพื่อส่งเสริมและเผยแพร่ผลงานวิจัยสาขาวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีที่มีคุณภาพ
2. เพื่อเป็นสื่อกลางในการแลกเปลี่ยนองค์ความรู้ทางการวิจัยในสาขาวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี
3. เพื่อพัฒนาศักยภาพทางการวิจัยสาขาวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี

ที่ปรึกษา

รองศาสตราจารย์กฤษดา วิศวธีรานนท์

ขอบเขตเนื้อหา

บทความวิจัยทางด้านวิทยาศาสตร์ วิศวกรรมศาสตร์ และเทคโนโลยี ได้แก่ เทคโนโลยีวิศวกรรม เทคโนโลยีอุตสาหกรรม เทคโนโลยีวัสดุศาสตร์ เทคโนโลยีสารสนเทศ วิทยาศาสตร์ประยุกต์ วิทยาศาสตร์กายภาพ วิทยาศาสตร์ชีวภาพ วิทยาการคอมพิวเตอร์ วิทยาศาสตร์เคมี และสาขาอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง

กำหนดออกเผยแพร่

วารสารตีพิมพ์เผยแพร่ราย 6 เดือน (ปีละ 2 ฉบับ)

- ฉบับที่ 1 มกราคม – มิถุนายน
- ฉบับที่ 2 กรกฎาคม – ธันวาคม

เจ้าของ

สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น (Thai-Nichi Institute of Technology : TNI)

1771/1 ถนนพัฒนาการ แขวงสวนหลวง เขตสวนหลวง กรุงเทพฯ 10250

1771/1 Pattanakarn Rd., Suanluang, Bangkok 10250

บรรณาธิการ

รองศาสตราจารย์ ดร.รัตติกกร วรากุลศิริพันธุ์

สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น

กองบรรณาธิการ

- | | |
|---|--|
| 1. ศาสตราจารย์ ดร.ธนารักษ์ อีระมันคง | สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร |
| 2. ศาสตราจารย์ ดร.โกสินทร์ จำนงไทย | มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ |
| 3. ศาสตราจารย์ ดร.บุญเจริญ ศิริเนาวกุล | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี |
| 4. ศาสตราจารย์ ดร.อภิรักษ์ ชาญยานนท์ | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี |
| 5. ศาสตราจารย์ ดร.วรงค์ ตั้งศรีรัตน์ | สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง |
| 6. ศาสตราจารย์ ดร.ประยุทธ์ อัครเอกผาลิน | สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง |
| 7. ศาสตราจารย์ ดร.มานะ ศรียุทธศักดิ์ | จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย |
| 8. รองศาสตราจารย์ ดร.จิรเดช เสี่ยงศักดิ์ | มหาวิทยาลัยขอนแก่น |
| 9. รองศาสตราจารย์ ดร.ปริทรรศน์ พันธุบรรยงก์ | สถาบันการจัดการปัญญาภิวัฒน์ |
| 10. รองศาสตราจารย์ ดร.ชุมพล อัครเสน | สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น |

คณะกรรมการดำเนินงาน

- | | |
|---|-------------------------------|
| 1. รองศาสตราจารย์ ดร.วรากร ศรีเชวงทรัพย์ | 8. นางสาวจุฑามาศ ประสพสันต์ |
| 2. รองศาสตราจารย์ ดร.วุฒิ สุขเจริญ | 9. นางสาวสุพิศ บายคายคม |
| 3. รองศาสตราจารย์ ดร.จินตวัฒน์ ไชยชนะวงศ์ | 10. นางสาวจรรย์ นารินทร์ |
| 4. ดร.ประมุข บุญเสียง | 11. นายอภิรา พรหมสุทธิ |
| 5. ดร.ศรายุทธ นนท์ศิริ | 12. นางสาวพิมพ์รต พิพัฒน์กุล |
| 6. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ อมราวดี ทัพพุน | 13. นางสาวอาริสสา จิระเวชถาวร |
| 7. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปณณทัต จอมจักร์ | |

การติดต่อกองบรรณาธิการ

1771/1 ถนนพัฒนาการ แขวงสวนหลวง เขตสวนหลวง กรุงเทพฯ 10250

Tel. 0-2763-2600 (Ext. 2704, 2752)

Website : <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/TNIJournal>

E-mail : JEDT@tni.ac.th

บทความวิจัยที่ตีพิมพ์ในวารสารฉบับนี้เป็นความคิดเห็นส่วนตัวของผู้เขียน

กองบรรณาธิการไม่มีส่วนรับผิดชอบใด ๆ ถือเป็นความรับผิดชอบของผู้เขียนแต่เพียงผู้เดียว

บทบรรณาธิการ

กองบรรณาธิการ วารสารวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีดิจิทัล (JEDT) มีความยินดีอย่างยิ่งที่วารสารได้รับความสนใจและการยอมรับ จากนักวิจัย อาจารย์ และนักศึกษา ส่งผลงานมารับการพิจารณาจำนวนมาก ด้วยระบบการประเมินบทความที่ได้มาตรฐานสากลจากผู้ทรงคุณวุฒิเฉพาะทาง ทำให้มั่นใจได้ว่าบทความที่ได้รับการคัดเลือกให้ตีพิมพ์ในวารสาร JEDT ที่ผ่านมารวมถึงปีที่ 10 ฉบับที่ 2 (กรกฎาคม - ธันวาคม 2565) นี้ ทุกบทความมีคุณภาพสูงเป็นที่ยอมรับในวงวิชาการ

นโยบายของวารสารยังคงเดิมที่รับบทความที่เป็นทั้งภาษาไทย และภาษาอังกฤษ ภายใต้การรับรองของ TCI (Thai-Journal Citation Index Centre) ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์ในวารสารฉบับนี้ จึงสามารถนำไปใช้ประกอบการสำเร็จการศึกษา หรือใช้ในการขอตำแหน่งทางวิชาการได้

ทางกองบรรณาธิการหวังว่า บทความที่ได้รับการตีพิมพ์ในวารสารฉบับนี้ จะเป็นประโยชน์ทั้งต่อเจ้าของบทความ นักวิจัย นักศึกษา และก่อให้เกิดประโยชน์ต่อวงการวิชาการและวิจัยของประเทศ

รองศาสตราจารย์ ดร.รัตติกกร วรากุลศิริพันธุ์
บรรณาธิการ

Editorial Message

Editorial Team of the Journal of Engineering and Digital Technology (JEDT) is delighted that the journal has attracted attention and recognition from researchers, professors, and students, submitting a lot number of researched articles for consideration. All submitted articles are reviewed and evaluated by qualified experts to meet national and international standards. This is to ensure that all articles selected for publication in the JEDT journal in the past, including this issue; Vol. 10 No. 2: July - December 2022, are of high quality and are accepted by the academic community.

The policy of the journal remains the same for accepting articles in both Thai and English languages under the accreditation of TCI (Thai-Journal Citation Index Centre). Therefore, the accepted articles that be published in this journal can be used for graduation and/or can be used to apply for academic position.

The editorial team hope that all articles that have been published in this journal, will be beneficial to authors, researchers, students, academy and research of the country.

Assoc.Prof. Dr.Ruttikorn Varakulsiripunth
Editor-in-Chief

สารบัญ

- 1 **Analysis of Disease Spread with Mathematical Models for Foot and Mouth Disease in Thailand**
Chayanusaphat Rattanaworawong
- 13 **Buckling of Square Plates with Different Central Cutouts**
Ek-u Thammakornbunjut, Pongkorn Meelapchotipong, Jongsak Pakpia, Sarocha Tammapattaragul, Paiboon Limpitipanich
- 21 **Deep Learning and Image Processing for Disc Brake Pad Identification: A Case Study of Brake Pads Company**
Nicha Khathinhorm, Rungrod Samankitesakul, Wasakorn Laesanklang, Banpot Horbanluekit, Somkid Amornsamankul
- 32 **Layout Design and Storage Relocation for Warehouse Efficiency Improvement in Warehouse: A Case Study of a Public Hospital**
Ratthaprasat Rakbanglaem, Akkaranan Pongsathornwiwat
- 46 **Performance Evaluation of Modified Tree Algorithm for Supporting Traffic with Different Priority Requirements**
Warakorn Srichavengsup, Kanticha Kittipeerachon
- 57 **Performance Improvement of Tree Algorithm Using Adaptive Splitting Algorithms**
Warakorn Srichavengsup, Kanticha Kittipeerachon
- 66 **Production of Activated Carbon from Coconut Coir Using Chemical Activation at Low Temperature under Limited Air Condition for Methylene Blue Adsorption**
Narong Chaisongkroh, Sutarawadee Sukawanawat, Benjapon Chalermssinsuwan, Sasithorn Sunphorka

- 81 **The Design and Control for the Balancing Robot with PD and LQR Controller Using Program Simulink**

Kritchanan Charoensuk, Kamolwan Wongwut, Daungkamol angamnuaysiri, Kanchit Pawanonont

- 97 **The Development of Geo-Names Extraction from Twitter Texts Data by Conditional Random Fields**

Tuvachit Chalamkate, Chanin Thinnachote, Attapol Thamrongrattanarit

- 110 **Universal Filter with Single Input and Five Outputs Employing VDTAs**

Jirapun Pimpol, Chakkrich Panrueansan, Orapin Channumsin, Worapong Tangsirat

การวิเคราะห์การแพร่กระจายของโรคด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับ โรคปากและเท้าเปื่อยในประเทศไทย

ชญาณัฐ ศักดิ์ รัตนวรวงศ์*

*สาขาวิชาคณิตศาสตร์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา, พระนครศรีอยุธยา, ประเทศไทย

*ผู้ประพันธ์บรรณกิจ อีเมล: pormarch@yahoo.co.th

รับต้นฉบับ: 10 ตุลาคม 2565; รับบทความฉบับแก้ไข: 24 พฤศจิกายน 2565; ตอบรับบทความ: 24 พฤศจิกายน 2565

เผยแพร่ออนไลน์: 22 ธันวาคม 2565

บทคัดย่อ

โรคปากและเท้าเปื่อยเป็นโรคที่ติดต่อกันที่พบบ่อยในสัตว์ที่มีการแพร่ระบาดได้ในช่วงปลายฝนต้นหนาวของทุกปี ซึ่งเกิดจากเชื้อไวรัส แอฟโท มีทั้งหมด 7 ชนิดคือ ชนิด A, O, C, SAT 1, SAT 2, SAT 3 และ Asia 1 สำหรับในประเทศไทยพบเพียง 3 ชนิด คือ ชนิด A, O และ Asia 1 ไวรัสชนิดนี้ถูกพบได้ในสัตว์ที่มีการติดเชื้อมานานและน้ำเชื้อในสัตว์ติดเชื้อมีความสำคัญของการระบาดโรค ผู้วิจัยจึงได้ทำการศึกษาปัญหาจากข้อมูลรายงานสถานการณ์การระบาดของโรคปากและเท้าเปื่อยในช่วงปี พ.ศ. 2556-2565 พร้อมทั้งวิเคราะห์และหาวิธีการแก้ปัญหา โดยการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโรคปากและเท้าเปื่อย พิจารณาหาจุดสมดุลของแบบจำลองและพิจารณาหาผลเฉลยเชิงตัวเลข พร้อมทั้งหาเงื่อนไขที่ทำให้เกิดความเสถียรภาพภายในของจุดสมดุลภายใต้สภาวะการระบาดไร้โรค และสภาวะการระบาดเรื้อรัง แล้วนำมาแสดงในรูปแบบของค่าสืบพันธุ์พื้นฐาน ซึ่งผลลัพธ์เชิงตัวเลขนำมาวิเคราะห์การควบคุมของโรค และเป็นแนวทางสำหรับลดการระบาดของโรคปากและเท้าเปื่อย

คำสำคัญ: ค่าสืบพันธุ์พื้นฐาน จุดสมดุลภายใต้สภาวะการระบาดเรื้อรัง จุดสมดุลภายใต้สภาวะการระบาดไร้โรค ความเสถียรภาพ



Analysis of Disease Spread with Mathematical Models for Foot and Mouth Disease in Thailand

Chayanusaphat Rattanaworawong*

**Department of Mathematics, Faculty of Science and Technology, Phranakorn Si Ayutthaya Rajabhat University,
Phra Nakhon Si Ayutthaya, Thailand*

*Corresponding Author. E-mail address: pormarch@yahoo.co.th

Received: 10 October 2022; Revised: 24 November 2022; Accepted: 24 November 2022

Published online: 22 December 2022

Abstract

Foot and mouth disease is a contagious disease of animals. It was found that it spreads out in the late rainy season and the early winter in every year. It is caused by seven aphthoviruses: A, O, C, SAT 1, SAT 2, SAT 3 and Asia 1. In Thailand, only three aphthoviruses was found (i.e., A, O and Asia 1). These viruses were found in the secretions, milk and semen of the infected animals. Since the pandemic is significant, we studied the problems from the reports of the pandemic of the foot and mouth disease from 2013–2022, analyzed and searched for the solutions by creating the mathematical model(s) of the foot and mouth disease, finding the balance point(s) of the model(s), considering the numerical results and identifying the conditions of the stability(ies) of disease free equilibrium state and disease endemic equilibrium state. The results were shown in the form of basic reproductive numbers. The numerical results were analyzed for controlling the disease and providing the guidelines for reducing the pandemic of the foot and mouth disease.

Keywords: Basic reproductive numbers, Disease endemic equilibrium state, Disease free equilibrium state, Stability

1) บทนำ

โรคปากและเท้าเปื่อย (Foot and Mouth Disease: FMD) หรือที่นิยมเรียกกันว่า “โรคกบ” หรือ “โรคเฝอเอ็มดี” เป็นโรคสำคัญที่เกิดขึ้นในสัตว์กบคู่ อาทิเช่น โค กระบือ แพะ แกะ สุกร เป็นต้น โรคปากและเท้าเปื่อยมีผลกระทบต่อภาคอุตสาหกรรม การผลิตสัตว์และเศรษฐกิจของประเทศไทยเป็นอย่างสูง

โรคปากและเท้าเปื่อย มีสาเหตุมาจากเชื้อไวรัสแอฟโฟ จัดอยู่ในกลุ่ม Picornavirus ขนาด 28 nm รูปร่างแบบ icosahedral Single-stranded RNA, 8.4 kb ปัจจุบันมีทั้งหมด 7 ชนิด คือ ชนิด A, O, C, SAT 1, SAT 2, SAT 3 และ Asia 1 สำหรับในประเทศไทย พบเพียง 3 ชนิด คือ ชนิด A, O และ Asia 1 ไวรัสชนิดนี้ถูกพบได้ในสัตว์ที่มีการติดเชื้อ และยังพบได้ในน้ำนมและน้ำเชื้อในสัตว์ติดเชื้อมันในระยะเวลา 4 วันก่อนที่จะแสดงอาการของการติดเชื้อ สัตว์ที่พ้นจากการติดเชื้อยังเป็นพาหะของไวรัสชนิดนี้ด้วย

อาการของสัตว์ที่ได้รับเชื้อโรคปากและเท้าเปื่อย จะพบได้หลังจากมีการรับเชื้อไวรัสไปแล้วประมาณ 2-8 วัน ซึ่งเป็นระยะฟักตัวของเชื้อโรค สัตว์ที่ได้รับเชื้อจะแสดงอาการซึม ไข้สูง น้ำลายไหล มีเม็ดตุ่มใส พุพอง เกิดขึ้นภายในปาก ลิ้น เหงือก เพดานปาก ข้างแก้ม ซอกกีบ ต่อมาเม็ดตุ่มจะแตกเป็นแผล สัตว์แสดงอาการ ขาเจ็บ เดินกะเผลก น้ำลายไหลมากขึ้น มีแผลในปาก ลิ้น เท้า และหัวนม สัตว์ที่ติดเชื้อแสดงอาการความรุนแรงแตกต่างกันขึ้นอยู่กับภูมิคุ้มกันโรค ความแข็งแรงของสัตว์ และปริมาณเชื้อโรค โรคปากและเท้าเปื่อยพบอัตราการป่วยค่อนข้างสูง แต่อัตราการเสียชีวิตต่ำ มักพบการเสียชีวิตในลูกสัตว์ขนาดเล็ก ซึ่งเกิดจากสภาวะกลืนเนื้อหัวใจตายในโคนม อัตราการให้นมจะลดลงและจะหยุดการให้นมในที่สุด ส่วนในสัตว์ที่มีการตั้งครรภ์อาจทำให้เกิดการแท้งคุกคามและยังส่งผลต่อการผสมพันธุ์ครั้งถัดไปอาจจะมีผลสืบเนื่องมา สำหรับในโคนมจะส่งผลกระทบต่อภาระเลี้ยงและการเจริญเติบโตของสัตว์ นอกจากนี้สัตว์บางตัวอาจไม่สามารถกลับมาผลิตได้เหมือนเดิม หากในสัตว์ที่ไม่ได้รับการฉีดวัคซีนจะแสดงอาการรุนแรงและต้องใช้เวลาในการฟื้นฟูสุขภาพนานมาก

สัตว์ที่ได้รับเชื้อชนิด A, O และ Asia 1 จะทำให้สัตว์ป่วยแสดงอาการเหมือนกัน แต่ไม่สามารถให้ภูมิคุ้มกันต่างชนิดได้ นั่นคือถ้าสัตว์ที่ได้รับวัคซีนโรคปากและเท้าเปื่อยชนิด A หรือสัตว์เคยป่วยเป็นโรคปากและเท้าเปื่อยชนิด A มาก่อน สัตว์จะมีภูมิคุ้มกันเฉพาะต่อโรคปากและเท้าเปื่อยชนิด A เท่านั้น แต่จะไม่มีภูมิคุ้มกันต่อโรคปากและเท้าเปื่อยชนิด O หรือชนิด Asia 1 ดังนั้นหากมีโรค

ปากและเท้าเปื่อยชนิด O หรือชนิด Asia 1 ระบาด สัตว์ก็อาจจะติดโรคปากและเท้าเปื่อยชนิดนี้ได้

การติดต่อและการแพร่กระจายของเชื้อโรค สามารถแพร่กระจายได้โดยการสัมผัสโดยตรง การเคลื่อนย้ายสัตว์พาหะ อาหารที่ปนเปื้อนเชื้อ ส่วนปัจจัยการติดต่อนับอยู่กับปริมาณไวรัสที่สัตว์ได้รับเข้าสู่ร่างกายและทำให้เกิดโรค ความไวต่อการติดโรค เช่น โค กระบือ จะไวต่อการติดเชื้อ สุกรติดเชื้อได้บางสายพันธุ์ แกะ ติดโรคได้ง่ายแต่ไม่แสดงอาการและระดับภูมิคุ้มกันในตัวสัตว์ที่เกิดจากการฉีดวัคซีน

2) ข้อมูลการวิจัย

สำหรับข้อมูลการระบาดของโรคนี้ พบมีการรายงานสถานการณ์การระบาดของโรคจากศูนย์สารสนเทศเพื่อเฝ้าระวังและควบคุมโรคระบาดสัตว์ สำนักควบคุม ป้องกันและบำบัดโรคสัตว์ กรมปศุสัตว์ ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 : จำนวนรายงานสถานการณ์การระบาดของโรคปากและเท้าเปื่อย ในช่วงปี พ.ศ. 2556-2565 แยกเป็นรายปี ข้อมูลถึงเดือน กันยายน 2565

ปี	ชนิด A	ชนิด O	ไม่ทราบชนิด	รวม
2556	23	1	5	29
2557	65	67	33	165
2558	17	126	44	187
2559	42	166	51	259
2560	12	59	21	92
2561	37	60	16	113
2562	22	107	31	160
2563	-	129	46	175
2564	11	15	17	43
2565	11	19	17	47
รวมทั้งหมด	240	749	281	1,270

จากข้อมูลรายงานสถานการณ์การระบาดของโรคปากและเท้าเปื่อยในช่วงปี พ.ศ. 2556-2565 พบว่าในประเทศไทยจะพบโรคปากและเท้าเปื่อยชนิด O มากที่สุดและช่วงการระบาดของโรคนี้จะมีมากในช่วงปลายฝนต้นหนาวของทุกปี และปัจจุบันไม่พบชนิด Asia 1 ระบาดในประเทศไทยมาตั้งแต่ต้นปี พ.ศ. 2541 จนกระทั่งทุกวันนี้ [1]-[2]

ได้มีการศึกษาเกี่ยวกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโรคปากและเท้าเปื่อยในปี พ.ศ. 2548 โดย Keeling ได้อธิบายถึง

การนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ไปใช้ในการแก้ปัญหาการระบาดของโรคเท้าและปากเปื่อย [3] ในปี พ.ศ. 2554 โดย Mushayabasa และคณะ ได้ทำการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และวิเคราะห์แบบจำลอง [4] แล้วในปี พ.ศ. 2564 โดย Chanchaidechachai และคณะ ได้ศึกษาแบบจำลองเชิงพื้นที่ของการระบาดของโรคปากและเท้าเปื่อย [5] และแบบจำลอง [6]–[9] เป็นแบบจำลองที่ใช้สำหรับการศึกษาโรคเท้าและปากเปื่อย มีการสร้างแบบจำลองในรูปแบบที่ต่างกัน ความเสี่ยงในการแพร่ระบาดของโรคภายใต้วิธีการควบคุม และผลกระทบของปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อมต่าง ๆ เช่น ฤดูกาล สภาพภูมิอากาศในการระบาด

ด้วยเล็งเห็นความสำคัญของสถานการณ์การระบาดของโรค ผู้วิจัยจึงได้ทำการศึกษาปัญหาจากข้อมูลรายงานสถานการณ์การระบาดของโรคปากและเท้าเปื่อยในช่วงปี พ.ศ. 2556–2565 พร้อมทั้งวิเคราะห์และหาวิธีการแก้ปัญหา โดยการปรับปรุงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับโรคปากและเท้าเปื่อยของ S. Mushayabasa ในปี 2544 ทำการวิเคราะห์ความเสถียรภาพภายในและความเสถียรภาพวงกว้างของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ตรวจสอบค่าพารามิเตอร์ที่มีส่งผลต่อค่าสืบพันธุ์พื้นฐาน ที่เป็นตัวชี้วัดในการที่จะสามารถควบคุมการระบาดของโรคนี้ได้ เพื่อนำไปใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้นในการป้องกันโรค ลดจำนวนการระบาด และใช้เป็นข้อมูลทางวิชาการควบคู่กับสถิติการเกิดโรคของประเทศไทยทั่วภูมิภาคของโรคที่เฝ้าระวัง ของศูนย์สารสนเทศเพื่อเฝ้าระวังและควบคุมโรคระบาดสัตว์ สำนักควบคุม ป้องกัน และบำบัดโรคสัตว์ กรมปศุสัตว์

3) การดำเนินงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยจำแนกกลุ่มประชากรของสัตว์ออกเป็น 5 กลุ่ม ได้แก่ ประชากรสัตว์ที่เสี่ยงต่อการติดเชื้อโรค, ประชากรสัตว์ที่ติดเชื้อแต่ไม่สามารถถ่ายทอดเชื้อได้, ประชากรสัตว์ที่ติดเชื้อและสามารถถ่ายทอดเชื้อได้, ประชากรสัตว์ที่ฟื้นจากการติดเชื้อ และประชากรสัตว์ที่มีสภาวะภูมิคุ้มกัน ซึ่งจะทำการหาจุดสมดุล เพื่อวิเคราะห์ตัวแบบทางคณิตศาสตร์โดยกำหนดให้ความหมายของสัญลักษณ์ดังตารางที่ 2 [3]–[13]

ตารางที่ 2 : สัญลักษณ์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโรคปากและเท้าเปื่อย

สัญลักษณ์	คำอธิบาย
S_{NF}	จำนวนของประชากรสัตว์ที่เสี่ยงต่อการติดเชื้อโรค
E_{NF}	จำนวนของประชากรสัตว์ที่ติดเชื้อแต่ไม่สามารถถ่ายทอดเชื้อได้
I_{NF}	จำนวนของประชากรสัตว์ที่ติดเชื้อและสามารถถ่ายทอดเชื้อได้
R_{NF}	จำนวนของประชากรสัตว์ที่ฟื้นจากการติดเชื้อ
V_{NF}	จำนวนของประชากรสัตว์ที่มีสภาวะภูมิคุ้มกัน
N	จำนวนของประชากรสัตว์ทั้งหมด
P	อัตราการเกิดประจําปีของประชากรสัตว์
μ	อัตราการตายโดยธรรมชาติของประชากรสัตว์
σ	อัตราการเปลี่ยนกลุ่มจากกลุ่มประชากรสัตว์ที่ฟื้นจากการติดเชื้อไปกลุ่มประชากรสัตว์ที่เสี่ยงต่อการติดเชื้อโรค
τ_1	อัตราการฉีดวัคซีน
τ_2	อัตราการลดลงของภูมิคุ้มกัน
q_1	อัตราการแพร่เชื้อ
q_2	อัตราการเปลี่ยนกลุ่มจากกลุ่มประชากรสัตว์ที่ติดเชื้อแต่ไม่สามารถถ่ายทอดเชื้อได้ไปกลุ่มประชากรสัตว์ที่ติดเชื้อและสามารถถ่ายทอดเชื้อได้
θ	อัตราการเสียชีวิตจากโรค
α	อัตราการฟื้นจากการติดเชื้อ

เราสามารถสร้างระบบสมการเชิงอนุพันธ์เพื่ออธิบายการแพร่กระจายของโรคปากและเท้าเปื่อยได้ดังนี้

$$\frac{d}{dt} S_{NF} = pN - \mu S_{NF} + \sigma R_{NF} + \tau_2 V_{NF} - \tau_1 S_{NF} - q_1 E_{NF} S_{NF} \quad (1)$$

$$\frac{d}{dt} E_{NF} = q_1 E_{NF} S_{NF} - \mu E_{NF} - \theta E_{NF} - q_2 E_{NF} I_{NF} \quad (2)$$

$$\frac{d}{dt} I_{NF} = q_2 E_{NF} I_{NF} - \mu I_{NF} - \theta I_{NF} - \alpha I_{NF} \quad (3)$$

$$\frac{d}{dt} R_{NF} = \alpha I_{NF} - \mu R_{NF} - \sigma R_{NF} \quad (4)$$

$$\frac{d}{dt} V_{NF} = \tau_1 S_{NF} - \tau_2 V_{NF} - \mu V_{NF} - \theta V_{NF} \quad (5)$$

3.1) จุดสมดุล

พิจารณาจุดสมดุล ($S_{NF}^*, E_{NF}^*, I_{NF}^*, R_{NF}^*, V_{NF}^*$) ได้จากการกำหนดให้ขวามือของสมการ (1)–(5) ให้เท่ากับ 0 จะได้จุดสมดุล 2 จุดคือจุดสมดุลภายใต้สภาวะการระบาดไร้โรค

$$E_1 \left(\frac{Np(\theta + \mu + \tau_2)}{(\theta + \mu)\tau_1 + \mu(\theta + \mu)}, 0, 0, 0, \frac{Np\tau_1}{(\theta + \mu)\tau_1 + \mu(\theta + \mu)} \right)$$

และสภาวะการระบาดเรื้อรัง $E_2 (S_{NF}^*, E_{NF}^*, I_{NF}^*, R_{NF}^*, V_{NF}^*)$ เมื่อ

$$\begin{aligned} S_{\text{NF}}^* &= \frac{\left(Npq_2 \begin{pmatrix} \mu+ \\ \sigma \end{pmatrix} - \alpha\sigma \begin{pmatrix} \theta+ \\ \mu \end{pmatrix} \right) \begin{pmatrix} \theta+ \\ \mu \end{pmatrix}}{\left(\alpha\mu + \begin{pmatrix} \theta+ \\ \mu \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mu+ \\ \sigma \end{pmatrix} \right) q_1 \begin{pmatrix} \theta+ \\ \mu \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \mu+ \\ \sigma \end{pmatrix} q_2 \left(\begin{pmatrix} \theta+ \\ \mu \end{pmatrix} \tau_1 + \mu \begin{pmatrix} \theta+ \\ \mu \end{pmatrix} \right)} \\ E_{\text{NF}}^* &= \frac{\alpha + \theta + \mu}{q_2} \\ I_{\text{NF}}^* &= \frac{\begin{pmatrix} \mu+ \\ \sigma \end{pmatrix} \left(q_1 \left(Npq_2 - \begin{pmatrix} \theta+ \\ \mu \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \theta \\ \mu \end{pmatrix} \right) \begin{pmatrix} \theta \\ \mu \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \theta+ \\ \mu \end{pmatrix} q_2 \begin{pmatrix} \theta+ \\ \mu \end{pmatrix} \tau_1 + \mu \begin{pmatrix} \theta+ \\ \mu \end{pmatrix} \right)}{q_2 \left(\alpha\mu + \begin{pmatrix} \theta+ \\ \mu \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mu+ \\ \sigma \end{pmatrix} \right) q_1 \begin{pmatrix} \theta \\ \mu \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \mu+ \\ \sigma \end{pmatrix} q_2 \left(\begin{pmatrix} \theta+ \\ \mu \end{pmatrix} \tau_1 + \mu \begin{pmatrix} \theta \\ \mu \end{pmatrix} \right)} \\ R_{\text{NF}}^* &= \frac{\alpha \left(q_1 \left(Npq_2 - \begin{pmatrix} \theta+ \\ \mu \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \theta \\ \mu \end{pmatrix} \right) \begin{pmatrix} \theta \\ \mu \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \theta+ \\ \mu \end{pmatrix} q_2 \left(\begin{pmatrix} \theta+ \\ \mu \end{pmatrix} \tau_1 + \mu \begin{pmatrix} \theta \\ \mu \end{pmatrix} \right) \right)}{q_2 \left(\alpha\mu + \begin{pmatrix} \theta+ \\ \mu \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mu+ \\ \sigma \end{pmatrix} \right) q_1 \begin{pmatrix} \theta \\ \mu \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \mu+ \\ \sigma \end{pmatrix} q_2 \left(\begin{pmatrix} \theta+ \\ \mu \end{pmatrix} \tau_1 + \mu \begin{pmatrix} \theta \\ \mu \end{pmatrix} \right)} \\ V_{\text{NF}}^* &= \frac{\tau_1 (Np(\mu + \sigma)q_2 - \alpha\sigma(\theta + \mu))}{\left(\alpha\mu + \begin{pmatrix} \theta+ \\ \mu \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mu+ \\ \sigma \end{pmatrix} \right) q_1 \begin{pmatrix} \theta \\ \mu \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \mu+ \\ \sigma \end{pmatrix} q_2 \left(\begin{pmatrix} \theta+ \\ \mu \end{pmatrix} \tau_1 + \mu \begin{pmatrix} \theta \\ \mu \end{pmatrix} \right)} \end{aligned}$$

3.2) วิเคราะห์ความเสถียรภาพของจุดสมดุลภายใต้สภาวะการระบาดของโรค

ความเสถียรภาพของจุดสมดุลจะพิจารณาเครื่องหมายของค่าลักษณะเฉพาะ (eigenvalue) ของเมทริกซ์จาโคเบียน จากสมการ (1)–(5) นำมาเขียนในรูปของเมทริกซ์จาโคเบียนได้ดังนี้

$$J_{\left(\begin{smallmatrix} S_{\text{NF}}^*, E_{\text{NF}}^*, I_{\text{NF}}^* \\ R_{\text{NF}}, V_{\text{NF}} \end{smallmatrix}\right)} = \begin{bmatrix} -\mu - \tau_1 & -q_1 S_{\text{NF}}^* & 0 & \sigma & \tau_2 \\ -q_1 E_{\text{NF}}^* & & & & \\ q_1 E_{\text{NF}}^* & -\theta - \mu & -q_2 E_{\text{NF}}^* & 0 & 0 \\ & -q_2 I_{\text{NF}}^* & & & \\ & +q_1 S_{\text{NF}}^* & & & \\ 0 & q_2 I_{\text{NF}}^* & -\alpha - \theta & 0 & 0 \\ & & -\mu + q_2 E_{\text{NF}}^* & & \\ 0 & 0 & \alpha & -\mu & 0 \\ & & & -\sigma & \\ \tau_1 & 0 & 0 & 0 & -\theta \\ & & & & -\mu \\ & & & & -\tau_2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

ค่าลักษณะเฉพาะ สามารถหาได้จากผลเฉลยของสมการ
ลักษณะเฉพาะ

$$\det(J - \lambda I_5) = 0 \quad (7)$$

ความเสถียรภาพภายใต้จุดสมดุล

$$E_1 \left(\frac{Np(\theta + \mu + \tau_2)}{(\theta + \mu)\tau_1 + \mu \binom{\theta + \mu}{+\tau_2}}, 0, 0, 0, \frac{Np\tau_1}{(\theta + \mu)\tau_1 + \mu \binom{\theta + \mu}{+\tau_2}} \right)$$

จากการแก้สมการลักษณะเฉพาะจะได้ค่าลักษณะเฉพาะดังนี้

$$\begin{aligned}\lambda_1 &= -\alpha - \theta - \mu, \quad \lambda_2 = -\sigma - \mu, \\ \lambda_3 &= \frac{Npq_1(\theta + \mu + \tau_2) - (\theta + \mu)((\theta + \mu)\tau_1 + \mu(\theta + \mu + \tau_2))}{(\theta + \mu)\tau_1 + \mu(\theta + \mu + \tau_2)}, \\ \lambda_4 &= \frac{-\theta - 2\mu - \tau_2 - \tau_1 - \sqrt{\tau_1^2 - 2\tau_1(\theta - \tau_2) + (\theta + \tau_2)^2}}{2}, \\ \lambda_5 &= \frac{-\theta - 2\mu - \tau_2 - \tau_1 + \sqrt{\tau_1^2 - 2\tau_1(\theta - \tau_2) + (\theta + \tau_2)^2}}{2}\end{aligned}$$

ค่าลักษณะเฉพาะข้างต้นมีค่าเป็นลบ เมื่อ

$$\frac{(\theta + \mu)((\theta + \mu)\tau_1 + \mu(\theta + \mu + \tau_2))}{Npq_1} > \theta + \mu + \tau_2,$$

$$\tau_1^2 + (\theta + \tau_2)^2 > 2\tau_1(\theta - \tau_2)$$

$$\text{และ } \tau_1^2 - 2\tau_1(\theta - \tau_2) + (\theta + \tau_2)^2 < (\theta + 2\mu + \tau_2 + \tau_1)^2$$

3.3) วิเคราะห์ความเสถียรภาพของจุดสมดุลภายใต้สภาวะการ
รบกวนเรื้อรัง

ความเสถียรภาพภายใต้จุดสมดุล

$E_2(S_{NF}^*, E_{NF}^*, I_{NF}^*, R_{NF}^*, V_{NF}^*)$ จะได้สมการลักษณะเฉพาะคือ

$$\lambda^5 + b_4\lambda^4 + b_3\lambda^3 + b_2\lambda^2 + b_1\lambda + b_0 = 0 \quad (8)$$

โดยที่ $b_4 = \frac{(\alpha + \theta + \mu)q_1 + q_2(\theta + 3\mu + \sigma + \tau_1 + \tau_2)}{q_2}$

$$\begin{aligned} & \left(\begin{matrix} \alpha + \theta \\ +\mu \end{matrix} \right) q_1^2 \left(Np q_2 (\mu + \sigma) - \alpha \sigma (\theta + \mu) \right) (\theta + \mu + \tau_2) \\ & + \left(\begin{matrix} \alpha \\ +\theta \\ +\mu \end{matrix} \right) (\mu + \sigma) q_2 \left(q_1 \left(\begin{matrix} \theta \\ +\mu \end{matrix} \right) \left(\begin{matrix} \alpha \\ +\theta \\ +\mu \end{matrix} \right) - Np q_2 \right) \left(\begin{matrix} \theta \\ +\mu \\ +\tau_2 \end{matrix} \right) \\ & + \left(\begin{matrix} \theta \\ +\mu \end{matrix} \right) q_2 \left((\theta + \mu) \tau_1 + \mu \left(\begin{matrix} \theta + \mu \\ +\tau_2 \end{matrix} \right) \right) \\ & + \left(\begin{matrix} \mu \\ +\sigma \end{matrix} \right) \left(\begin{matrix} \alpha \\ +\theta \\ +\mu \end{matrix} \right) q_1 + q_2 \left(\begin{matrix} \mu \\ +\tau_1 \end{matrix} \right) \\ & + \left(\begin{matrix} \mu \\ +\sigma \end{matrix} \right) q_2 \left(\begin{matrix} \theta \\ +\mu \\ +\mu \\ +\tau_2 \end{matrix} \right) \\ & + \left(\begin{matrix} \alpha \\ +\theta \\ +\mu \end{matrix} \right) q_1 + q_2 \left(\begin{matrix} 2\mu \\ +\sigma \\ +\tau_1 \end{matrix} \right) \left(\begin{matrix} \theta \\ +\mu \\ +\tau_2 \end{matrix} \right) \\ & + \left(\begin{matrix} \mu \\ +\sigma \end{matrix} \right) q_2 \left(\begin{matrix} \theta \\ +\mu \\ +\mu \\ +\tau_2 \end{matrix} \right) \end{aligned}$$

$$b_3 = \frac{-q_2 \tau_1 \tau_2 \left(\alpha \mu + \binom{\theta}{+\mu} \binom{\alpha}{+\mu} \right) q_1 \binom{\theta}{+\mu} + \binom{\mu}{+\sigma} q_2 \binom{\theta}{+\mu} \binom{\theta}{+\mu} \binom{\tau_1}{+\mu} \binom{\tau_2}{+\mu}}{q_2 \left(\alpha \mu + \binom{\theta}{+\mu} \binom{\alpha}{+\mu} \right) q_1 \binom{\theta}{+\mu} + \binom{\mu}{+\sigma} q_2 \binom{\theta}{+\mu} \binom{\theta}{+\mu} \binom{\tau_1}{+\mu} \binom{\tau_2}{+\mu}}$$

$$b_1 = \frac{\left(\alpha \sigma \begin{pmatrix} \mu + \\ \sigma \end{pmatrix} q_1 \begin{pmatrix} \theta \\ +\mu \\ +\tau_2 \end{pmatrix} + (\theta + \mu) q_2 \begin{pmatrix} (\theta + \mu) \tau_1 + \mu \\ +\mu \\ +\tau_2 \end{pmatrix} \right) + (\mu + \sigma)^2 \begin{pmatrix} \begin{pmatrix} \alpha \\ +\theta \\ +\mu \end{pmatrix} q_1 \begin{pmatrix} (\theta + \mu) \begin{pmatrix} \alpha \\ +\theta \\ +\mu \end{pmatrix} \\ -Npq_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \theta \\ +\mu \\ +\tau_2 \end{pmatrix} \\ + q_2 \begin{pmatrix} \mu \\ +\tau_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} (\theta + \mu) \tau_1 \\ +\mu \\ +\tau_2 \end{pmatrix} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \mu \\ +\sigma \end{pmatrix} q_2 \tau_1 \tau_2 \begin{pmatrix} q_1 \begin{pmatrix} (\theta + \mu) \begin{pmatrix} \alpha \\ +\theta \\ +\mu \end{pmatrix} - Npq_2 \end{pmatrix} (\theta + \mu + \tau_2) \\ + (\theta + \mu) q_2 \begin{pmatrix} (\theta + \mu) \tau_1 + \mu \\ +\mu \\ +\tau_2 \end{pmatrix} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \alpha \\ +\theta \\ +\mu \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \theta \\ +\mu \\ +\tau_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \begin{pmatrix} \mu \\ +\sigma \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \alpha \\ +\theta \\ +\mu \end{pmatrix} q_1 \begin{pmatrix} (\theta + \mu) \begin{pmatrix} \alpha \\ +\theta \\ +\mu \end{pmatrix} \\ -Npq_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \theta \\ +\mu \\ +\tau_2 \end{pmatrix} \\ + q_2 \begin{pmatrix} \mu \\ +\tau_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} (\theta + \mu) \tau_1 \\ +\mu \\ +\tau_2 \end{pmatrix} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \theta \\ +\mu \\ +\tau_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} q_1^2 \left(Npq_2 (\mu + \sigma) - \alpha \sigma \begin{pmatrix} \theta \\ +\mu \end{pmatrix} \right) \begin{pmatrix} \theta \\ +\mu \\ +\tau_2 \end{pmatrix} \\ + \begin{pmatrix} \mu \\ +\sigma \end{pmatrix} q_1 \begin{pmatrix} (\theta + \mu) \begin{pmatrix} \alpha \\ +\theta \\ +\mu \end{pmatrix} \\ -Npq_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \theta \\ +\mu \\ +\tau_2 \end{pmatrix} \\ + \begin{pmatrix} \mu \\ +\sigma \end{pmatrix} q_2 \begin{pmatrix} (\theta + \mu) \tau_1 \\ +\mu \\ +\tau_2 \end{pmatrix} \end{pmatrix} \right)}{q_2 \left(\alpha \mu + \begin{pmatrix} \theta \\ +\mu \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \alpha \\ +\mu \end{pmatrix} \right) q_1 \begin{pmatrix} \theta \\ +\mu \\ +\tau_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \mu \\ +\sigma \end{pmatrix} q_2 \begin{pmatrix} (\theta + \mu) \tau_1 + \mu \\ +\mu \\ +\tau_2 \end{pmatrix} \right)}$$

ค่าลักษณะเฉพาะ $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \lambda_5$ จะมีส่วนจริงเป็นลบ
เมื่อสอดคล้องกับเงื่อนไขของ Routh – Hurwitz ต่อไปนี้

$$b_0 > 0, b_4 > 0, b_3 b_4 > b_2, b_0 b_4 + b_2 b_3 b_4 > b_1 b_4^2 + b_2^2, \\ b_0 b_2 b_3 + 2b_0 b_1 b_4 + b_1 b_2 b_3 b_4 > b_0^2 + b_1 b_2^2 + b_0 b_3^2 b_4 + b_1^2 b_4^2$$

ดังนั้นจุดสมดุลภายใต้สภาวะระบาดเร็วจึงมีความเสถียรภาพ
ภายในเมื่อ $R_0 > 1$ โดยที่ [8]

$$R_0 = \frac{(\theta + \mu + \tau_2) N p_{q_1}}{\begin{pmatrix} \theta \\ +\mu \end{pmatrix} q_2 \left(\begin{pmatrix} \theta \\ +\mu \end{pmatrix} \tau_1 + \mu \begin{pmatrix} \theta \\ +\mu \\ +\tau_2 \end{pmatrix} \right) + q_1^2 \begin{pmatrix} \theta \\ +\mu \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \theta \\ +\mu \\ +\alpha \\ +\tau_2 \end{pmatrix}}$$

4) ผลการวิจัย

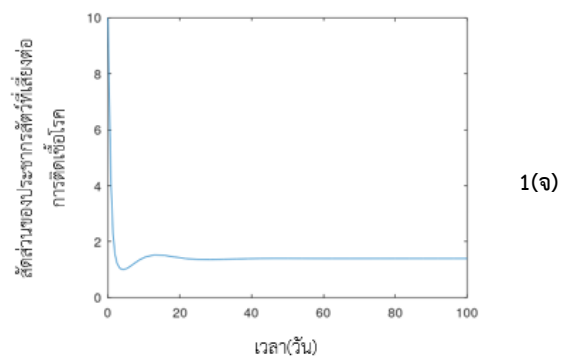
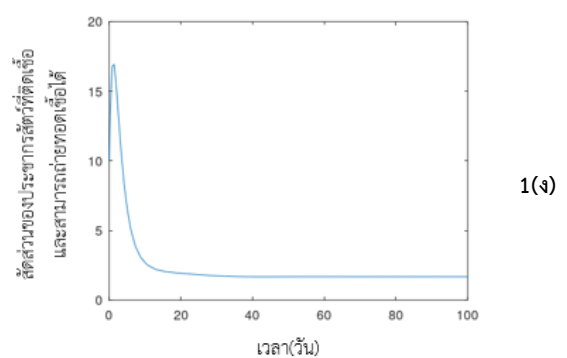
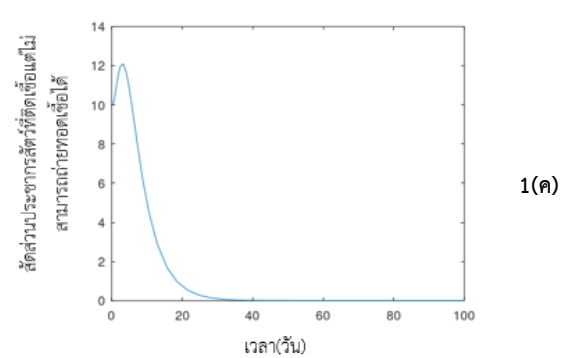
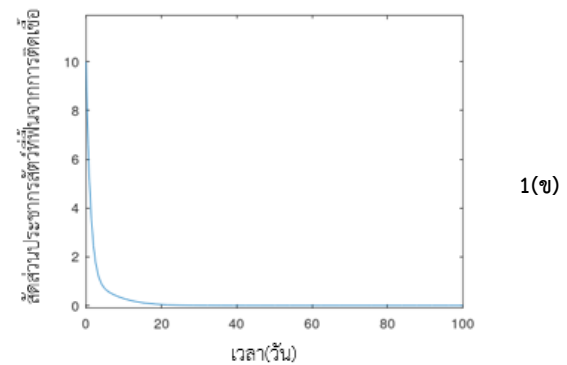
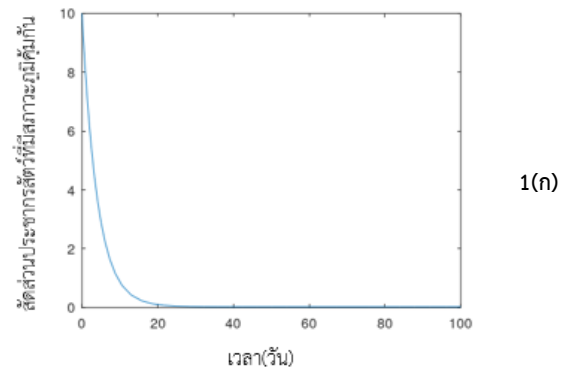
ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์เชิงตัวเลขโดยการนำค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ได้จากการรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับโรคปากเท้าเปื่อย ซึ่งแสดงดังตารางที่ 3, 4 และตารางที่ 5 [1]–[2]

ตารางที่ 3 : ค่าพารามิเตอร์ต่างของโรคปากเท้าเปื่อย สำหรับสมภาวะการระบาดไร้โรค [1]

สัญลักษณ์	ค่าพารามิเตอร์	หน่วย
N	1, 000	ตัว
P	$\frac{1}{8 * 365}$	ต่อตัว ต่อวัน
μ	$\frac{1}{20 * 365}$	ต่อตัว ต่อวัน
σ	0.799999	ต่อตัว ต่อวัน
τ_1	0.005	ต่อตัว ต่อวัน
τ_2	$\frac{1}{3 * 7}$	ต่อตัว ต่อวัน
q_1	$\frac{1}{7}$	ต่อตัว ต่อวัน
q_2	0.00005	ต่อตัว ต่อวัน
θ	$\frac{1}{5}$	ต่อตัว ต่อวัน
α	$\frac{1}{4 * 7}$	ต่อตัว ต่อวัน

จากรูปที่ 1 พบว่าผลเฉลยลู่อเข้าสู่จุดสมดุล ณ สภาวะการระบด
ไร้โรค $E_1(1.4009589041095891, 0, 0, 0, 2.8272952265)$ โดยที่
 $R_0 = 0.00253922$

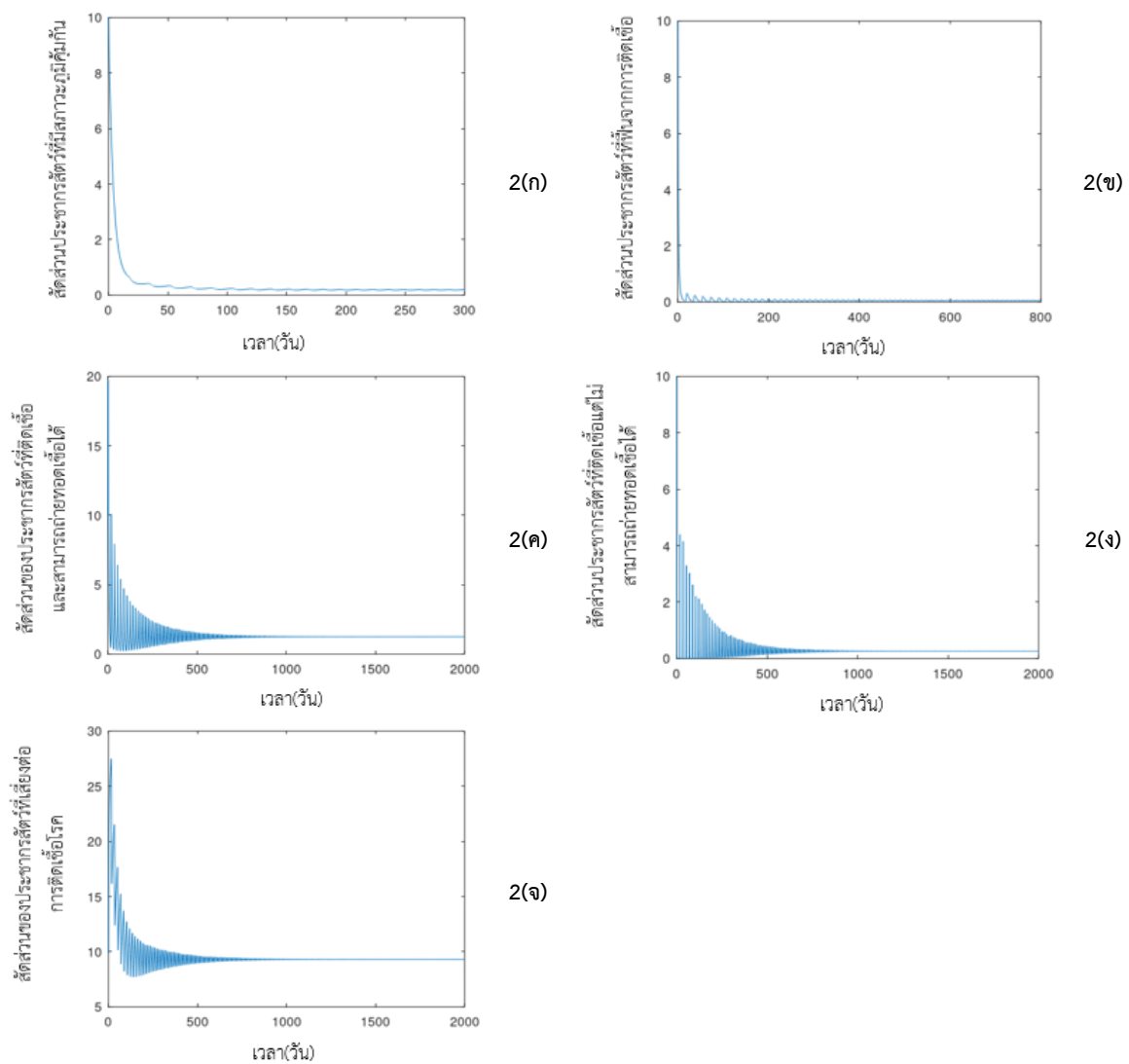
รูปที่ 2 จะเห็นได้ว่าผลเฉลยลู่เข้าสู่จุดสมดุล ณ สภาวะการ
 ระบาด $E_2(9.30665, 0.26205, 1.25487, 0.05601, 0.18781)$ โดย
 ที่ $R_0 = 25.7303$ และรูปที่ 3 จะเห็นได้ว่าผลเฉลยลู่เข้าสู่จุดสมดุล
 ณ สภาวะการระบาด $E_2(1.4803, 1.116, 0.2951, 0.0058, 0.4996)$
 โดยที่ $R_0 = 1.00832$



รูปที่ 1 : กราฟแสดงสัดส่วน $S_{NF}, E_{NF}, I_{NF}, R_{NF}, V_{NF}$ เทียบกับเวลา

ตารางที่ 4 : ค่าพารามิเตอร์ต่างของโรคปากเท้าเปื่อย สำหรับสมการระบาดเรื้อรัง

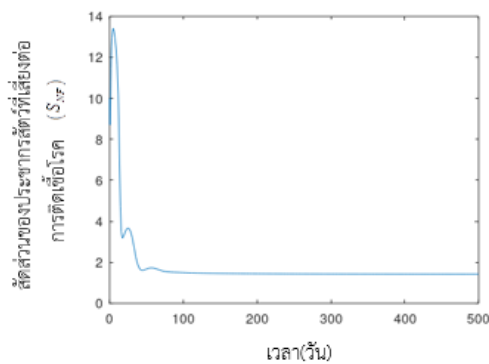
สัญลักษณ์	ค่าพารามิเตอร์	หน่วย
N	1,000	ตัว
p	$\frac{1}{8 \times 365}$	ต่อตัว ต่อวัน
μ	$\frac{1}{20 \times 365}$	ต่อตัว ต่อวัน
σ	0.799999	ต่อตัว ต่อวัน
τ_1	0.005	ต่อตัว ต่อวัน
τ_2	$\frac{1}{3 \times 7}$	ต่อตัว ต่อวัน
q_1	$\frac{1}{7}$	ต่อตัว ต่อวัน
q_2	0.9	ต่อตัว ต่อวัน
θ	$\frac{1}{5}$	ต่อตัว ต่อวัน
α	$\frac{1}{4 \times 7}$	ต่อตัว ต่อวัน



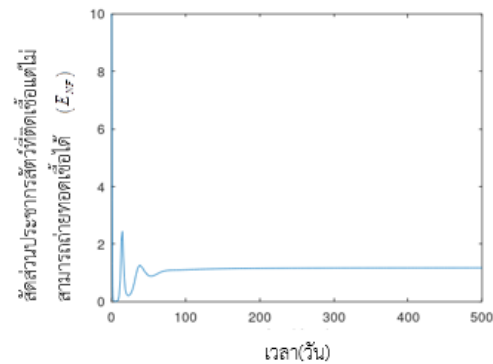
รูปที่ 2 : กราฟแสดงสัดส่วน $S_{NF}, E_{NF}, I_{NF}, R_{NF}, V_{NF}$ เทียบกับเวลา

ตารางที่ 5 : ค่าพารามิเตอร์ต่างของโรคปากเท้าเปื่อย สำหรับสภาวะการระบาดเรื้อรัง

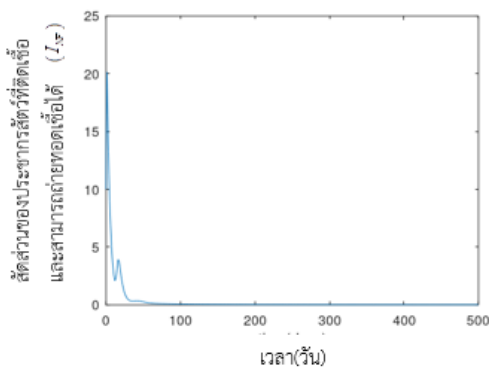
สัญลักษณ์	ค่าพารามิเตอร์	หน่วย
N	1,000	ตัว
p	$\frac{1}{8*365}$	ต่อตัว ต่อวัน
μ	$\frac{1}{20*365}$	ต่อตัว ต่อวัน
σ	0.799999	ต่อตัว ต่อวัน
τ_1	0.005	ต่อตัว ต่อวัน
τ_2	$\frac{1}{3*7}$	ต่อตัว ต่อวัน
q_1	$\frac{1}{7}$	ต่อตัว ต่อวัน
q_2	0.0202	ต่อตัว ต่อวัน
θ	$\frac{1}{5}$	ต่อตัว ต่อวัน
α	$\frac{1}{4*7}$	ต่อตัว ต่อวัน



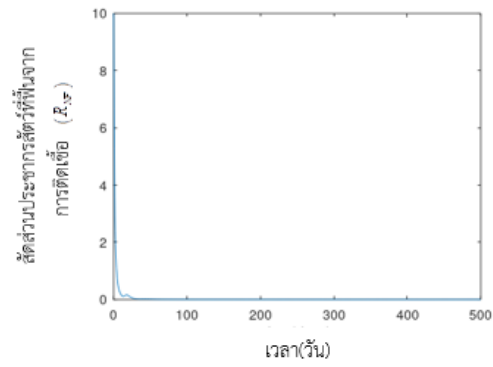
3(น)



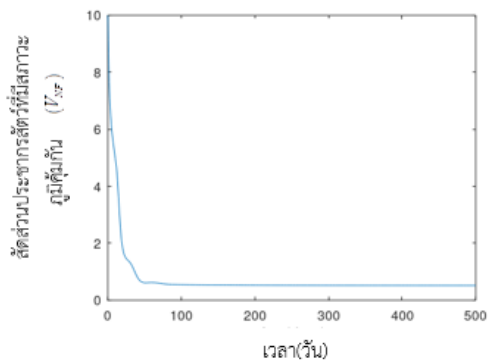
3(ข)



3(ค)

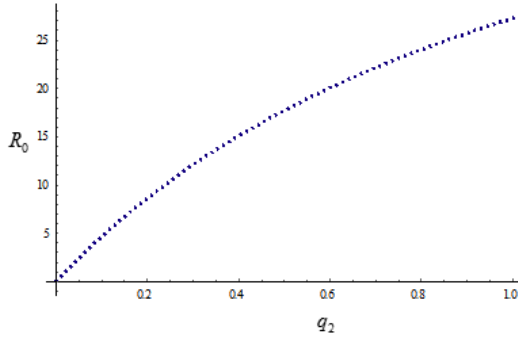


3(ง)



3(จ)

รูปที่ 3 : กราฟแสดงสัดส่วน S_{NF} , E_{NF} , I_{NF} , R_{NF} , V_{NF} เทียบกับเวลา



รูปที่ 4 : กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง q_2 กับ R_0

ในสภาวะการระบาดเรื้อรังในรูปที่ 2 และรูปที่ 3 พบว่าถ้าเปลี่ยนอัตราการเปลี่ยนกลุ่มจากกลุ่มประชากรสัตว์ที่ติดเชื้อแต่ไม่สามารถถ่ายทอดเชื้อได้ไปกลุ่มประชากรสัตว์ที่ติดเชื้อและสามารถถ่ายทอดเชื้อได้จาก $q_2 = 0.9$ ไปเป็น $q_2 = 0.0202$ ส่งผลให้ค่าสับสนพื้นฐานเข้าใกล้ 1 ดังแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง q_2 กับ R_0 ในรูปที่ 4

5) การหาความเสถียรภาพวงกว้าง

5.1) ทฤษฎีบท 1

ให้ $E_1(S_{NF}^*, E_{NF}^*, I_{NF}^*, R_{NF}^*, V_{NF}^*) =$

$$E_1 \left(\frac{Np(\theta + \mu + \tau_2)}{(\theta + \mu)\tau_1 + \mu \left(\frac{\theta + \mu}{+\tau_2} \right)}, 0, 0, 0, \frac{Np\tau_1}{(\theta + \mu)\tau_1 + \mu \left(\frac{\theta + \mu}{+\tau_2} \right)} \right)$$

ถ้า $R_0 < 1$ จุดสมดุล ณ สภาวะการระบาดโรค จะมีความเสถียรภาพวงกว้างบน $\Omega = \{(S_{NF}, E_{NF}, I_{NF}, R_{NF}, V_{NF}) \in \mathbb{R}_+^5\}$ ภายใต้เงื่อนไข

$$\begin{aligned} \mu &> p \\ pN + \sigma R_{NF} + \tau_2 V_{NF} &> (\mu + \tau_1 + q_1 E_{NF}) S_{NF} \\ \tau_1 S_{NF} &> (\tau_2 + \mu + \theta) V_{NF} \end{aligned}$$

พิสูจน์ พิจารณาฟังก์ชันไลปูนอฟ

$$\omega(t) = (S_{NF} - S_{NF}^* \ln S_{NF}) + I_{NF} + R_{NF} + E_{NF} + (V_{NF} - V_{NF}^* \ln V_{NF})$$

จะได้

$$\begin{aligned} \frac{d\omega}{dt} &= S_{NF}' \left(1 - \frac{S_{NF}^*}{S_{NF}} \right) + E_{NF}' + I_{NF}' + R_{NF}' + V_{NF}' \left(1 - \frac{V_{NF}^*}{V_{NF}} \right) \\ \frac{d\omega}{dt} &= (pN - \mu S_{NF} + \sigma R_{NF} + \tau_2 V_{NF} - \tau_1 S_{NF} - q_1 E_{NF} S_{NF}) \left(1 - \frac{S_{NF}^*}{S_{NF}} \right) + (q_1 E_{NF} S_{NF} \\ &\quad - \mu E_{NF} - \theta E_{NF} - q_2 E_{NF} I_{NF}) + (q_2 E_{NF} I_{NF} - \mu I_{NF} - \theta I_{NF} - \alpha I_{NF}) + (\alpha I_{NF} \\ &\quad - \mu R_{NF} - \sigma R_{NF}) + (\tau_1 S_{NF} - \tau_2 V_{NF} - \mu V_{NF} - \theta V_{NF}) \left(1 - \frac{V_{NF}^*}{V_{NF}} \right) \\ \frac{d\omega}{dt} &= pN - \mu S_{NF} - \mu E_{NF} - \mu I_{NF} - \mu R_{NF} - \mu V_{NF} - \left(\frac{pN}{S_{NF}} - \mu + \frac{\sigma R_{NF}}{S_{NF}} + \frac{\tau_2 V_{NF}}{S_{NF}} \right. \\ &\quad \left. - \tau_1 - q_1 E_{NF} \right) S_{NF}^* - \theta E_{NF} - \theta I_{NF} - \theta V_{NF} - \left(\frac{\tau_1 S_{NF}}{V_{NF}} - \tau_2 - \mu - \theta \right) V_{NF}^* \end{aligned}$$

เนื่องจาก

$$\begin{aligned} S_{NF}^* &= \frac{Np(\theta + \mu + \tau_2)}{(\theta + \mu)\tau_1 + \mu \left(\frac{\theta + \mu}{+\tau_2} \right)}, V_{NF}^* = \frac{Np\tau_1}{(\theta + \mu)\tau_1 + \mu \left(\frac{\theta + \mu}{+\tau_2} \right)} \\ \frac{d\omega}{dt} &= -(\mu - p)N - \left(\frac{pN}{S_{NF}} - \mu + \frac{\sigma R_{NF}}{S_{NF}} + \frac{\tau_2 V_{NF}}{S_{NF}} - \tau_1 - q_1 E_{NF} \right) S_{NF}^* \\ &\quad - \theta(E_{NF} + I_{NF} + V_{NF}) - \left(\frac{\tau_1 S_{NF}}{V_{NF}} - \tau_2 - \mu - \theta \right) V_{NF}^* \end{aligned}$$

แล้วจะได้ว่า $\frac{d\omega}{dt} < 0$ เมื่อ $\mu > p, \tau_1 S_{NF} > (\tau_2 + \mu + \theta) V_{NF}$

$$pN + \sigma R_{NF} + \tau_2 V_{NF} > (\mu + \tau_1 + q_1 E_{NF}) S_{NF}$$

ดังนั้น $E_1(S_{NF}^*, E_{NF}^*, I_{NF}^*, R_{NF}^*, V_{NF}^*)$ มีความเสถียรภาพวงกว้างบน Ω [14], [15]

5.2) ทฤษฎีบท 2

ให้ $E_2(S_{NF}^*, E_{NF}^*, I_{NF}^*, R_{NF}^*, V_{NF}^*)$ เมื่อ

$$\begin{aligned} S_{NF}^* &= \frac{\left(Npq_2 \left(\frac{\mu +}{\sigma} \right) - \alpha \sigma \left(\frac{\theta +}{\mu} \right) \right) \left(\frac{\theta + \mu}{+\tau_2} \right)}{\left(\alpha \mu + \left(\frac{\theta +}{\mu} \right) \left(\frac{\mu +}{\sigma} \right) \right) q_1 \left(\frac{\theta + \mu}{+\tau_2} \right) + \left(\frac{\mu +}{\sigma} \right) q_2 \left(\left(\frac{\theta +}{\mu} \right) \tau_1 + \mu \left(\frac{\theta + \mu}{+\tau_2} \right) \right)} \\ E_{NF}^* &= \frac{\alpha + \theta + \mu}{q_2} \\ I_{NF}^* &= \frac{\left(\frac{\mu +}{\sigma} \right) \left[q_1 \left(Npq_2 - \left(\frac{\theta +}{\mu} \right) \left(\frac{\theta}{+\mu} \right) \right) \left(\frac{\theta}{+\mu} \right) - \left(\frac{\theta +}{\mu} \right) q_2 \left(\left(\frac{\mu}{\mu} \right) \tau_1 + \left(\frac{\theta + \mu}{+\tau_2} \right) \right) \right]}{q_2 \left[\left(\alpha \mu + \left(\frac{\theta +}{\mu} \right) \left(\frac{\mu +}{\sigma} \right) \right) q_1 \left(\frac{\theta}{+\mu} \right) + \left(\frac{\mu +}{\sigma} \right) q_2 \left(\left(\frac{\theta +}{\mu} \right) \tau_1 + \mu \left(\frac{\theta}{+\mu} \right) \right) \right]} \\ R_{NF}^* &= \frac{\alpha \left[q_1 \left(Npq_2 - \left(\frac{\theta +}{\mu} \right) \left(\frac{\theta}{+\mu} \right) \right) \left(\frac{\theta}{+\mu} \right) - \left(\frac{\theta +}{\mu} \right) q_2 \left(\left(\frac{\theta +}{\mu} \right) \tau_1 + \mu \left(\frac{\theta}{+\mu} \right) \right) \right]}{q_2 \left[\left(\alpha \mu + \left(\frac{\theta +}{\mu} \right) \left(\frac{\mu +}{\sigma} \right) \right) q_1 \left(\frac{\theta}{+\mu} \right) + \left(\frac{\mu +}{\sigma} \right) q_2 \left(\left(\frac{\theta +}{\mu} \right) \tau_1 + \mu \left(\frac{\theta}{+\mu} \right) \right) \right]} \\ V_{NF}^* &= \frac{\tau_1 (Np(\mu + \sigma) q_2 - \alpha \sigma (\theta + \mu))}{\left(\alpha \mu + \left(\frac{\theta +}{\mu} \right) \left(\frac{\mu +}{\sigma} \right) \right) q_1 \left(\frac{\theta}{+\mu} \right) + \left(\frac{\mu +}{\sigma} \right) q_2 \left(\left(\frac{\theta +}{\mu} \right) \tau_1 + \mu \left(\frac{\theta}{+\mu} \right) \right)} \end{aligned}$$

ถ้า $R_0 > 1$ จุดสมดุล ณ สภาวะการระบาดเรื้อรังจะมีความเสถียรภาพวงกว้างบน $\Omega = \{(S_{NF}, E_{NF}, I_{NF}, R_{NF}, V_{NF}) \in \mathbb{R}_+^5\}$ ภายใต้เงื่อนไข

$$\begin{aligned} \mu &> p \\ pN + \sigma R_{NF} + \tau_2 V_{NF} &> (\mu + \tau_1 + q_1 E_{NF}) S_{NF} \\ \tau_1 S_{NF} &> (\tau_2 + \mu + \theta) V_{NF} \\ Np(\mu + \sigma) q_2 &> \alpha \sigma (\theta + \mu) \end{aligned}$$

พิสูจน์ พิจารณาฟังก์ชันไลปูนอฟ

$$\omega(t) = (S_{NF} - S_{NF}^* \ln S_{NF}) + I_{NF} + R_{NF} + E_{NF} + (V_{NF} - V_{NF}^* \ln V_{NF})$$

จะได้

$$\begin{aligned}\frac{d\omega}{dt} &= S'_{NF} \left(1 - \frac{S'_{NF}}{S_{NF}} \right) + E'_{NF} + I'_{NF} + R'_{NF} + V'_{NF} \left(1 - \frac{V'_{NF}}{V_{NF}} \right) \\ &= pN - \mu S_{NF} - \mu E_{NF} - \mu I_{NF} - \mu R_{NF} - \mu V_{NF} \\ &\quad - \left(\frac{pN}{S_{NF}} - \mu + \frac{\sigma R_{NF}}{S_{NF}} + \frac{\tau_2 V_{NF}}{S_{NF}} - \tau_1 - q_1 E_{NF} \right) S_{NF}^* \\ &\quad - \theta E_{NF} - \theta I_{NF} - \theta V_{NF} - \left(\frac{\tau_1 S_{NF}}{V_{NF}} - \tau_2 - \mu - \theta \right) V_{NF}^*\end{aligned}$$

เนื่องจาก

$$\begin{aligned}S_{NF}^* &= \frac{\left(Npq_2 \left(\frac{\mu+}{\sigma} \right) - \alpha \sigma \left(\frac{\theta+}{\mu} \right) \right) \left(\frac{\theta+}{\mu} \right)}{\left(\alpha \mu + \left(\frac{\theta+}{\mu} \right) \left(\frac{\mu+}{\sigma} \right) \right) q_1 \left(\frac{\theta+}{\mu} \right) + \left(\frac{\mu+}{\sigma} \right) q_2 \left(\left(\frac{\theta+}{\mu} \right) \tau_1 + \mu \left(\frac{\theta+}{\mu} \right) \right)} \\ V_{NF}^* &= \frac{\tau_1 (Np(\mu+\sigma)q_2 - \alpha \sigma (\theta+\mu))}{\left(\alpha \mu + \left(\frac{\theta+}{\mu} \right) \left(\frac{\mu+}{\sigma} \right) \right) q_1 \left(\frac{\theta}{\mu} \right) + \left(\frac{\mu+}{\sigma} \right) q_2 \left(\left(\frac{\theta+}{\mu} \right) \tau_1 + \mu \left(\frac{\theta}{\mu} \right) \right)}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\frac{d\omega}{dt} &= -(\mu-p)N - \left(\frac{pN}{S_{NF}} - \mu + \frac{\sigma R_{NF}}{S_{NF}} + \frac{\tau_2 V_{NF}}{S_{NF}} - \tau_1 - q_1 E_{NF} \right) S_{NF}^* \\ &\quad - \theta (E_{NF} + I_{NF} + V_{NF}) - \left(\frac{\tau_1 S_{NF}}{V_{NF}} - \tau_2 - \mu - \theta \right) V_{NF}^*\end{aligned}$$

แล้วจะได้ว่า $\frac{d\omega}{dt} < 0$ เมื่อ $\mu > p, \tau_1 S_{NF} > (\tau_2 + \mu + \theta) V_{NF}$

$$pN + \sigma R_{NF} + \tau_2 V_{NF} > (\mu + \tau_1 + q_1 E_{NF}) S_{NF}$$

และ $Np(\mu+\sigma)q_2 > \alpha \sigma (\theta+\mu)$

ดังนั้น $E_2(S_{NF}^*, E_{NF}^*, I_{NF}^*, R_{NF}^*, V_{NF}^*)$ มีความเสถียรภาพวงกว้างบน Ω

6) สรุปผล

ในการศึกษาครั้งนี้ผู้วิจัยได้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโรคเท้าปากเปื่อย เพื่อศึกษาการระบาดของโรคปากเท้าเปื่อยในประเทศไทย โดยรวบรวมข้อมูลจากศูนย์สารสนเทศเพื่อเฝ้าระวังและควบคุมโรคระบาดสัตว์ สำนักควบคุม ป้องกันและบำบัดโรคสัตว์ กรมปศุสัตว์ มาสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยกำหนดในรูปของสมการเชิงอนุพันธ์ของจำนวนประชากรสัตว์ที่เสี่ยงต่อการติดเชื้อโรค ประชากรสัตว์ที่ติดเชื้อแต่ไม่สามารถถ่ายทอดเชื้อได้ ประชากรสัตว์ที่ติดเชื้อและสามารถถ่ายทอดเชื้อได้ ประชากรสัตว์ที่พ้นจากการติดเชื้อ และประชากรสัตว์ที่มีสถานะภูมิคุ้มกัน

จากการศึกษา พบว่าได้จุดสมดุลทั้งหมดสองจุดคือ จุดสมดุล ณ สถานะการระบาดโรคและจุดสมดุล ณ สถานะการระบาดโรจั้งที่สอดคล้องกับเงื่อนไขของพารามิเตอร์ และได้ค่าสืบพันธุ์พื้นฐานคือ

$$R_0 = \frac{(\theta + \mu + \tau_2) Npq_1}{\left(\frac{\theta}{\mu} \right) q_2 \left(\left(\frac{\theta}{\mu} \right) \tau_1 + \mu \left(\frac{\theta}{\mu} \right) \right) + q_1^2 \left(\frac{\theta}{\mu} \right) \left(\frac{\theta}{\mu} \right) + \alpha \left(\frac{\theta}{\mu} \right) \left(\frac{\theta}{\mu} \right)}$$

พบว่าในสถานะการระบาดโรจั้งจะเสถียรภาพก็ต่อเมื่อค่าสืบพันธุ์พื้นฐานมีค่าน้อยกว่าหนึ่ง $R_0 = 0.00253922 < 1$ และในสถานะการระบาดโรจั้งจะเสถียรภาพก็ต่อเมื่อค่าสืบพันธุ์พื้นฐานมีค่ามากกว่าหนึ่ง $R_0 = 25.7303 > 1$

ภายใต้สถานะการระบาดโรจั้งพบว่าค่าสืบพันธุ์พื้นฐานมีผลต่อการเข้าสู่หาจุดสมดุลคือค่าสืบพันธุ์พื้นฐานที่น้อยจะเข้าสู่หาจุดสมดุลเร็วกว่าค่าสืบพันธุ์พื้นฐานที่มาก พารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อค่าสืบพันธุ์พื้นฐานคืออัตราการเปลี่ยนกลุ่มจากกลุ่มประชากรสัตว์ที่ติดเชื้อแต่ไม่สามารถถ่ายทอดเชื้อได้ไปกลุ่มประชากรสัตว์ที่ติดเชื้อและสามารถถ่ายทอดเชื้อได้ (q_2) การควบคุมโรคเท้าปากเปื่อยสามารถควบคุม q_2 ที่มีผลต่อค่าสืบพันธุ์พื้นฐาน หากเกิดการระบาดของโรค ค่าสืบพันธุ์พื้นฐานจะมีค่ามากกว่า 1 ควบคุม q_2 ให้เข้าใกล้ 0.0202 ทำให้ค่าสืบพันธุ์พื้นฐานเข้าใกล้ 1 จะสามารถทำการควบคุมการระบาดของโรคนี้อย่างมีประสิทธิภาพ

REFERENCES

- [1] Bureau of Disease Control and Veterinary Services, Department of Livestock Development, "Epidemic Situation," (in Thai), 2022. [Online]. Available: http://esmartsur.net/Report_Situation.aspx
- [2] T. Yano *et al.*, "Foot and Mouth Disease outbreak in Chiang Mai and Lamphun area during 2007-2011," (in Thai), *Chiang Mai Vet. J.*, vol. 11, no. 3, pp. 277-287, 2013.
- [3] M. J. Keeling, "Models of foot-and-mouth disease," *Proc. Biol. Sci.*, vol. 272, no. 1569, pp. 1195-1202, Jun. 2005, doi: 10.1098/rspb.2004.3046.
- [4] S. Mushayabasa, C. P. Bhunu, and M. Dhlamini, "Impact of vaccination and culling on controlling foot and mouth disease: A mathematical modelling approach," *World J. Vaccines*, vol. 1, no. 4, pp. 156-161, Nov. 2011, doi: 10.4236/wjv.2011.14016.
- [5] T. Chanchaidechachai, M. C. M. de Jong, and E. A. J. Fischer, "Spatial model of foot-and-mouth disease outbreak in an endemic area of Thailand," *Prev. Vet. Med.*, vol. 195, Oct. 2021, Art. no. 105468.
- [6] S. Mushayabasa, D. Posny, and J. Wang, "Modeling the intrinsic dynamics of foot-and-mouth disease," *Math. Biosci. Eng.*, vol. 13, no. 2, pp. 425-442, Apr. 2016, doi: 10.3934/mbe.2015010.



- [7] M. Kobayashi, T. E. Carpenter, B. F. Dickey, and R. E. Howitt, "A dynamic, optimal disease control model for foot-and-mouth-disease: II. Model results and policy implications," *Prev. Vet. Med.*, vol. 79, no. 2–4, pp. 274–286, May 2007, doi: 10.1016/j.prevetmed.2007.01.001.
- [8] W. J. Klaring and W. Timischl, "Mathematical models for the spread and control of foot-and-mouth disease during the 1973 epidemic in Austria," *Biom. J.*, vol. 21, no. 7, pp. 675–680, 1979, doi: 10.1002/bimj.4710210711.
- [9] F. Mugabi, J. Mugisha, B. Nannyonga, H. Kasumba, and M. Tusiime, "Parameter-dependent transmission dynamics and optimal control of foot and mouth disease in a contaminated environment," *J. Egypt. Math. Soc.*, vol. 27, Dec. 2019, Art. no. 53. doi: 10.1186/s42787-019-0058-1.
- [10] A. H. Cabezas, M. W. Sanderson, and V. V. Volkova, "A meta-population model of potential foot-and-mouth disease transmission, clinical manifestation and detection within U.S. Beef Feedlots," *Front. Vet. Sci.*, vol. 7, Sep. 2020, Art. no. 527558, doi: 10.3389/fvets.2020.527558.
- [11] L. Edelstein-Keshet, *Mathematical Models in Biology*. New York, NY, USA: Random House, 1998.
- [12] K. Abodayeh, M. S. Arif, A. Raza, M. Rafiq, M. Bibi, and A. Nazeer, "Numerical techniques for stochastic foot and mouth disease epidemic model with the impact of vaccination," *Adv. Differ. Equ.*, Jan. 2020, Art. no. 34.
- [13] P. G. Smith, "Concepts of herd protection and immunity," *Proc. Vaccinol.*, vol. 2, no. 2, pp. 134–139, 2010.
- [14] T. Changpuek, P. Pongsumpun, and I. M. Tang, "Analysis of mathematical model for swine flu transmission by age group," *Far East J. Math. Sci. (FJMS)*, vol. 73, no. 2, pp. 201–229, 2013.
- [15] W. Mumtong, P. Pongsumpun, and I. M. Tang, "Analysis of model for menstrual cycle with the effect of body mass index," *Far East J. Math. Sci. (FJMS)*, vol. 93, no. 2, pp. 243–266, 2014.

Buckling of Square Plates with Different Central Cutouts

Ek-u Thammakornbunjut¹ Pongkorn Meelapchotipong² Jongsak Pakpia³

Sarocho Tammappattaragul⁴ Paiboon Limpitipanich^{5*}

^{1,2,3}*AMM Research Laboratory, Faculty of Engineering, Thai-Nichi Institute of Technology, Bangkok, Thailand*

⁴*Thai Asahi Denso Co., Ltd., Siam Green City, Rayong, Thailand*

^{5*}*Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Burapha University, Chonburi, Thailand*

*Corresponding Author. E-mail address: paiboonl@eng.buu.ac.th

Received: 30 September 2020; Revised: 5 May 2022; Accepted: 14 September 2022

Published online: 22 December 2022

Abstract

This research aims to study the effects of cutout shape and size with different load combinations on buckling of perforated square plates. Loadings are divided into three types which are a uniaxial compressive force, biaxial compressive forces, and biaxial tensile and compressive forces. These loads are in-plane and uniformly distributed along the edges of the plates. In the case of biaxial loading, these forces are perpendicular to each other and to the edges of the plates. The models are analyzed as square plates with simple supports on all four edges. The finite element method is employed to determine the buckling loads in the direction of x-axis. From numerical results, increasing cutout size will reduce the buckling load in all cases. In addition, considering the buckling load of the plate subjected to uniaxial load as a reference case, it is found that the plates subjected to biaxial compression have the lowest buckling loads. The buckling load is also reduced as the ratio of compressive forces per unit length in the y- and x-axis is increased. In contrast, the plates subjected to biaxial tension and compression will have greater buckling loads. The above results are the same for both circular and square holes. However, when compared in terms of strength to weight ratio, plates with small cutouts produce slightly different results for both shapes. But for the larger cutouts, the square cutout will significantly provide better strength to weight ratio than a circular cutout at the same diameter to width ratio.

Keywords: Biaxial load, Buckling, Cutout, Finite element method, Plate

I. INTRODUCTION

In the past, thin plate structures are widely used in various engineering structures such as ships, planes, and bridges. In particular, it is designed to support in-plane loads because the thin plate has better buckling resistance behavior than columns. That is when the panel is subjected to in-plane load until it buckles it can be handled to even higher loads by switched from the lowest mode to a higher mode. In contrast, the column which supports the axial force will suddenly fail after the force reached the first buckling load. Details of the basic theory and experiments of buckling can be found in the work of Timoshenko and Gere [1]. In addition, various cases of plate buckling can be studied from the work of Bulson [2].

In general, plates often have perforation for weight reduction, maintenance, and pipe access [3]. In the past, many research have been conducted on the buckling of perforated plates to ensure proper design and implementation. In the beginning, theoretical analysis was performed with experimental verifications [4]–[12]. Later, after a numerical technique namely finite element method was developed and has been improved to be a powerful tool for structural analysis it was widely used to solve this kind of problem. Complex loadings and boundary conditions have been solved and reported with high accuracy [13]–[22].

Most of the past research has studied the effects of cutout shapes, i.e., circle, square, and rectangle and its position subjected to uniaxial or biaxial loads. Most of them have not compared the buckling capacity between circular and square holes on plates that are subjected to biaxial loads especially in the combination of tension and compression. Therefore, this research aims to compare the difference between these two cutout shapes on the buckling load of the square plate. The applied forces are uniaxial, biaxial compression, and biaxial tension-compression loadings. The finite

element method is carried out in the analyses by the ANSYS program. Incidentally, the shape of the plate, cutouts, and loads in this study are shown in Figure 1.

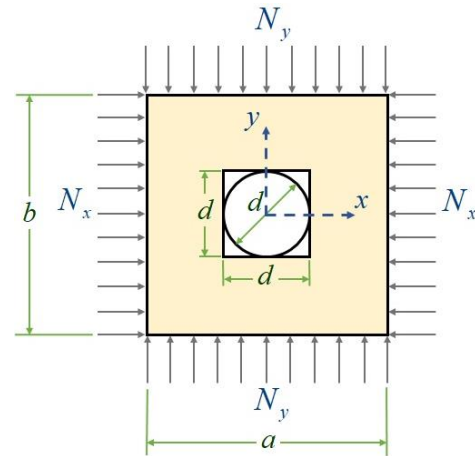


Figure 1: Geometry of plate, cutouts, and loads

II. RESEARCH METHODOLOGY

A. Geometric Modeling

The material of a plate is structural steel with Young's modulus of 200 GPa and a Poisson ratio of 0.3. Its geometry is square with a width of 300 mm and 2 mm thickness. We define the size of the hole by a ratio of the hole diameter and hole width to the plate width for the case of circular and square holes, respectively. The effect of cutout size is studied by varying this ratio as 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, and 0.5. The plate support conditions are simple support on all four edges. The middle plane of the plate lies on the x-y plane [19].

B. Loading Conditions

The applied load is prescribed as uniformly in-plane forces acting on the edge of the plate in the x- and y-directions as shown in figure 1. However, by the constant thickness of the plate, it is convenient to use it as force per unit length and will simply call the force or load in the x- or y-axes (N_x and N_y) instead. There are three loading conditions which are uniaxial compression, biaxial compression, and biaxial tension and compression.

We will consider the compressive force in the x-axis as the main axis in determining the critical buckling load. In addition, the stress ratio of the y-axis to the x-axis (or the ratio of N_y to N_x) is defined as $R = 0.5, 1.0, 1.5$, and 2.0 to examine its effect on the different cutouts. The tensile force is positive while the compressive force is negative. Therefore, the case of biaxial tension and compression this ratio will be negative. Table I shows all of the cases to be analyzed including the non-cutout plate cases. For uniaxial loading, the stress ratio will be zero. Both plates with circular and square holes will be numerically analyzed with the same loading conditions.

C. Numerical Analysis

In this research, numerical results were carried out using the ANSYS program which uses the finite element method (FEM) as a calculation engine. Briefly, the principle of this method is to divide the problem geometry into subdomains, called elements. They are represented by rectangular or triangular elements for two-dimensional problems or hexagonal or tetrahedron elements for three dimensions whose mathematical equations govern their behavior consistent with the problem characteristics. Each element has nodes and an interpolation function to approximate the field variables within the element.

Table 1: Cutout and loadings to be analyzed

Cutout Shape	d/b	$R = \sigma_y/\sigma_x (= N_y/N_x ; \text{ uniform thickness })$			
		Uniaxial Loading	Biaxial Loading		
Circle and Square	0	0.0	Compression-Compression		
	0.1		0.5	1.0	1.5
	0.2		2.0		
	0.3		or		
	0.4		Tension-Compression		
	0.5		-0.5	-1.0	-1.5
			-2.0		

The equations of each element are then assembled into a system of equations in the form

$$[K]\{u\} = \{F\} \quad (1)$$

where $[K]$ is a stiffness matrix, $\{u\}$ is a nodal vector, and $\{F\}$ is a nodal force vector.

Buckling of plates is a bifurcation problem, usually call bifurcation buckling. It refers to an instability failure of structures. At the bifurcation point on the load-deformation curve, the deformations begin to grow in a new pattern which is quite different from the pre-buckling pattern. The buckling problem will be formulated as an eigenvalue problem. The stiffness matrix in Eq. (1) will consist of a linear or small deformation stiffness matrix K_0 at the pre-buckling state and a stress stiffness matrix K_σ which relates to the stress level of the plate. Therefore, Eq. (1) can be written as

$$[K_0 + \lambda K_\sigma]\{u\} = \{F\} \quad (2)$$

where λ is an eigenvalue which will be calculated as a load multiplier. At the buckling point, the determinant of the stiffness matrix must equal to zero as

$$|K_0 + \lambda K_\sigma| = 0 \quad (3)$$

After solving the Eq. (3), the eigenvalues as a critical load multiplier will be provided and the corresponding buckling loads can then be determined from

$$P_{cr_i} = \lambda_i P \quad (4)$$

where P_{cr_i} is the buckling load of mode i , λ_i is the eigenvalue of mode i , and P is the initial applied load. In the case of the ANSYS program, the calculated results, based on linearly elastic assumption, will be eigenvalue or load multiplier. If the initial applied load is less than the buckling, load the load multiplier will be greater than 1, but oppositely, it will be less than 1. As shown in Eq. (4), by multiplying the initial applied load by the load multiplier, the buckling load could be obtained at each mode.

III. MODELING AND VERIFICATIONS

A. Finite Element Modeling

Modeling and analyzing problems with the finite element method by the ANSYS program can be divided into six steps as shown in Figure 2. The procedure starts with drawing the geometry of the problem and setting all dimensions for easy adjustment. Then prescribes its material properties and creates a proper mesh with convergence tests. In this step, type and size of the element should be carefully selected to fit the problem. They will affect the amount of the element and processing time. The next step is to provide the edge conditions and the applied loads. The analysis section for the buckling problem consists of two parts: the static analysis and the eigenvalue analysis, which must choose the required results to demonstrate i.e., stresses, deflections, and buckling load multipliers. In addition, as a post-processing step, the user can select other results to be carried out for further analysis.

This research uses SHELL181 element, a four-node element with six degrees of freedom at each node, in the meshing process. The program semi-automatically generates mesh in which smaller meshes are only created around the periphery of the cutout. Consequently, the number of elements is not constant in each case due to the size of the hole.

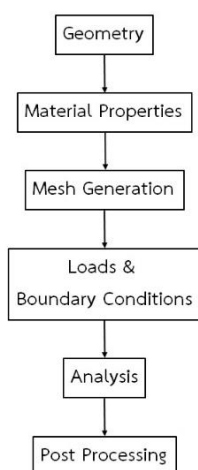


Figure 2: Problem modeling and analysis in FE program

They range approximately between 2,000 and 5,500 elements. Examples of mesh generations for circular and square holes with a relatively small element around the hole are shown in Figure 3.

Applying loads and boundary conditions are the same step in ANSYS program. In present study, the plate model lies on the x-y plane and the main load will apply on the x-axis. The applied load in the y-axis will be zero, compression, and tension for three loading conditions. To apply a simple support condition for all four edges, a zero displacement in z-direction is set on all four edges and two points at the corners on the edge of the plate parallel to the x-direction are restrained to translate only in the x-direction while the point between these two is set to move only in the y-direction.

B. Verification of the Numerical Results

To verify the correctness of the results, we have compared the buckling loads from the program with the available theoretical results [23], the case of non-perforated plates. All three loading conditions have been considered. Table II shows the comparison results of the buckling loads between ANSYS and theory which is obviously seen that the discrepancy is very low. As a result, the calculation of the buckling load of the perforated plates from the program should be accurate enough. In addition, some buckling modes are examined by comparing to the experiments as shown, as an example, in Figure 4. The experiments had been done as a senior project in 2007 [24]. Rectangular plates with some aspect ratio subjected to uniaxial loading had been tested. Shadow-Moire method had been used to demonstrate buckling modes. However due to the imperfection of the grips at the edge of the plates the out of plane displacement did not look symmetry around the cutout in case of square plates, as shown in the Figure 4.

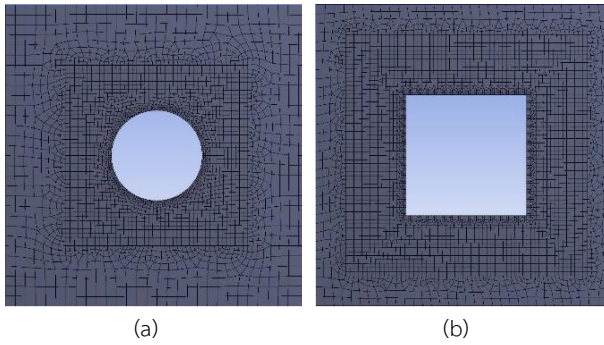


Figure 3: Example of mesh generations for (a) circular cutout with $d/b = 0.3$ and (b) square cutout with $d/b = 0.4$

Table 2: Verification of the results from ANSYS

Loadings	R	Nx,cr (kN/m)		
		Theory	ANSYS	% Discrepancy
Uniaxial	0	64.271	64.272	0.00167
Biaxial Compression- Compression	0.5	42.847	42.848	0.00167
	1.0	32.135	32.136	0.00167
	1.5	25.708	25.709	0.00245
	2.0	21.424	21.424	0.00167
Biaxial Tension- Compression	-0.5	114.770	115.160	0.34023
	-1.0	133.898	134.280	0.28547
	-1.5	160.677	161.020	0.21327
	-2.0	200.847	201.060	0.10623

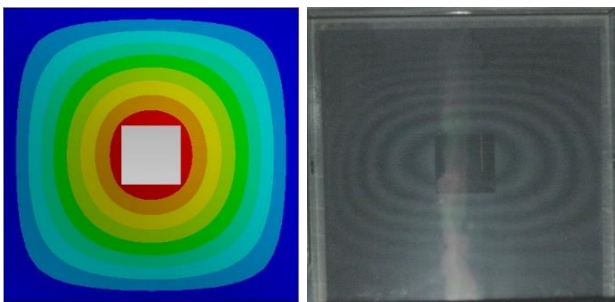


Figure 4: Buckling mode of a square plate with a square cutout of $d/b = 0.2$ subjected to uniaxial load

IV. RESULTS AND DISCUSSION

The calculation results will be in the form of force per unit length which is N/mm. In this research, we have changed them to an accustomed unit kN/m. In addition, it can also be converted to stress by multiply with $1000/t$ which results in the unit of MPa.

The characteristic considered in this analysis is the ability to resist buckling of the plates. Plates with higher

buckling resistance will have higher buckling loads. The comparison between hole size, hole shape, and loadings are examined from buckling load values. The numerical results consist of the difference of loadings, i.e., uniaxial loading, biaxial compression, and biaxial tension and compression as shown in Figure 5–7, respectively. All of the results are compared the critical buckling loads in the x-axis by increasing hole size for both circular and square holes. In the case of uniaxial loading, the strength to volume ratio (S/V ratio) will also be considered here. Generally, this kind of analysis has used strength to weight ratio (S/W ratio) but this work did not vary materials properties, especially the density, so the S/V ratio could be carried out. However, if the S/W ratio is required we can multiply the S/V ratio by material density and gravitational acceleration.

A. Effect of Hole Size

From the calculation results, as shown in Figure 5-7, the hole size is considered in the form of hole diameter to plate width ratio. As the hole size increases, the buckling load decreases in a similar trend for the first two loading conditions, Figure 5 and 6. It seems reasonable because making a cutout at the center of the plate causes the plate to lose its material texture for force resistance which means that the buckling strength of plates will inevitably decrease. In the initial phase, $d/b = 0$ to $d/b = 0.3$, the buckling load decreases faster than in the case of $d/b = 0.4$ to 0.5 . As for the last loading conditions, the buckling load at $d/b = 0.1$ is slightly higher than the case of $d/b = 0$. However, for the case of $d/b = 0.2$ to 0.5 , the buckling load tends to decrease as expected. This is because the applied load is tension and compression and are perpendicular to each other by keeping the load ratio, R , constant. It means that the tensile force in the y-direction in the case of $d/b = 0.1$ is greater than the case of $d/b = 0$ therefore its buckling load is greater.

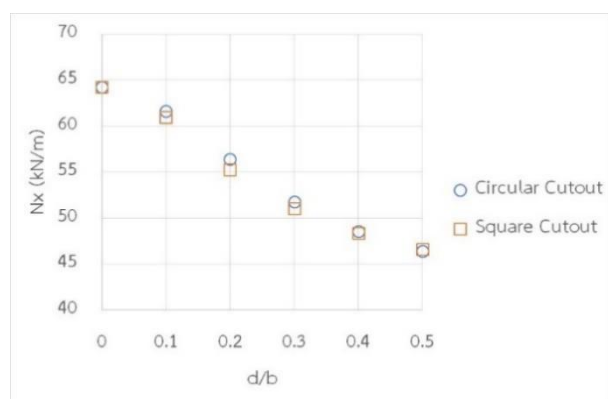


Figure 5: Buckling load of a plate with a central cutout subjected to uniaxial load

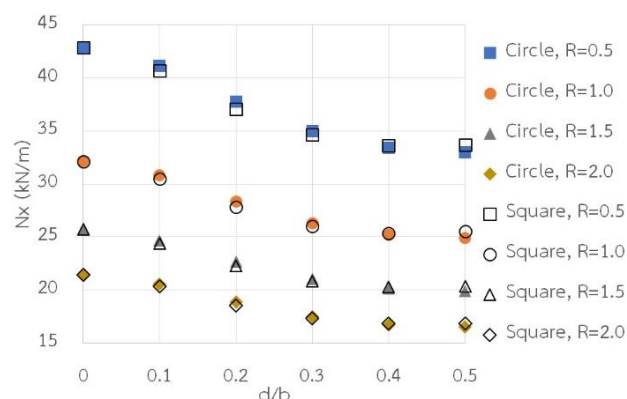


Figure 7: Buckling load of a plate with a central cutout subjected to biaxial compressive load

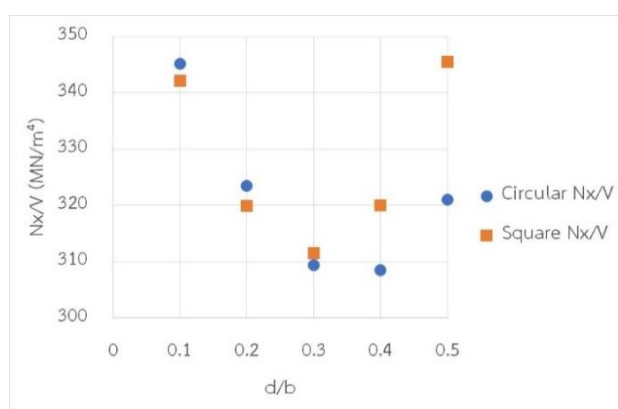


Figure 6: Buckling strength to volume ratio of a plate with a central cutout subjected to uniaxial load

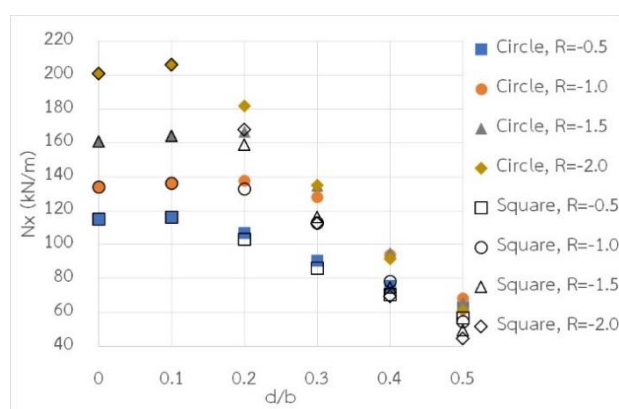


Figure 8: Buckling load of a plate with a central cutout subjected to biaxial tensile and compressive loads

B. Effect of Loadings

Comparing the results of three loading conditions, as shown in Figure 5–8, it can be seen that the biaxial compression case gives the critical buckling load less than that of the uniaxial loading case at the same cutout size. This is because the lateral compression in the y-axis has also weakened the plate in resisting the in-plane compressive force. It should be taken as a precaution in the design of plate-like structures where they may be subjected to biaxial compressive forces. In addition, the smaller the load ratio R , the higher the buckling load. It can be implied that by applying the lateral load the buckling load resistance of the plate will decrease as shown in Figure 7. The same results are achieved for both circular and square holes.

Considering the case of plates subjected to tensile and compressive forces, as shown in Figure 8, it is found that both circular and square cutouts cause higher buckling loads than that in the case of uniaxial and biaxial compression loadings for $d/b = 0.1$ to 0.4 while they result in close value for $d/b = 0.5$. It shows that applying the laterally tensile force to the plates will allow the plates to withstand more compressive force before the critical point is reached. However, when considering the load ratio R , it is found that the higher the load ratio, the higher the buckling load. In addition, in the case of a plate without a hole or with a small hole ($d/b = 0.1$), the buckling load at $R = 2$ is much greater than in the other cases. But as the hole size increased to the range of $d/b = 0.3 - 0.5$, the buckling

loads with higher load ratios are significantly reduced to a close value with the lower load ratio. It can then be made a suggestion that for a large hole, i.e., d/b more than 0.3, it is not necessary to apply the lateral tensile load more than $R = 1$. Because the buckling strength that the plates achieved may not be worth it as the cost has much more increased.

C. Effect of the Cutout Shape

From Figure 5–8, when comparing circular holes and square holes with the same size of diameter and side, respectively, it is found that the plate with a square hole has a smaller area which, consequently, means that its volume and weight are also less than of the circular hole. But the buckling load is very close to each other. Accordingly, considering in terms of weight reduction to buckling strength reduction the plate with a square hole is better. It is evident from Figure 6, if the force-to-volume ratio is considered, that a small hole, e.g. $d/b = 0.1 - 0.3$, this ratio is quite similar. But when the holes are large enough as $d/b = 0.4$ or 0.5 , the plate with a square hole has significantly better strength per volume.

V. CONCLUSION

This research examines the critical buckling load of square plates with circular and square cutouts by considering the effects of three loadings, hole size, load ratio, and the cutout shape. The problem is numerically analyzed by the finite element method. It can be concluded that the perforation reduces the strength of the plate against buckling. It will decrease as the hole size increases. It is the same for both circular and square holes.

In the case of loading types, if we introduce the case of the plate subjected to uniaxial loading as a benchmark, the biaxial compressive load will cause the reduction of the buckling strength of the perforated plate

drastically. In practice, the use of plates in structural applications should avoid this type of load if the buckling strength is highly concerned. In contrast, when the lateral tensile force could be provided, the plate would be able to withstand much more buckling load. However, this advantage will fade as the hole grows larger.

Finally, if the hole is not large, both cutouts (circle and square) will not differ greatly in weight reduction and buckling strength. But if the cutout is large enough, a square hole has more benefit than a circular one in the view of strength to weight ratio.

ACKNOWLEDGEMENT

This research was supported through the research grant no. 21/2548 by the Faculty of Engineering, Burapha University.

REFERENCES

- [1] S. P. Timoshenko and J. M. Gere, *Theory of Elastic Stability*, 2nd ed. Mineola, NY, USA: McGraw-Hill, 1961.
- [2] P. S. Bulson, *The Stability of Flat Plates*. London, U.K.: Chatto & Windus, 1970.
- [3] M. C. Y. Niu, *Airframe Structural Design*, 2nd ed. Hong Kong: Conmilit Press, 2002.
- [4] S. Levy, R. M. Woolley, and W. D. Kroll, "Instability of simply supported square plate with reinforced circular hole in edge compression," *J. Res. Natl. Bur. Stand.*, vol. 39, pp. 571–577, Dec. 1947.
- [5] T. Kumai, "Elastic stability of the square plate with a central circular hole under edge thrust," *Rep. Res. Inst. Appl. Mech. Kyushu Univ.*, vol. 1, no. 2, p. 1, Apr. 1952.
- [6] A. L. Schlack Jr., "Elastic stability of pierced square plates," *Exp. Mech.*, vol. 4, no. 6, pp. 167–172, Jun. 1964.
- [7] M. Yoshiki, Y. Fujita, A. Kawamura, and H. Arai, "Instability of plates with holes (1st report)," (in Japanese), *J. Zosen Kiokai*, vol. 1967, no. 122, pp. 137–145, 1967.
- [8] D. Ritchie and J. Rhodes, "Buckling and post-buckling behaviour of plates with holes," *Aeronautical Quarterly*, vol. 26, no. 4, pp. 281–296, 1975.



- [9] M. P. Nemeth, "A buckling analysis for rectangular orthotropic plates with centrally located cutouts," Langley Research Center, Hampton, VA, USA, Rep. NASA-TM-86263, 1984. [Online]. Available: <https://ntrs.nasa.gov/citations/19850004959>
- [10] R. Narayanan and F.-Y. Chow, "Strength of biaxially compressed perforated plates," in *Proc. 7th Int. Specialty Conf. Cold-Formed Steel Struct.*, St. Louis, MO, USA, Nov. 1984, pp. 55–73.
- [11] A. L. Yettram and C. J. Brown, "The elastic stability of square perforated plates under bi-axial loading," *Comput. Struct.*, vol. 22, no. 4, pp. 589–594, 1986.
- [12] C. J. Brown, A. L. Yettram, and M. Burnett, "Stability of plates with rectangular holes," *J. Struct. Eng.*, vol. 113, no. 5, pp. 1111–1116, May 1987.
- [13] T. M. Roberts and Z. G. Azizian, "Strength of perforated plates subjected to in-plane loading," *Thin-Walled Struct.*, vol. 2, no. 2, pp. 153–164, 1984.
- [14] R. Narayanan and F. Y. Chow, "Ultimate capacity of uniaxially compressed perforated plates," *Thin-Walled Struct.*, vol. 2, no. 3, pp. 241–264, 1984.
- [15] F.-Y. Chow and R. Narayanan, "Buckling of plates containing openings," in *Proc. 7th Int. Specialty Conf. Cold-Formed Steel Struct.*, St. Louis, MO, USA, Nov. 1984, pp. 39–53.
- [16] P.-L. Larsson, "On buckling of orthotropic compressed plates with circular holes," *Compos. Struct.*, vol. 7, no. 2, pp. 103–121, 1987.
- [17] I. M. May and T. H. Ganaba, "Elastic stability of plates with and without openings," *Eng. Comput.*, vol. 5, no. 1, pp. 50–52, Jan. 1988.
- [18] Y. J. Lee, H. J. Lin, and C. C. Lin, "A study on the buckling behavior of an orthotropic square plate with a central circular hole," *Compos. Struct.*, vol. 13, no. 3, pp. 173–188, 1989.
- [19] W. L. Ko, "Mechanical- and Thermal-Buckling Behavior of Rectangular Plates with Different Central Cutouts," NASA Dryden Flight Research Center, Edwards, CA, USA, Rep. NASA/TM-1998-206542, 1998. [Online]. Available: https://www.nasa.gov/centers/dryden/pdf/88569main_H-2206.pdf
- [20] K. M. El-Sawy and M. I. Martini, "Elastic stability of bi-axially loaded rectangular plates with a single circular hole," *Thin-Walled Struct.*, vol. 45, no. 1, pp. 122–133, 2007.
- [21] B. Mohammadzadeh, E. Choi, and W. J. Kim, "Comprehensive investigation of buckling behavior of plates considering effects of holes," *Struct. Eng. Mech.*, vol. 68, no. 2, pp. 261–275, 2018.
- [22] S. Kelpša and S. Peltonen, "Local buckling coefficient calculation method of thin plates with round holes," in *Proc. 14th Nordic Steel Construction Conf.*, Copenhagen, Denmark, Sep. 2019, pp. 841–846.
- [23] J. K. Paik, *Ultimate Limit State Analysis and Design of Plated Structures*, 2nd ed. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2018.
- [24] Y. Sornsra and P. Wanrerk, "Buckling of rectangular plates with a central square hole," B.S. thesis, Dept. Mech. Eng., Burapha Univ., Chonburi, Thailand, 2007.

Deep Learning and Image Processing for Disc Brake Pad Identification: A Case Study of Brake Pads Company

Nicha Khathinhorm¹ Rungrod Samankitesakul² Wasakorn Laesanklang³
Banpot Horbanluekit⁴ Somkid Amornsamankul^{5*}

^{1,5*}*School of Bioinnovation and Bio-based Product Intelligence, Faculty of Science, Mahidol University, Bangkok, Thailand*

²*Compact International (1994) Co., Ltd. (Head Office), Phetchaburi, Thailand*

^{3,5*}*Department of Mathematics, Faculty of Science, Mahidol University, Bangkok, Thailand*

⁴*National Science and Technology Agency (NSTDA), Thailand Science Park, Pathum Thani, Thailand*

*Corresponding Author. E-mail address: somkid.amo@mahidol.ac.th

Received: 21 March 2022; Revised: 25 April 2022; Accepted: 24 June 2022

Published online: 22 December 2022

Abstract

Disc brake pad identification is a difficult task that requires experiences of disc brake experts. However, disc brake pad retailers must identify the part to deliver the right product to customers. In this research, the deep learning algorithms and object detection technologies to help identify disc brake pad in a case study of disc brake pads company are proposed. The goal is to implement disc brake identification system that finds the right brake pad model correctly in an instant time. We select two deep learning algorithms that are well known in object detection which are YOLOv5 and Faster R-CNN. The disc brake pad detection performance of the two algorithms is compared. There are four measurements: precision, detection speed, loss function (regression loss, classification loss), and training time. We use the two algorithms to detect and classify five disc brake pad models. The results show that YOLOv5 has better precision, detection speed, loss function, but Faster R-CNN requires less training time.

Keywords: Deep learning, Disc brake pad identification, Object detection, YOLOv5



I. INTRODUCTION

The global automotive aftermarket industry volume is increasing due to the rising demand of automobile [1]. Disc brake pad is the one of automotive aftermarket spare parts in which its demands are also increasing in the same trend with the demand of automotive market. Also, the modern vehicle models use disc brakes as the main vehicle braking system [2]. The increasing demand for automobiles affects to variety of spare parts feature (e.g., disc brake pad, car tyres, car accessories). Especially for disc brake pads, the variety of them is one of the concerns for the brake pad business due to the importance of identifying the disc brake pad that would be the information for installing disc brake pads in their cars correctly, which influences the brake system, brake performance, and safety of drivers.

A case study company in disc brake pad industry was tasked with identifying disc brake pad using human vision, which is well-known for disc brake pad drawing. But the variety of disc brake pad in terms of shape, size, and high volume caused the difficulty of identifying them with human vision precisely. Furthermore, there are a sizeable minority of experts who are well-known for their expertise in brake pad drawing. So, they could not identify a large number of disc brake pad fast enough. The constraint of human vision as above causes several problems for the brake pad business, such as slow response times for customer service and employee overload.

Nowadays, Object detection algorithms are getting better all the time. Object detection is a significant part of computer vision theory that is utilized in many practical image processing applications and is based on convolutional neural networks (CNNs) for extracting image features [3]. To identify each object, object detection is utilized to detect the single object or multiple objects and label with a class label in numerous photos [4]. There are two types of object

detection model: one-stage and two-stage methods. The two-stage methods consists of region proposal followed by region classification, such as the R-CNN algorithm family, while one-stage object methods accomplishes both at the same time, such as SSD or YOLO series [5]. Furthermore, there are several libraries or application program interfaces (APIs) that can be used that are suitable for novice developers [6].

Due to the number of studies on disc brake identifying with object detection algorithm are rather tiny. The purpose challenge of this study is to recommend the best methods for identifying disc brake pads by comparing the efficiency of two methods, Faster R-CNN and YOLOv5 which were picked as the best representations of two-stage and one-stage object detection methods, respectively [7]. To achieve the fast and precision to identify disc brake pad, the performance evaluation consists of using the loss function, mean average precision (mAP), detection speed and training time.

II. LITERATURE REVIEW

Since the small number of research on disc brake identification using an object detection method. We investigated alternative object detection methods for other application to consider the optimal approach for detecting disc brake pads.

Sharma and Thakur [3] reviewed about object detection in deep learning field. Object identification is an important component of computer vision theory that is utilized in many practical image processing applications and is based on convolutional neural networks (CNNs) for extracting image features. In this topic, an object is characterized by its main characteristics, which include shape, size, color, texture, and other qualities.

Kumar and Srivastava [4] investigated the object detection system employing a single shot multi-box

detector. To identify each object, object detection is utilized to detect the single object or multiple objects and label with a class label in numerous photos. They were training till the error rate was low and then testing the model with some example photos. The researcher discovered that precision could be checked using the loss function (LP), mean average precision (mAP), and frames per second (FPS).

Casado-Garcia and Heras [5] concluded that there are two types of object detection models. The first type is two-stage network, it consists of region proposal followed by region classification, such as the R-CNN algorithm family. The second type is one-stage network, it accomplishes both at the same time, such as SSD or YOLO. Furthermore, they found that the increasing cost of data collection means an increased cost too, to compensate for the lack of data, data augmentation techniques are employed.

Wang and Yan [7] researched a visual object detection which is the application in deep learning to classify types of tree leaf. In the research, YOLOv5 and Faster R-CNN were investigated as one-stage and two-stage detectors for detecting five different types of leaves. The results showed that YOLOv5 outperforms Faster R-CNN and flexibility for a variety of applications.

Turečková *et al.* [8] set a difficult situation of identifying a dog's face with YOLO network and deploy the system to mobile application for applying to open a pet entrance. At 0.5 IOU, YOLO tiny obtains an average precision of 92%. When compared to Faster RCNN-based, the average precision score of the YOLO tiny is 0.06 poorer, but it is much slightly speedier.

Ryu and Chung [9] investigated object detection to assess the surrounding situation rapidly and effectively in the driving environment. Recent research employed R-CNN to achieve precision, but they have constraints of real-time applying. This research proposed YOLO applying augmentation. The model has an 90.49%

average precision. It was demonstrated that this method effectively identified objects and improved classification precision.

Yoon *et al.* [10] researched the classifying players and tracking ball movements in basketball game through video clips to help staff to design game strategies. The researchers utilized Yolo as the basic system, modifying it to identify player and ball motions from multiple perspectives. Yolo was chosen because of its ability to identify objects in real time. Furthermore, in terms of average precision and speed in frames per second, it outperformed other object identification algorithms such as Fast-RCNN and Faster-RCNN. The precision of detection is evaluated in this study by comparing it to human expert analysis.

Melek *et al.* [11] researched an object detection in shelf image to monitor the number of products on the shelves in retail. In terms of performance and speed, YOLOv2 was picked as the best deep learning algorithm. The total loss value is reduced as the number of iterations increases. Furthermore, the dataset is the most important component influencing the effectiveness of deep learning algorithm.

Bin Yan *et al.* [12] investigated a recognition system for recognizing existing apples on apple trees and classifying them as ungraspable apples or graspable apples. The study proposes YOLOv5 for real-time precise identification of apple picking robots in foggy and sunny conditions. The average identification time per image is 0.015 second and an average precision is 86.75%.

Ana Malta *et al.* [13] researched the recognized parts of an automobiles with YOLOv5 network. The dataset of car engines and the label of eight car parts were created by the researchers. The results in the test sets showed that YOLOv5 could recognize the car parts in real-time with high precision and recall above 96.8%. The results demonstrated that YOLOv5 is good and fast for detection problems.



Fangfei Shi *et al.* [14] proposed the object detection network, YOLOv5, to detect driver smoking. Since there is no public driver's smoking dataset, the researchers were created the dataset from video of various smoking with different angles, weather, and lighting conditions. The experiment results showed that decomposed YOLOv5 achieves the 93.5% precision and 4.9 second of detection time.

Md Jubayer *et al.* [15] researched an identifying mold on food surfaces such as fruit and bakery product based on YOLOv5 algorithm. In this research, a food images with mold dataset were produced. In compared to YOLOv3, YOLOv4, and YOLOv5, YOLOv5 model showed the highest precision, recall, and average precision with 205 epochs. Following that, as the number of epochs increased, the model's performance dropped.

Zixin Ning *et al.* [16] investigated MT-YOLOv5, a mobile terminal table detection model based on YOLOv5, that can identify the table location on the mobile terminal in real-time. The researchers created a dataset from a public source that included 1200 pictures for training and 439 images for testing. The results showed that YOLOv5 could determine the table location with a precision of 84% and it has a rapid reaction time of 24.2 frames per second, implying that real-time detection is possible.

Jiali Cui *et al.* [17] suggested a biometric identification approach based on a Faster Region based Convolutional Neural Network (Faster R-CNN) for detecting eyes. The approach is composed of three parts: convolutional layers, a region proposal network, and a detection network. Faster R-CNN is faster than other R-CNN series on a professional GPU, achieving 8-9 frames per second. Furthermore, there are comparison of test time and recall with YOLO (tiny), they found that the speed of YOLO (tiny) is better than Faster R-CNN, while the recall on the dataset with Faster R-CNN method may approach 95-96%, while YOLO (tiny) method achieved

47.4-63.5%, suggesting that the proposed technique based on Faster R-CNN has excellent precision for detecting eyes.

Wan and Goudos [18] investigated multiple fruit classes consisting of apples, mangoes, and orange detection using robotic vision with the development of Faster R-CNN. This study is a first in that it uses 4,000 images from the real world to construct a multi-labeled. In the experiment, they compared the Fast R-CNN, Faster-RCNN, YOLO series: YOLO, YOLOv2, and YOLOv3, and their own improved Faster R-CNN. The test results show that their own improved Faster R-CNN outperforms standard detectors in terms of detecting precision, 91% mAP, followed by YOLOv3, YOLOv2, Faster R-CNN, Fast R-CNN, and YOLO, respectively. While YOLOv3 has the fastest processing time, it is followed by YOLOv3, YOLO, Faster R-CNN, YOLO, Faster R-CNN, and Fast R-CNN, in that order.

Li [19] studied about object detection performance based on R-CNN series. This paper compared multiple pre-training models, to evaluate the efficiency of the R-CNN series. It was based on three different datasets in common public data, including PASCAL VOC2007, COCO, and ILSVRC. The results showed that Faster R-CNN outperformed R-CNN and Fast R-CNN in terms of precision, as measured by mAP, and detection speed, as measured by the second metric.

III. RESEARCH METHODOLOGY

We implement two deep learning algorithms for identifying disc brake pads, consisting of YOLOv5 and Faster R-CNN which are dominant in precision and detection speed [18], [19]. This section explains convolutional neural network (CNN) and the two algorithms: YOLOv5, and Faster R-CNN. Furthermore, this section also describes data preparation, deep learning environment and performance evaluation methods.

A. The Study of Convolutional Neural Network (CNN)

Convolutional neural network (CNN) [20] is a type of deep learning that has gained popularity in a variety of computer vision application. CNN is a mathematical structure consisting of three layers: convolution, pooling, and fully connected layers. The convolution and pooling layers perform feature extraction of object while the final output is extracted by the fully connected layers. Digital images consist of values of pixel in two-dimensional grid. The grid cells of image pixel are called kernel which represent the feature extraction for highly making performance of image processing.

B. The Study of YOLOv5 Principle

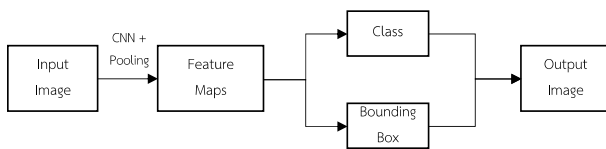


Figure 1: The work methodology of YOLOv5 algorithm

YOLO (You Only Look Once) [21] is the one of CNN, which can process image features and classify objects at the same time. There have been five versions of YOLO algorithms. Each version has been upgraded and has different architecture. For latest version of YOLO is YOLOv5 which has a strength of user-friendly framework, speed, and precision.

The work methodology of YOLOv5 [22] is to apply CNN to extract image features and use pooling to decrease size of feature maps. Then, it creates bounding boxes along with compute the confidence score of each bounding box to represent the object in the images. Finally, YOLOv5 generates the bounding box with highest confidence score and determines the class of objects as shown in Figure 1.

C. The Study of Faster R-CNN Principle

Faster R-CNN, or Faster Region-Based Convolutional Neural Network, [23] has two main steps for detecting and classifying object. The initial step is to propose regions using a CNN followed by the step of region proposal network (RPN) using to consider and categorize the object class. The adding of RPN is the key success that make Faster R-CNN be the best represent of CNN family.

The work methodology of Faster R-CNN [24] starts with the feature map creation using CNN to extract the features from input images. Then the region proposal network (RPN) will construct multiple bounding boxes on feature map known as regions of interest (ROI) that are highly probable to contain any objects. Finally, the ROI pooling layer is used to classify the class and generate the bounding box on output images as shown in Figure 2.

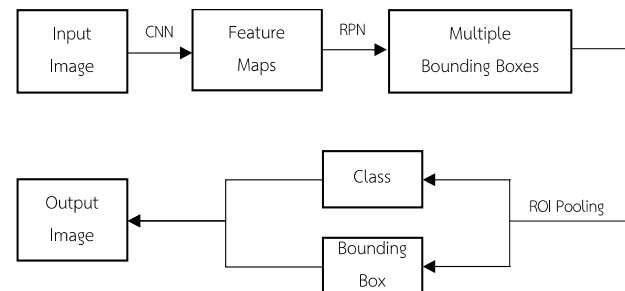


Figure 2: The work methodology of Faster R-CNN algorithm

D. Dataset Preparation

This step consists of three parts: collect images data, data annotation, and data preprocessing as follow:

1) Collect Images Data

All disc brake pad images were collected from a case study company. There are two sides of disc brake pad model consist of friction material side and backing plate side as shown in Figure 3. Images of both sides of each disc brake pad were collected with different arrangements. In addition, we collected disc brake pad

images in visible shot sizes and clear surroundings, including a white background and sufficient light as shown in Figure 4. For this test dataset, we took image samples from five brake pad models: Model A, Model B, Model C, Model D and Model E.



Figure 3: Friction material side and backing plate side of disc brake pad



Figure 4: The image of disc brake pads collection: Model A, Model B, Model C, Model D and Model E

2) Data Annotation

The annotation process used Roboflow to label the class name of disc brake pads: Model A, Model B, Model C, Model D and Model E. Each class is represented of one to three car model names which use in automotive industry.

3) Data Preprocessing

We applied data augmentation to increase the number of instance in our dataset. This is essential part for preparing training dataset to improve the training model of deep learning algorithm. The data augmentation was created by Roboflow. It consists of flipping, rotating, shearing, grayscaling, brightening, exposing, and blurring techniques. After data preprocessing was finished, the split of the training and validation dataset is 80% and 20% respectively as shown in table 1, which is suitable for multiple classes [25]. The number of samples for Model A, B, C, D and E are 651, 510, 665, 449 and, 458 respectively. Otherwise, the test dataset were collected from the single disc brake pad and multiple disc brake pads on a white background, as

shown in Figure 5, to examine the results of two object detection methods.

Table 1: The image of test dataset collection

Algorithm	Train dataset (80%)	Validation dataset (20%)
YOLOv5	1,368	342
Faster R-CNN	1,368	342



Figure 5: The image of test dataset collection

E. Environment Setting and Training

After preparation of data, we trained both algorithms using Google Colab Pro. The epoch and batch size of train setting were defined by trial and error for receiving the best precision of both algorithms.

F. Performance Evaluation

The performance evaluation for comparing two algorithms consists of five parameters: confusion matrix, loss function, precision, detection speed, and training speed. All parameters are computed by algorithms at the end of training.

1) Loss function

The loss function [7] determines how close an approximated value is to the true value. It mainly includes classification loss and regression loss. The classification loss optimizes the classification performance while regression loss optimizes the bounding box that locates objects. So, in this research, we selected both loss functions to evaluate algorithms.

2) Precision

In part of the precision measurement, we selected mean average precision (mAP) [26] for estimating the precision of object detection. The value of mAP starts from 0 to 1 which means the greater value means the better precision. We select the mAP at IOU threshold at 0.5 to measure the algorithm precision in all classes and in each class. Since the good precision is the prioritization factor for classification problems. We also used a confusion matrix [27] to evaluate the quality of classification and show the cross of prediction and true classification. The confusion matrix is obtained from the k-nearest neighbors clustering where the one axis is defined as the target class or true class labels and another axis is the output class or class predictions.

3) Detection speed

The detection speed is measured by second per image to investigate speed performance and evaluate detection speed for practical use.

4) Training speed

The training time is measured as well, and it is computed in hours to compare the amount of time spent training between two algorithms.

IV. RESULTS AND DISCUSSIONS

A. Comparison of Disc Brake Pad Detection Results

The test datasets are separated in two types: single disc brake pad and multiple disc brake pads which were tested on YOLOv5 and Faster R-CNN algorithm with over 50 percentage confidence setting.

The disc brake pad detection on both YOLOv5 and Faster R-CNN consist of bounding box creation and class name identification, the experiment results in single disc brake pad detection as shown in Figure 6 showed that YOLOv5 could perform as good as Faster R-CNN, they could create the bounding box on object position precisely and identify the name of disc brake pad correctly in every class name with high confidence. While the experiment results in multiple disc brake pads detection as shown in Figure 7, showed that both YOLOv5 and Faster R-CNN create the bounding box on object position worse than single disc brake pad image because they created overlapped bounding box in some images. Since YOLOv5 created bounding box on empty background while Faster R-CNN created multiple bounding boxes on one object. But in term of class name identification, YOLOv5 could identify the name of disc brake pad correctly except the one which create the mistaken bounding box on empty background while Faster R-CNN was confused the name of disc brake pad in some images such as the wrong identify of Model A (50%) as Model C (96%) in Figure 7.

B. Comparison of Two Algorithms Performance

The confusion matrix as shown in Table 2 indicated that the performance of the identified disc brake pad of YOLOv5 is better than that of Faster R-CNN due to the higher precision of predicted name, while Faster R-CNN has high precision as well, but it was still confused in few class names such as the predicted name of Model A as Model B, C, and E.

In Figure 8 showed the mAP of disc brake pad identification in all classes and each class. In all classes, YOLOv5 has a 99.394% mAP while Faster R-CNN has 99.215% mAP. On the other hand, the mAP of YOLOv5 in each class is range from 99% to 99.5% while the mAP of Faster R-CNN in each class is range from 88.586% to 93.333%. The result of mAP showed that YOLOv5 had better average precision percentage than Faster R-CNN in each class which correspond to average precision of all classes. The investigation of detection speed after algorithms training in Figure 9 showed that YOLOv5 outperformed with 0.008 second/image while Faster R-

CNN could detect 0.174 second/image. The result showed that YOLOv5 could detect disc brake pad image faster than Faster R-CNN about 22 times. On the other hand, in Figure 10 showed that the training time of Faster R-CNN is 1.3 hour while the training of YOLOv5 is 8.138 hour. The results showed that Faster R-CNN required less training time than YOLOv5 about 6 times.

For the loss function following Figure 11 and Figure 12 showed that YOLOv5 has 1.585% and 0.415% in regression loss and classification loss, respectively, which had better performance than Faster R-CNN.

Table 2: The confusion matrix of YOLOv5 and Faster R-CNN.

YOLOv5						Faster R-CNN					
Predict True	Model A	Model B	Model C	Model D	Model E	Predict True	Model A	Model B	Model C	Model D	Model E
Model A	1.00					Model A	0.95	0.02	0.02		0.01
Model B		1.00				Model B		0.98	0.01	0.01	
Model C			0.99	0.01		Model C			1.00		
Model D				1.00		Model D				0.99	0.01
Model E					1.00	Model E	0.03				0.97

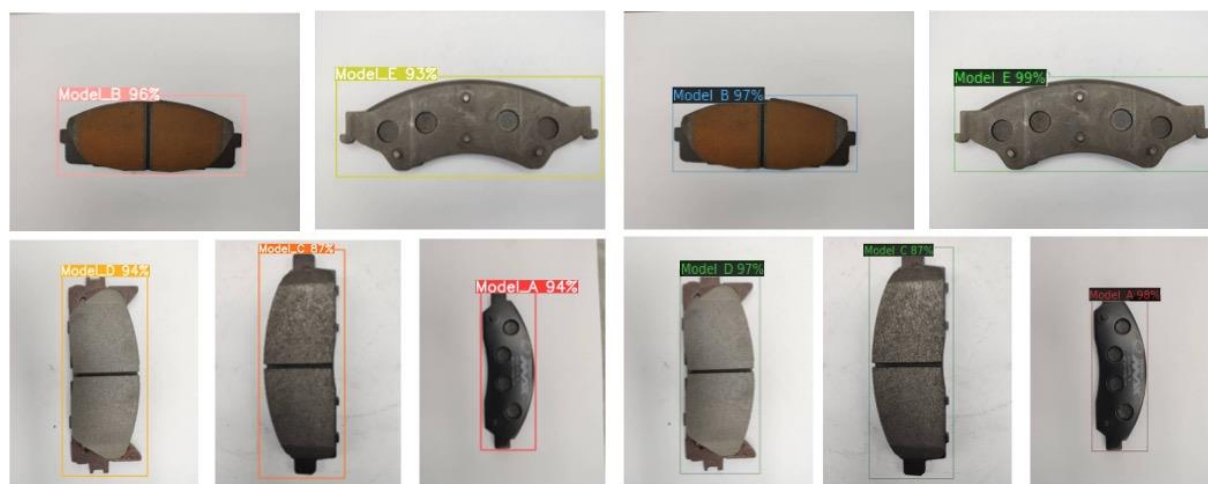


Figure 6: Single disc brake pads detection results



Figure 7: Multiple disc brake pads detection results

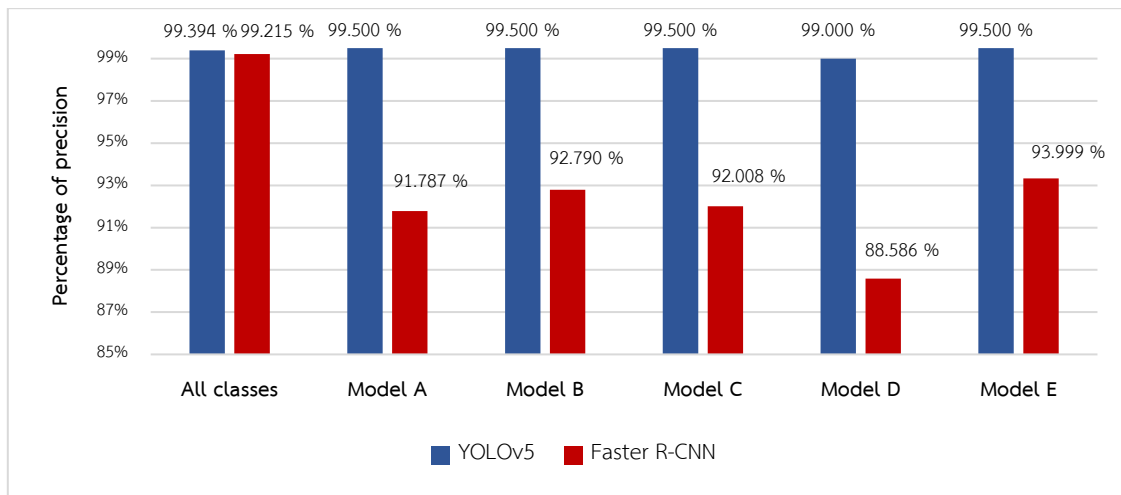


Figure 8: Precision comparison (mAP@0.5) of YOLOv5 and Faster R-CNN

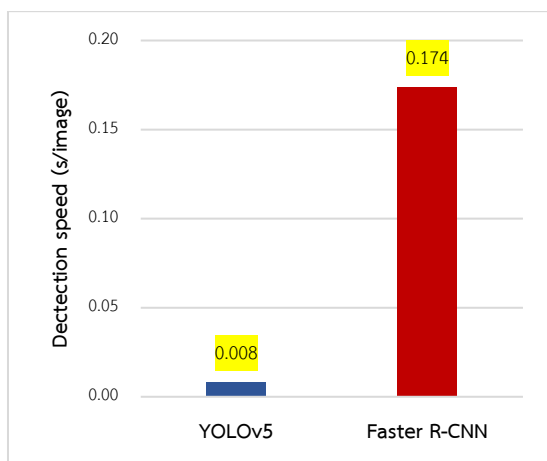


Figure 9: Detection speed (s/image) comparison of YOLOv5 and Faster R-CNN

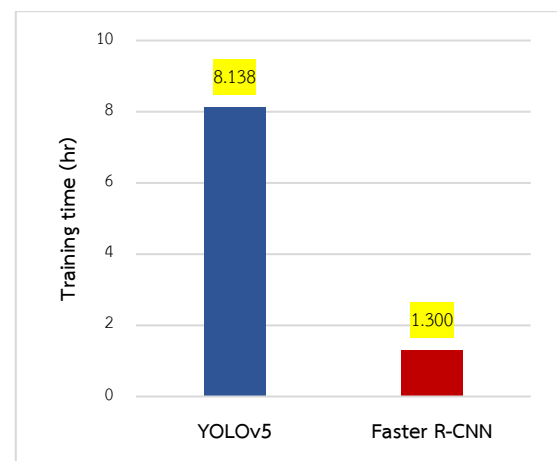


Figure 10: Training time (hr) comparison of YOLOv5 and Faster R-CNN.

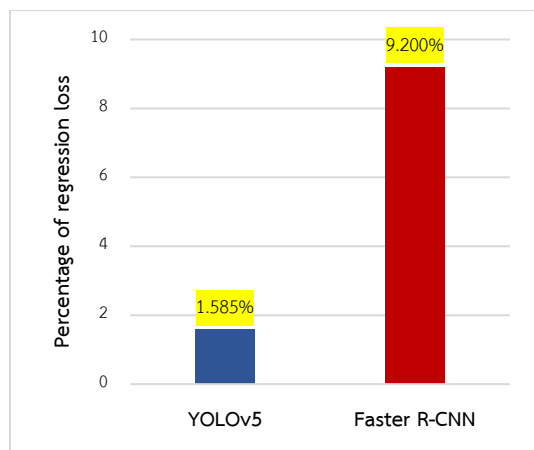


Figure 11: Regression loss comparison of YOLOv5 and Faster R-CNN

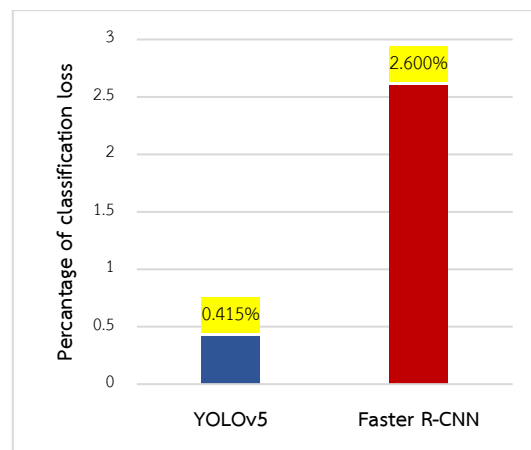


Figure 12: Classification loss comparison of YOLOv5 and Faster R-CNN

V. CONCLUSION

The experiment of algorithm performance comparison between YOLOv5 and Faster R-CNN for recommend the proper algorithm to identify disc brake pad is started from collect five models disc brake pad images in a case study company and pre-processing all images before training both algorithms. The results of training and testing determined that YOLOv5 has better precision, detection speed and loss function. Even though Faster R-CNN required less training time, YOLOv5 still significantly outperformed Faster R-CNN in disc brake pad identification.

By the way, the applying algorithm to identify disc brake pad in practical use should be concern about the quantity of models in disc brake industry and various background. So, the increasing of disc brake pad models and sufficient images background for real work coverage are essential tasks to develop the algorithms for using in all kinds of disc brake pad identification applications. Furthermore, the establishment of cross validation, which helps developers select the proper training data and the consider of balance of sample for each class, are a necessary task as well.

REFERENCES

- [1] J. Laborda and M. J. Moral, "Automotive aftermarket forecast in a changing world: The stakeholders' perceptions boost!," *Sustainability*, vol. 12, no. 18, p. 7817, 2020.
- [2] A. Borawski, "Conventional and unconventional materials used in the production of brake pads – review," *Sci. Eng. Compos. Mater.*, vol. 27, no. 1, pp. 374–396, 2020, doi: 10.1515/secm-2020-0041.
- [3] K. U. Sharma and N. V. Thakur, "A review and an approach for object detection in images," *Int. J. Comput. Vision Robot.*, vol. 7, no. 1/2, pp. 196–237, 2017, doi: 10.1504/ijcvr.2017.081234.
- [4] A. Kumar and S. Srivastava, "Object detection system based on convolution neural networks using single shot multi-box detector," *Procedia Comput. Sci.*, vol. 171, pp. 2610–2617, 2020.
- [5] Á. Casado-Garcia and J. Heras, "Ensemble methods for object detection," in *Proc. 24th Eur. Conf. Artif. Intell.*, Santiago de Compostela, Spain, Jun. 2020, pp. 2688–2695.
- [6] M. Noman, V. Stankovic, and A. Tawfik, "Object detection techniques: Overview and performance comparison," in *Proc. IEEE 19th Int. Symp. Signal Process. and Infor. Technol. (ISSPIT)*, Ajman, United Arab Emirates, Dec. 2019, pp. 489–493.
- [7] L. Wang and W. Q. Yan, "Tree leaves detection based on deep learning," in *Geometry and Vision (Communications in Computer and Information Science vol. 1386)*, M. Nguyen, W. Q. Yan, and H. Ho, Eds., Cham, Switzerland: Springer, 2021, pp. 26–38.
- [8] A. Turečková, T. Holík, and Z. Komínková Oplatková, "Dog face detection using YOLO network," *Mendel*, vol. 26 no. 2, pp. 17–22, Dec. 2020.
- [9] S.-E. Ryu and K.-Y. Chung, "Detection model of occluded object based on YOLO using hard-example mining and augmentation policy optimization," *Appl. Sci.*, vol. 11, no. 15, p. 7093, Jul. 2021, doi: 10.3390/app11157093.

- [10] Y. Yoon *et al.*, "Analyzing basketball movements and pass relationships using realtime object tracking techniques based on deep learning," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 56564–56576, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2913953.
- [11] C. G. Melek, E. B. Sonmez, and S. Albayrak, "Object detection in shelf images with YOLO," in *Proc. IEEE EUROCON 2019 - 18th Int. Conf. Smart Technol.*, Novi Sad, Serbia, Jul. 2019, pp. 1–5.
- [12] B. Yan, P. Fan, X. Lei, Z. Liu, and F. Yang, "A real-time apple targets detection method for picking robot based on improved YOLOv5," *Remote Sens.*, vol. 13, no. 9, p. 1619, Apr. 2021, doi: 10.3390/rs13091619.
- [13] A. Malta, M. Mendes, and T. Farinha, "Augmented reality maintenance assistant using YOLOv5," *Appl. Sci.*, vol. 11, no. 11, p. 4758, May 2021, doi: 10.3390/app11114758.
- [14] F. Shi, H. Zhou, C. Ye, and J. Mai, "Faster detection method of driver smoking based on decomposed YOLOv5," *J. Phys.: Conf. Ser.*, vol. 1993, 2021, Art. no. 012035, doi: 10.1088/1742-6596/1993/1/012035.
- [15] F. Jubayer *et al.*, "Mold detection on food surfaces using YOLOv5," *Curr. Res. Food Sci.*, vol. 4, pp. 724–728, 2021.
- [16] Z. Ning, X. Wu, J. Yang, and Y. Yang, "MT-YOLOv5: Mobile terminal table detection model based on YOLOv5," *J. Phys.: Conf. Ser.*, vol. 1978, 2021, Art no. 012010, doi: 10.1088/1742-6596/1978/1/012010
- [17] J. Cui, F. Chen, D. Shi, and L. Liu, "Eye detection with faster R-CNN," in *Proc. Int. Conf. Adv. Comput. Technol., Inf. Sci. and Commun.*, Xiamen, China, Mar. 2019, pp. 111–116.
- [18] S. Wan and S. Goudos, "Faster R-CNN for multi-class fruit detection using a robotic vision system," *Comput. Netw.*, vol. 168, Feb. 2020, Art. no. 107036.
- [19] W. Li, "Analysis of object detection performance based on Faster R-CNN," *J. Phys.: Conf. Ser.*, vol. 1827, 2021, Art no. 012085, doi: 10.1088/1742-6596/1827/1/012085.
- [20] R. Yamashita, M. Nishio, R. K. G. Do, and K. Togashi, "Convolutional neural networks: an overview and application in radiology," *Insights Imaging*, vol. 9, pp. 611–629, Jun. 2018.
- [21] D. Thuan, "Evolution of YOLO algorithm and YOLOV5: the state-of-the-art object detection algorithm," B.S. thesis, Dept. Inf. Technol., Oulu Univ. Appl. Sci., Oulu, Finland, 2021. [Online]. Available: <https://www.theseus.fi/handle/10024/452552>
- [22] P. Punyato and N. Sidahao, "Implementation of a low-cost real-time people counting system on raspberry pi based on applied tiny YOLO V3," (in Thai), *Eng. Trans.: A Res. Publication Mahanakorn Univ. Technol.*, vol. 22, no. 2, pp. 72–78, 2019.
- [23] J. Du, "Understanding of object detection based on CNN family and YOLO," *J. Phys.: Conf. Ser.*, vol. 1004, 2018, Art. no. 012029, doi: 10.1088/1742-6596/1004/1/012029.
- [24] X. Yao, X. Wang, S. H. Wang, and Y. D. Zhang, "A comprehensive survey on convolutional neural network in medical image analysis," *Multimed. Tools Appl.*, 2020, doi: 10.1007/s11042-020-09634-7.
- [25] A. Rácz, D. Bajusz, and K. Héberger, "Effect of dataset size and train/test split ratios in QSAR/QSPR multiclass classification," *Molecules*, vol. 26, no. 4, p. 1111, Feb. 2021, doi: 10.3390/molecules26041111.
- [26] P. Henderson and V. Ferrari, "End-to-end training of object class detectors for mean average precision," in *Proc. 13th Asian Conf. Comput. Vis.*, Taipei, Taiwan, Nov. 2016, pp. 198–213.
- [27] S. Visa, B. Ramsay, A. Ralescu, and E. van der Knaap, "Confusion matrix-based feature selection," in *Proc. 22nd Midwest Artif. Intell. and Cogn. Sci. Conf.*, Cincinnati, OH, USA, Apr. 2011, pp. 120–127.

การออกแบบผังและปรับปรุงตำแหน่งจัดเก็บสินค้าเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ การบริหารคลังพัสดุ : กรณีศึกษาโรงพยาบาลรัฐแห่งหนึ่ง

รัฐประศาสน์ รักบางแหลม¹ อัครนันท์ พงศธรวิวัฒน์^{2*}

^{1,2*} คณะสถิติประยุกต์ สถาบันบัณฑิตพัฒนบริหารศาสตร์, กรุงเทพมหานคร, ประเทศไทย

¹ คณะโลจิสติกส์และการคมนาคมขนส่ง สถาบันการจัดการปัญญาภิวัฒน์, นนทบุรี, ประเทศไทย

*ผู้ประพันธ์บรรณกิจ อีเมล : akkaranan@as.nida.ac.th

รับต้นฉบับ: 9 ตุลาคม 2565; รับบทความฉบับแก้ไข: 2 ธันวาคม 2565; ตอบรับบทความ: 6 ธันวาคม 2565

เผยแพร่ออนไลน์: 22 ธันวาคม 2565

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์การศึกษาเพื่อออกแบบผังและปรับปรุงตำแหน่งการจัดวางสินค้าคงคลังภายในคลังสินค้าสำหรับจัดเก็บพัสดุของใช้สอยภายในโรงพยาบาลรัฐแห่งหนึ่ง จากการสำรวจสภาพปัญหาพบว่า กรณีศึกษามีการจัดเรียงสินค้าที่ไม่มีประสิทธิภาพให้กับกลุ่มสินค้าแต่ละรายการส่งผลให้ใช้ระยะเวลาการเดินหยิบสินค้าที่มากเกินไปจนเกิดความจำเป็น ข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์เพื่อปรับปรุงปัญหาดังกล่าว ประกอบด้วยความต้องการสินค้าจำนวน 244 รายการ แบ่งออกเป็น 3 กลุ่มผลิตภัณฑ์ ประกอบด้วยแบบพิมพ์, พัสดุและเครื่องใช้สำนักงาน ตัวแบบที่ใช้ในการศึกษาเปรียบเทียบประกอบด้วย การจัดกลุ่มผังเก็บสินค้าแบบ ABC-based Layout และตัวแบบคณิตศาสตร์เชิงเส้นเพื่อกำหนดตำแหน่งจัดวางสินค้า ผลจากการทดสอบเปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวแบบทั้งสองด้วยระยะทางการเดินหยิบสินค้าจากคลังสินค้าในการสั่งซื้อทั้งปี จากสถิติการใช้งานตลอดทั้งปีพบว่า ตำแหน่งการจัดวางสินค้าที่ได้ทดสอบรวมกับการจัดลำดับความสำคัญด้วยตัวแบบคณิตศาสตร์เชิงเส้น ช่วยลดระยะการเดินทางในการหยิบสินค้าลงได้จากเดิมที่มีระยะทางในการเดินรวม 81,950.6 เมตรต่อปี ลดลงเป็น 77,591.7 เมตรต่อปี หรือคิดเป็น 5 % และระยะเวลาเฉลี่ยจากเดิม 34 ชั่วโมง 2 นาที ลดลงเหลือ 32 ชั่วโมง 13 นาที

คำสำคัญ : การวิเคราะห์แบบเอปซี การปรับปรุงผังคลังสินค้า ตัวแบบกำหนดตำแหน่งจัดวางสินค้า

Layout Design and Storage Relocation for Warehouse Efficiency Improvement in Warehouse: A Case Study of a Public Hospital

Ratthaprasat Rakbanglaem^{1,2} Akkaranan Pongsathornwiwat^{2*}

^{1,2*}Graduate School of Applied Statistics, National Institute of Development Administration, Bangkok, Thailand

¹Faculty of Logistics and Transportation Management, Panyapiwat Institute of Management, Nonthaburi, Thailand

*Corresponding Author. E-mail address: akkaranan@as.nida.ac.th

Received: 9 October 2022; Revised: 2 December 2022; Accepted: 6 December 2022

Published online: 22 December 2022

Abstract

The objective of this study is to improve the warehouse performance by redesigning the warehouse layout and re-location for storing the odds and end in a public hospital. As surveyed, the background problem reveals that there is an ineffective storage policy for each product group, resulting in unvalued time-consuming and unproductive traveling in picking processes. To overcome this issue, this research gathered data on SKUs' picking frequency in total 244 items, categorized by three product groups, namely mold, odds and end, and office equipment. For the analysis, two main approaches: ABC class-based layout and storage relocation assignment model are applied for finding the appropriate warehouse layout and optimal storage location. The result from a comparative analysis of performance evaluations shows that the optimal layout derived by picking frequencies with considering of items' prioritization is the best design. With the new layout, the case gain benefits of better efficiency in terms of the shortest travel distance reduction from 81,950.6 to 77,591.7 meters a year (account for 5% of reduction) and the average time of picking processes deducts from 34.2 to 32.13 hours per year.

Keywords: ABC analysis, Storage relocation assignment model, Warehouse layout improvement

1) บทนำ

ปัจจุบันการจัดการคลังสินค้า (warehouse management) ถือเป็นกระบวนการสำคัญในการดำเนินการขององค์กร เพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดและป้องกันการสูญเสียต่าง ๆ ที่อาจเกิดขึ้น [1] โดยเฉพาะการจัดการสินค้าคงคลัง (inventory management) ที่เป็นการจัดการเกี่ยวกับรายการสินค้าภายในคลังสินค้า ควบคุมปริมาณสินค้าคงเหลือ (inventory) ให้มีความเหมาะสม รวมถึงการจัดการดูแลรักษาจัดเก็บทรัพยากรทั้งในปัจจุบันหรืออนาคต เพื่อให้การดำเนินการเป็นไปอย่างราบรื่น ดังนั้นการบริหารสินค้าคงคลังและคลังสินค้าเป็นสิ่งจำเป็นในการดำเนินงานขององค์กรทั้งภาครัฐและเอกชน ในส่วนของคลังพัสดุของโรงพยาบาลที่จัดเก็บอุปกรณ์สำหรับกระบวนการดำเนินงาน ไม่ว่าจะเป็นพัสดุลำงาน ตลอดจนอุปกรณ์เฉพาะทางที่ใช้ในการสนับสนุนการดำเนินงานเกี่ยวกับสุขภาพซึ่งเป็นปัจจัยพื้นฐานของประชาชน จึงมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อทั้งในผู้ป่วยและผู้ให้บริการ

คลังพัสดุของโรงพยาบาลรัฐได้ดำเนินการศึกษานี้ประสบปัญหาการจัดเรียงสินค้าคงคลังและจากข้อจำกัดทางด้านพื้นที่ อีกทั้งตัววัสดุที่ต้องการพื้นที่ในการจัดเก็บ เช่น อุปกรณ์ความสะอาด วัสดุสิ่งพิมพ์ เป็นต้น ทำให้มีสินค้าบางชิ้นถูกวางกองไว้บริเวณพื้น ดังแสดงในรูปที่ 1 อีกทั้งการที่ไม่มีการจัดลำดับความสำคัญในการแยกกลุ่มสินค้าที่มีประสิทธิภาพ ส่งผลให้สินค้าบางชนิดที่มีการใช้งานบ่อยครั้งกลับถูกวางไว้ยังบริเวณพื้นที่ด้านในของคลังสินค้า นอกจากนี้ยังสังเกตการจัดเก็บพัสดุที่ไม่ถูกต้องรวมกับการเลือกจัดวางตำแหน่งจัดเก็บที่ไม่เหมาะสมก่อให้เกิดระยะทางในการเดินหยิบสินค้าที่มากเกินไปจนความจำเป็นในการปฏิบัติงานสรุปรวมเป็นระยะทาง 81,950.6 เมตรต่อปี



รูปที่ 1 : ปัญหาการจัดวางสินค้าที่ไม่มีประสิทธิภาพภายในคลังพัสดุของโรงพยาบาลรัฐแห่งหนึ่ง

เพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าว งานวิจัยฉบับนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะออกแบบแผนผังจัดเก็บพัสดุและตำแหน่งจัดวางสินค้าเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการจัดการคลังสินค้าสำหรับพัสดุ กรณีศึกษาโรงพยาบาลรัฐแห่งหนึ่ง โดยมุ่งลดการสูญเสียจากการดำเนินงานและทำการจัดลำดับให้กับกลุ่มสินค้าแต่ละรายการ เทคนิคและตัวแบบที่ทำการประยุกต์ใช้ประกอบด้วยกรอบการออกแบบรูปแบบการจัดเก็บในแต่ละรูปแบบทั้งแบบ ABC Class-based layout และตัวแบบโปรแกรมคณิตศาสตร์เชิงเส้น ใช้โปรแกรม OpenSolver เวอร์ชัน 2.9.3 เข้ามาช่วยในการคำตอบของรูปแบบการจัดวางที่มีระยะการเดินหยิบสินค้าที่น้อยที่สุด และทดสอบประสิทธิภาพของตัวแบบผ่านการจำลองสถานการณ์การหยิบพัสดุเพื่อเปรียบเทียบระยะทางที่เกิดขึ้น

1.1) ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

1.1.1) การจัดการคลังสินค้า (Warehouse Management) คือการวางแผนพื้นที่เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพในการจัดเก็บสินค้าเพื่อให้เกิดความรวดเร็ว สะดวก สามารถใช้สอยและเคลื่อนย้ายสินค้าและวัตถุดิบในการจัดการคลังสินค้ารวมถึงการบริหารจัดการให้ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานตามให้เป็นไปตามวัตถุประสงค์ [1] ซึ่งคลังสินค้าเป็นสถานที่จัดเก็บชั่วคราวของสินค้าคงคลังและเป็นบัฟเฟอร์ (buffer) ในระบบห่วงโซ่อุปทานทำหน้าที่ตอบสนองความพร้อมต่อความต้องการของผู้บริโภคและด้วยเหตุนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่ออำนวยความสะดวกในการเคลื่อนย้ายสินค้าจากผู้จำหน่ายให้กับลูกค้าตอบสนองความต้องการในเวลาและต้นทุนที่เหมาะสม [2] โดยนโยบายบริหารจัดการจะขึ้นอยู่กับการจัดแบ่งรูปแบบการจัดเก็บสินค้ามีการแบ่งตามลักษณะของการจัดเก็บ ดังนั้น การวางแผนคลังสินค้า (warehouse layout) จะเน้นไปถึงการวางแผนของคลังสินค้าหรือวัสดุ โดยทั่วไปมักจะต้องการให้สินค้ามีลักษณะการเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงระยะทางการเคลื่อนที่ทั้งของพนักงานและสินค้าต้องสั้น กะทัดรัด เพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์นี้ ช่องทางเดิน (aisle lane) ควรจะแคบที่สุดโดยไม่กระทบกับประสิทธิภาพของการจัดเก็บและไม่ควรเป็นทางตัน [3]

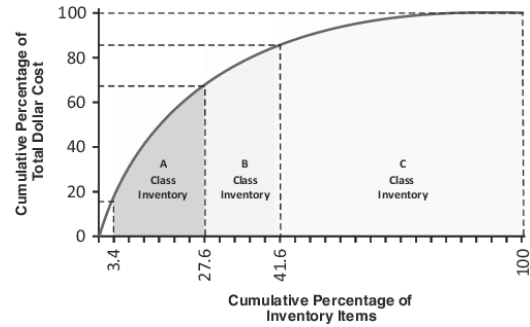
1.1.2) กระบวนการจัดเก็บของคลังสินค้า (Warehouse Operations) จะต้องพิจารณาปัจจัยของสินค้าและปัจจัยด้านพื้นที่คลังสินค้า ในปัจจัยด้านคลังสินค้าที่จะต้องนำมาพิจารณาประกอบการทำแผนจัดเก็บสินค้า ได้แก่ ปริมาณและความถี่การผ่านเข้า-ออกของสินค้าแต่ละชนิด และคุณลักษณะสินค้าว่าเป็นสินค้าน้ำหนักสูง แดกหักง่าย เปราะบาง หรือเป็นสินค้าอันตราย ข้อมูลข้างต้นนำมาใช้ในการจัดสรรพื้นที่และตำแหน่งหรือสถานที่

เก็บ สินค้าที่มีปริมาณเข้า-ออกมากก็จะจัดสรรพื้นที่เก็บมาก และเก็บไว้ใกล้ประตูเข้า-ออก และ ระบบการจัดเก็บ (storage system) คลังสินค้าจะใช้ระบบการจัดเก็บแบบใดนั้น ต้องทำการพิจารณาการจัดวางตามทิศทางของการหยิบสินค้า ตลอดจนปัจจัยต่าง ๆ ตามที่เหมาะสมกับลักษณะสินค้าที่จัดเก็บ [1] และความเหมาะสมระบบการจัดเก็บ [2] ระบบรูปแบบในการจัดเก็บสินค้านั้นถูกแบ่งออกได้เป็น 6 รูปแบบ [3] ประกอบด้วย

- 1) ระบบจัดเก็บแบบไร้รูปแบบ (informal system) รูปแบบการจัดเก็บสินค้าไว้ในตำแหน่งใดก็ได้ภายในคลังสินค้า เหมาะสำหรับคลังสินค้าที่มีขนาดเล็ก จำนวนสินค้าและพื้นที่จัดเก็บน้อย
- 2) ระบบจัดเก็บโดยกำหนดตำแหน่งตายตัว (fixed ตำแหน่งจัดวาง system) กำหนดตำแหน่งพื้นที่จัดเก็บสินค้าไว้ตายตัว เหมาะสำหรับคลังสินค้าที่มีขนาดเล็ก มีจำนวนพนักงานปฏิบัติงานและจำนวนสินค้าน้อย
- 3) ระบบจัดเก็บโดยจัดเรียงตามรหัสสินค้า (part number system) สร้างรหัสสินค้ากำหนดลำดับและพื้นที่ในการจัดเก็บสินค้า เหมาะกับคลังสินค้าที่มีการเคลื่อนไหวสูง
- 4) ระบบจัดการจัดเก็บสินค้าตามประเภทของสินค้า (commodity system) จัดเก็บสินค้าโดยการแบ่งกลุ่มและจัดเก็บตามประเภทของตัวสินค้า มีความยืดหยุ่นสูงและสะดวกต่อการหยิบสินค้า
- 5) ระบบการจัดเก็บที่ไม่ได้กำหนดตำแหน่งตายตัว (random ตำแหน่งจัดวาง system) ไม่มีการกำหนดตำแหน่งการจัดเก็บแบบตายตัว แต่มีการใช้ระบบสารสนเทศเข้ามาช่วยในการติดตามข้อมูลสินค้า และต้องมีกระบวนการปรับปรุงข้อมูลอยู่ตลอด
- 6) ระบบการจัดเก็บแบบผสม (combination system) เป็นรูปแบบการจัดเก็บที่ผสมผสานหลักการของรูปแบบการจัดเก็บต่าง ๆ โดยพิจารณาจากเงื่อนไขหรือข้อจำกัดของสินค้านั้น ๆ เหมาะกับคลังสินค้าขนาดใหญ่ที่มีการจัดเก็บที่หลากหลาย

1.1.3) การออกแบบผังด้วยแนวคิดแบบ ABC Analysis เพื่อใช้วิเคราะห์ความมีประสิทธิภาพของระบบบริหารวัสดุสำรองคลัง [3] การวิเคราะห์ใช้ค่าเฉลี่ย ความถี่ และร้อยละ แบ่งออกเป็น 3 กลุ่มคือ A, B, C ตามลำดับความสำคัญของตัวสินค้า

- A หมายถึง สินค้าที่มีความสำคัญอย่างยิ่ง
- B หมายถึง สินค้าที่มีความสำคัญปานกลาง
- C หมายถึง สินค้าที่มีความสำคัญน้อย



รูปที่ 2 : ลักษณะการแบ่งความสำคัญตาม ABC Analysis [3]

การจัดแบ่งสัดส่วนจะถูกแบ่งออกเป็นไปตามประเภท ประเภท A มีปริมาณสินค้าคงคลังประมาณ 5 ถึง 10 เปอร์เซ็นต์ของรายการสินค้าคงคลังทั้งหมด แต่มีมูลค่าสูงอยู่ที่ประมาณ 75 ถึง 80 เปอร์เซ็นต์ของมูลค่าของคลังทั้งหมด ประเภท B มีปริมาณสินค้าคงคลังประมาณ 20 ถึง 30 เปอร์เซ็นต์ของรายการสินค้าคงคลังทั้งหมด แต่มีมูลค่าอยู่ที่ประมาณ 15 เปอร์เซ็นต์ของมูลค่าของคลังทั้งหมด และประเภท C มีปริมาณสินค้าคงคลังส่วนที่เหลือประมาณ 40 ถึง 50 เปอร์เซ็นต์ของรายการของสินค้าคงคลังภายในคลังสินค้าทั้งหมด แต่มีมูลค่าโดยประมาณเพียง 5 ถึง 10 เปอร์เซ็นต์ของมูลค่าของคลังสินค้าของระบบ

1.1.4) การออกแบบผังด้วยแนวคิดแบบ FSN Analysis การคัดแยกวัสดุตามความถี่ในการใช้งาน [3]–[5] โดยจัดแบ่งตามความถี่ในการใช้งาน มีเกณฑ์การพิจารณาตามลักษณะแบ่งออกเป็น F หมายถึงสินค้าที่มีการเคลื่อนไหวสูงหรือไว, S หมายถึงสินค้าที่มีการเคลื่อนไหวปานกลาง และ N หมายถึงสินค้าที่มีการเคลื่อนไหวต่ำหรือไม่มีการเคลื่อนไหว เพื่อพิจารณาปริมาณอัตราการใช้ ในการนำเป็นแนวทางสำหรับออกแบบการจัดวางสินค้าให้เกิดประสิทธิภาพ ตามลักษณะในรูปที่ 3

Shows particulars of FSN analysis			
Particulars	F-class item	S-class item	N-class item
Stock	High	Intermediate	low
Control	High	Intermediate	Low
Check	Tight	Intermediate	No
Safety stock	High	Low	Rare

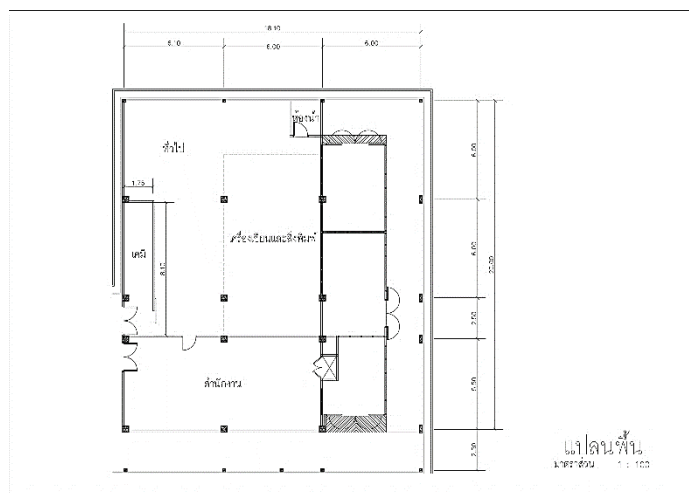
รูปที่ 3 : รูปแบบการวิเคราะห์ด้วย FSN Analysis [4]

ลักษณะการวิเคราะห์จะคำนึงถึงรายการสินค้าที่มีความถี่ในการใช้งานบ่อยให้ถูกจัดเก็บไว้ใกล้จุดทางออกให้มากที่สุด โดยพิจารณาได้จากสมการ

$$\text{อัตราการใช้งาน (Consumption rate)} = \frac{\text{ปริมาณการใช้ต่อปี}}{\text{จำนวนวันทำการ}}$$

ลักษณะการจัดเก็บสินค้าจะถูกแบ่งออกเป็น 2 โซน คือ จัดเก็บแบบพาเลท ตำแหน่งจัดวาง F (on floor) และจัดเก็บบนชั้นวาง ตำแหน่งจัดวาง D, E (on rack) ทำการจำแนกกลุ่มตัวอย่างจากกลุ่มสินค้าที่มีอัตราการใช้งานสูง 2 หมวด จำนวนสินค้าทั้งหมด 244 รายการ โดย ตำแหน่งจัดวาง F จะมีสินค้าที่บังคับวางบนพาเลทสามารถวางได้ 2 SKUs ต่อ 1 ตำแหน่งจัดวาง

แต่สามารถนำสินค้าแบบกล่องกระดาษ (carton) ที่วางบนชั้น
เก็บของมาวางบนพาเลทได้ 6 SKUs ต่อ 1 ตำแหน่งจัดวาง โดย
ที่ ตำแหน่งจัดวาง D สามารถวางสินค้าบนชั้นวางได้ 3 SKUs ต่อ
1 ตำแหน่งจัดวาง และ ตำแหน่งจัดวาง E สามารถวางสินค้าได้ 6
SKUs ต่อ 1 ตำแหน่งจัดวาง



รูปที่ 5 : แผนผังคลังสินค้าจัดเก็บพัสดุโรงพยาบาลรัฐแห่งหนึ่ง

2.2) กำหนดกลุ่มสินค้าโดยการวิเคราะห์เอฟเอสเอ็น (FSN Analysis)

ผู้วิจัยได้นำการวิเคราะห์เอฟเอสเอ็น (FSN analysis) เพื่อทำการจัดกลุ่มและระบุกลุ่มสินค้าที่สนใจทำการศึกษา โดยได้หยิบกลุ่มตัวอย่างจากกลุ่มสินค้าที่มีอัตราการใช้งานบ่อย 2 หมวด จากทั้งหมด 33 หมวด เน้นในกลุ่มสินค้าที่มีอัตราการเคลื่อนไหวสูง จากจำนวนความถี่ในการหยิบของแต่ละเดือน ของสินค้ากลุ่มนั้น เนื่องจากข้อจำกัดในการใช้งานข้อมูล จึงได้พิจารณาหยิบกลุ่มสินค้าที่มีจำนวนมากมา 2 หมวด คือหมวด A และหมวด D ซึ่งมีจำนวนสินค้ารวม 244 รายการ ได้จากผลการวิเคราะห์ที่ได้ตามรูปที่ 6

Code	Category	SKU	ความถี่การใช้งาน	สัดส่วน	กลุ่ม
A	แบบพิมพ์	206	40,386	0.217	F
B	ถังและกระสอบ	31	35,263	0.189	F
C	รายการอื่นๆ	2	29,684	0.159	F
D	พัดลมและเครื่องใช้สำนักงาน	38	22,348	0.120	F
E	สว่านพกพาและยาสิพื้น	4	17,331	0.093	F
F	ผลิตภัณฑ์กระดาษห่อวามะฮวด	3	7,971	0.043	S
G	ระบบกรงใช้ของอัตโนมัติ คุกรังเพื่อคุมพืชร	2	7,920	0.042	S
H	ยาขัดและยาทำความสะอาด	4	7,767	0.042	S
I	เครื่องใช้ประจำวัน	3	6,048	0.032	S
J	รองเท้าผู้ชาย	4	3,030	0.016	S
K	ชุดเตรียมอาหารและเลี้ยงดู	3	2,618	0.014	S
L	เครื่องแต่งกายสำหรับวามพิเศษ	4	1,378	0.007	S
M	ภาษาที่ใช้ไปรษณีย์ของไปรษณีย์	12	1,063	0.006	S
N	วัสดุประดิษฐ์ด้วยพลาสติก	2	913	0.005	N
O	อุปกรณ์และสิ่งของในท้องถิ่น	1	703	0.004	N
P	เครื่องปั้น	1	372	0.002	N
O	เครื่องมือและภาษาในครัว	5	278	0.001	N

รูปที่ 6 : ตารางแสดงผลการวิเคราะห์ด้วยเอฟเอสเอ็น

2.3) เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัยและรวบรวมข้อมูล

ข้อมูลที่ได้มีรายละเอียดการสั่งซื้อและจำนวนการใช้สินค้าในแต่ละรายการ ข้อมูลดังกล่าวจะถูกสรุปเป็นค่าความถี่ในการสั่งซื้อโดยใช้ Pivot table ของโปรแกรม Excel สรุปมูลค่าความถี่ในการหยิบสินค้าหมวด A และหมวด B โดยนับจากจำนวนครั้งของข้อมูลในการเบิกสินค้า จากข้อมูลสถิติปริมาณความเคลื่อนไหว รายการสำรองวัสดุ ของคลังพัสดุ ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 : ตัวอย่างค่าความถี่ในการหยิบสินค้า

Item-ID	01/04/2563	01/10/2562	01/11/2562	Total
A1		2		2
A2		1	1	2
A6		1	1	2
D24	1			1
D3		1		1
D8			1	1
Total	1	33	6	40

2.3.1) กำหนดค่าความสำคัญของกลุ่มสินค้าโดยการวิเคราะห์เอบีซี (ABC Analysis) ในการกำหนดค่าความสำคัญให้กับสินค้าทั้งหมด 244 รายการ ในการแยกกลุ่มสินค้า โดยได้หิบบกลุ่มตัวอย่างจากกลุ่มสินค้าที่มีอัตราการใช้งานสูง 2 หมวด A และ D โดยพิจารณาจากสัดส่วนการใช้งานต่อปี ซึ่งคำนวณได้จากการนำข้อมูลปริมาณการใช้งานซึ่งเป็นข้อมูลสถิติแสดงปริมาณความเคลื่อนไหวของพัสดุของคลังพัสดุในช่วงเวลา 12 เดือน ของสินค้าแต่ละรายการ เพื่อมาคำนวณหาปริมาณการใช้สะสมต่อปีซึ่งเท่ากับ 14,178 ครั้งต่อปี จากนั้นนำอัตราการใช้ต่อปีของสินค้าแต่ละรายการมาหาค่าเฉลี่ยเพื่อจัดลำดับความสำคัญ ผลการวิเคราะห์ที่ได้แสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 : ตัวอย่างผลการวิเคราะห์ด้วย ABC Analysis

พัสดุ	การใช้ต่อปี (ครั้ง)	การใช้รวมสะสม (ครั้งต่อปี)	% สะสม	กลุ่ม	สัดส่วนการใช้
F1	1097	1097.00	8%	A	8%
E1	734	1831.00	13%	A	5%
H1	597	2428.00	17%	A	4%
B1	573	3001.00	21%	A	4%
B2	432	3433.00	24%	A	3%
A1	395	3828.00	27%	A	3%
A2	360	4188.00	30%	A	3%
A3	319	4507.00	32%	A	2%

สรุปสินค้าที่ได้ทำการศึกษาแบ่งแยกตามโซนจัดเก็บ

โซน C 30 ตำแหน่งจัดวาง จำนวนสินค้า 90 SKUs

โซน E 13 ตำแหน่งจัดวาง จำนวนสินค้า 78 SKUs

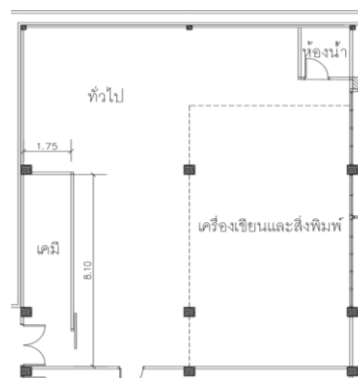
โซน F 30 ตำแหน่งจัดวาง จำนวนสินค้า 76 SKUs

โดยสินค้าทั้งหมดจัดอยู่ในส่วนที่มีอัตราการเคลื่อนไหวสูง และไล่ลำดับความสำคัญตามความถี่ในการหยิบใช้งานตามการวิเคราะห์ด้วยเอบีซี (ABC analysis)

2.4) วิธีการเก็บข้อมูล

คลังสินค้าได้ทำการจัดเก็บสินค้าจำพวกวัสดุอุปกรณ์เครื่องใช้สำนักงานที่ใช้ภายในโรงพยาบาลรัฐแห่งหนึ่ง โดยมีกลุ่มสินค้าทั้งหมด จำนวน 33 หมวด และจำนวนสินค้านับรวมทั้งหมด 350 รายการ (SKUs) ตัวอย่างเช่น ถุงขยชะ หมึกพิมพ์ และแบบฟอร์มต่าง ๆ เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 7 คลังสินค้าที่ทำการศึกษามีพื้นที่

จัดเก็บเท่ากับ 175 ตารางเมตร มีตำแหน่งจัดวางจัดเก็บบน Pallet ได้ทั้งหมด 62 ตำแหน่ง และจัดเก็บสินค้าบนชั้นเก็บของ (rack) ได้ 276 ตำแหน่งจัดวาง มีสินค้าที่มีอัตราการหมุนเวียนสูงอยู่ที่ประมาณ 78 SKUs โดยทำการหิบบเฉพาะกลุ่มสินค้าที่มีอัตราการใช้งานสูง 2 หมวดคือ A และ D มาทำการศึกษาในครั้งนี้



รูปที่ 7 : พื้นที่คลังสินค้าที่ทำการศึกษา

2.4.1) ข้อมูลความถี่ในการใช้งานของสินค้าแต่ละรายการ ดำเนินการแยกข้อมูลออกจากสถิติปริมาณ ความเคลื่อนไหว รายการสำรองวัสดุ ของคลังพัสดุในช่วงเวลา 12 เดือน โดยใช้ฟังก์ชัน SUMIF ในการรวมข้อมูลความถี่จากตาราง Pivot table ในตารางที่ 4 สำหรับการหาค่าการหิบบสินค้าทั้งหมดเป็นรายปีเพื่อนำมาใช้ในการวิเคราะห์ขั้นต่อไป

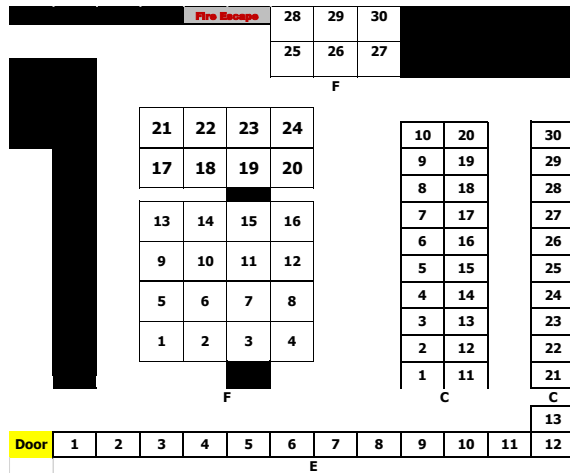
ตารางที่ 4 : จำนวน SKU ที่ทำการศึกษาวเคราะห์

Category	SKU	ความถี่การใช้งาน
A	206	40,386
D	38	22,348
จำนวนรวม	244	62,734

จากการรวบรวมข้อมูลความถี่ในการหิบบสินค้า โดยใช้ข้อมูลการเบิก 12 เดือนของสินค้าทั้งหมด 244 รายการ พบว่า กลุ่มสินค้าที่มีอัตราการใช้งานสูง 2 หมวดคือ A และ D ซึ่งจะถูกนำมาวิเคราะห์ในการศึกษาครั้งนี้

2.5) การวิเคราะห์ข้อมูล

ทำการศึกษาพื้นที่คลังพัสดุในการระบุตำแหน่ง พื้นที่วางสินค้า outbound (I/O) และทำการวัดระยะการเดินทางในแต่ละตำแหน่งจัดวาง ที่จัดเก็บไปยังจุด I/O สำหรับการวิเคราะห์ระยะทาง

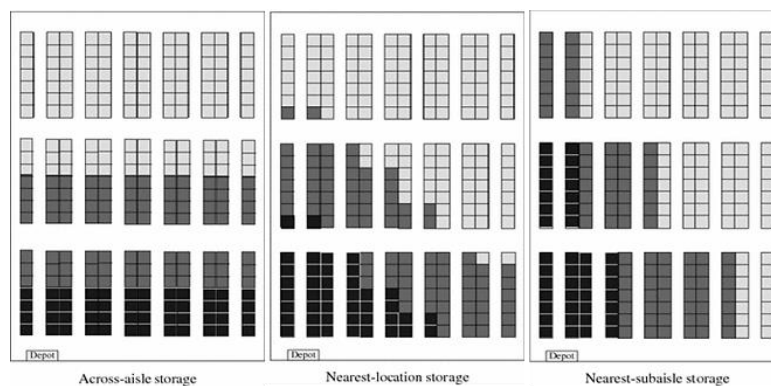


รูปที่ 8 : พื้นที่คลังสินค้าในส่วนที่นำมาวิเคราะห์

รูปที่ 8 แสดงรูปแบบโซนการวางสินค้าถูกกำหนดไว้ด้วยข้อกำหนดของพื้นที่ 3 โซน C E และ F มีจำนวน ตำแหน่งจัดวางทั้งหมด 228 ตำแหน่งจัดวาง แบ่งเป็นวางกองบนพาเลท (on floor) 60 ตำแหน่งจัดวาง (โซน F) และวางบนชั้นจัดเก็บสินค้า

(on rack) 168 ตำแหน่งจัดวาง (โซน C และโซน E) ในการหา ระยะทางจากจุด (I/O) ถึง ตำแหน่งจัดวาง forward pick area จัดการแบ่งพื้นที่โดยพิจารณาจากรูปแบบการจัดเก็บและลำดับความสำคัญของแต่ละตัวสินค้า อ้างอิงจากการวิเคราะห์ความถี่ในการหยิบใช้

2.5.1) กำหนดค่าตัวแปรและการวิเคราะห์เพื่อกำหนดจุดวางสินค้า โดยคำนวณระยะทางจากจุด I/O ถึง ตำแหน่งจัดวาง ที่กำหนดไว้ทั้งไปและกลับ รวมค่าเป็นระยะทางต่อปีต่อ SKUs ทั้งหมด 228 ตำแหน่งจัดวาง (storage location) จากนั้นทำการจัด ตำแหน่งจัดวาง 3 รูปแบบตามทฤษฎีรูปแบบการจัดเก็บสินค้า [8] (product inventory layout, PIL) ทั้ง 3 รูปแบบโดนใช้รูปแบบ Across-aisle, Diagonal และ Within-Aisle เทียบกับการจัดวางสินค้ารูปแบบเดิม ด้วยการกำหนดเงื่อนไขในการจัดเก็บสินค้าแบ่งตามประเภทและรูปแบบในการจัดเก็บ ดังแสดงในรูปที่ 9 โดยแต่ละตำแหน่งจัดวางได้มีการวัดระยะทางจากหน้าประตู (I/O) ไปยังตำแหน่งจัดวางดังตารางที่ 5



รูปที่ 9 : รูปแบบการจัดเก็บสินค้าทั้ง 3 รูปแบบ [8]

ตารางที่ 5 : ตารางระยะทางการเดินจากจุด I/O ไปยังตำแหน่งจัดวาง

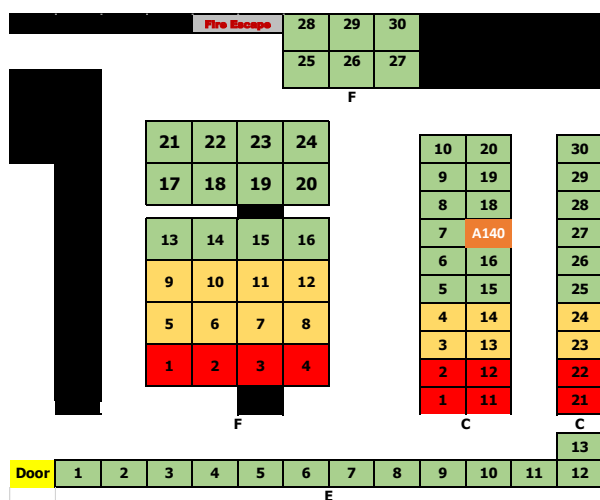
Form	Zone	Number	Location	Distant(m)
Door	C	1	C1	8.15
Door	C	2	C2	9.15
Door	C	3	C3	10.15
Door	C	4	C4	11.15
Door	C	5	C5	12.15
Door	C	6	C6	13.15
Door	C	7	C7	14.15

ผลลัพธ์ที่ได้จากการนำรูปแบบตามทฤษฎีรูปแบบการจัดเก็บสินค้าพบว่าแต่ละรูปแบบมีลักษณะการวางสินค้าที่แตกต่างกัน

อย่างชัดเจน ลักษณะการจัดวางจะถูกแสดงออกมาตามลักษณะของสีที่ไล่ระดับตามของโซนที่จัดเก็บสินค้าแบ่งเป็น Across-aisle, Diagonal, Within-Aisle โดยแบ่งระดับตามสีจาก แดง (สินค้าที่มีอัตราการหยิบสูง) เหลือง (สินค้าที่มีอัตราการหยิบปานกลาง) และเขียว (สินค้าที่มีอัตราการหยิบต่ำ) ตามลำดับความสำคัญ โดยใช้สินค้ารหัส A140 มาทำการจำลองการหยิบสินค้า จากเดิม การเดินหยิบสินค้ารหัส A140 จะมีระยะทางเท่ากับ 20.1 เมตร ต่อรอบการหยิบสินค้า 1 ครั้ง

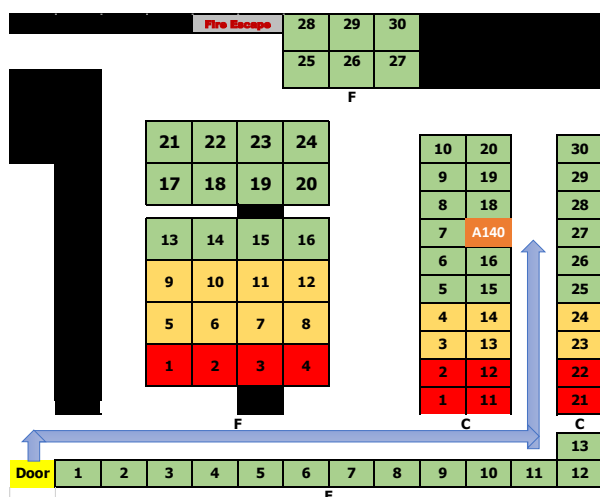
รูปที่ 10 แสดงรูปแบบ Across-aisle มีลักษณะรูปแบบการจัดวาง layout เป็นแนวขวางไปกับพื้นที่คลังสินค้า การแบ่งการจัดเก็บกลุ่มสินค้าที่มีความสำคัญมากที่สุดให้อยู่บริเวณด้านหน้า

ใกล้กับจุดรับ-ส่งสินค้า และสินค้าที่มีความสำคัญน้อยสุดอยู่ด้านหลังสุด สามารถระบุลำดับของสินค้าได้ชัดเจน ลักษณะดังกล่าวจึงมุ่งเน้นความสำคัญไปที่สินค้าที่มีอัตราการหยิบที่สูงเป็นหลัก



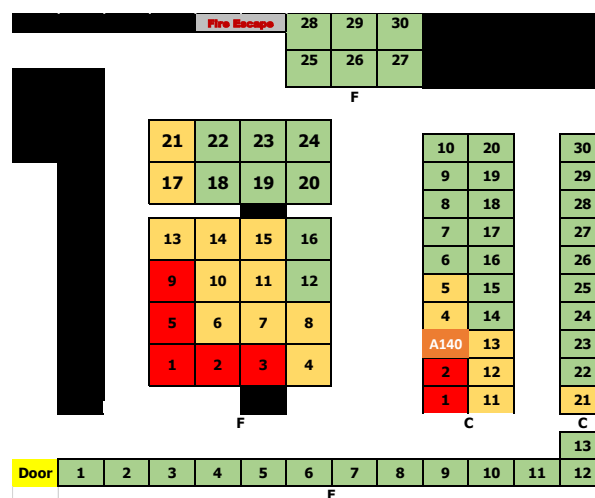
รูปที่ 10 : ลักษณะการจัดวางสินค้าแบบ Across-aisle

รูปที่ 11 แสดงการจำลองเส้นทางการเดินหยิบสินค้าในการจัดวางรูปแบบ Across-aisle โดยกำหนดสินค้ารหัส A140 ในการจำลองการเดิน และใช้ลูกศรแสดงเส้นทางการเดินหยิบสินค้าได้ผลของระยะทางเท่ากับ 30.1 เมตร ต่อรอบการหยิบสินค้า



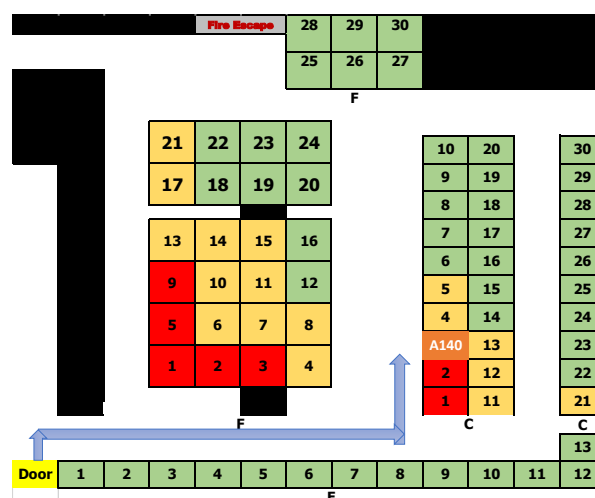
รูปที่ 11 : ลักษณะการเดินหยิบสินค้าที่จัดเก็บแบบ Across-aisle

รูปที่ 12 แสดงรูปแบบ Diagonal อีกรูปแบบหนึ่งที่มีลักษณะรูปแบบจากจัดวาง layout การจัดเก็บในแนวเส้นทแยงมุม สินค้าที่มีอัตราการใช้งานสูงเกาะกลุ่มในบริเวณทางเดินหลัก และกระจายกลุ่มสินค้าที่มีความสำคัญออกตามขอบเขตแนวเส้นทแยงมุม



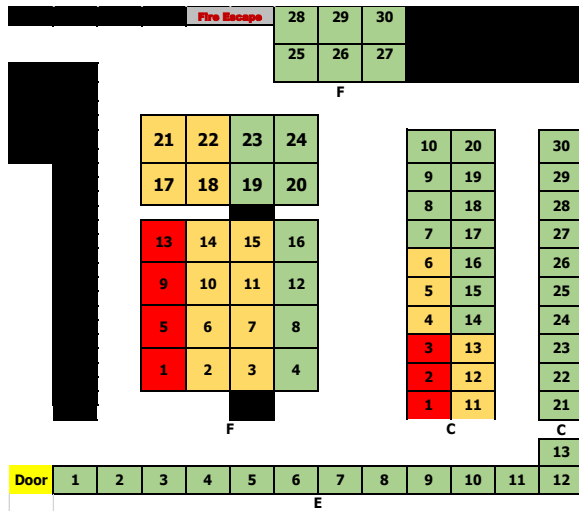
รูปที่ 12 : ลักษณะการจัดวางสินค้าแบบ Diagonal

รูปที่ 13 แสดงการจำลองการเดินหยิบสินค้าในการจัดวางรูปแบบ Diagonal โดยกำหนดสินค้ารหัส A140 ในการจำลองการเดิน ผลของระยะทางที่ใช้ระยะทาง 20.3 เมตร ต่อรอบการเดินหยิบสินค้า



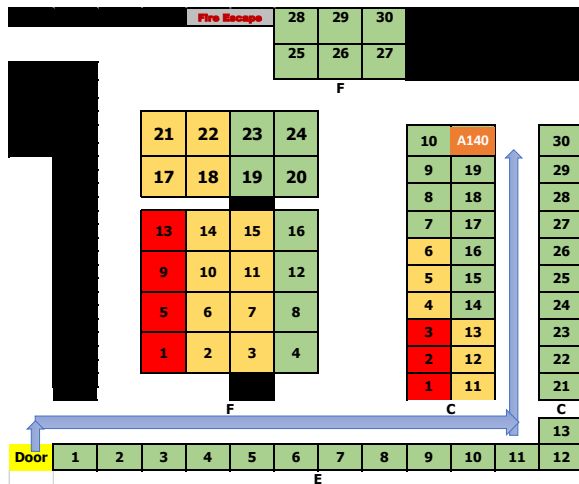
รูปที่ 13 : ลักษณะการเดินหยิบสินค้าที่จัดเก็บแบบ Diagonal

รูปที่ 14 แสดงรูปแบบ Nearest-sub aisle storage มีลักษณะรูปแบบจากจัดวาง layout ที่เน้นการจัดเก็บสินค้าโดยจัดหมวดหมู่ประเภทของสินค้า เน้นให้สินค้าที่มีอัตราการใช้งานสูงอยู่ติดกับทางเดินหลัก เหมาะสำหรับ layout ที่มีการแบ่งบล็อกการจัดเก็บหลากหลายบล็อก จากนั้นทำการเปรียบเทียบระยะทางการหยิบสินค้ารวมต่อปีของลักษณะการจัดวางทั้ง 4 รูปแบบ เพื่อหารูปแบบที่มีระยะการเดินหยิบสินค้ารวมสั้นที่สุด



รูปที่ 14 : ลักษณะการจัดวางสินค้าแบบ Within-Aisle

รูปที่ 15 จำลองการเดินทางหยิบสินค้าในการจัดวางรูปแบบ Nearest-sub aisle storage โดยกำหนดสินค้ารหัส A140 ในการจำลองการเดินทาง ผลของระยะทางที่ใช้ระยะทาง 36.1 เมตรต่อรอบการเดินทางหยิบสินค้า



รูปที่ 15 : ลักษณะการเดินทางหยิบสินค้าที่จัดเก็บแบบ Within-Aisle

ตารางที่ 6: ระยะการเดินทางหยิบสินค้าเปรียบเทียบทั้ง 3 รูปแบบ

รูปแบบ	แบบเดิม	แบบ Across-ais	แบบ Diagonal	แบบ Within-Aisle
ระยะทาง (เมตร)	100.5	150.5	101.5	180.5

ตารางที่ 6 แสดงผลของระยะทางทั้งหมดที่ใช้ในจากทั้ง 3 รูปแบบการจัดเก็บด้วยเทคนิค Class-based warehouse layout

จากผลที่ได้พบว่า เนื่องจากการเลือกตำแหน่งในการวางสินค้าแต่ละตำแหน่งจัดวาง ทำการจัดรูปแบบการวางสินค้าด้วยมือ โดยนำค่าความถี่ในการหยิบสินค้ามาช่วยในการพิจารณา ผลลัพธ์ที่ได้อาจไม่ใช่ค่าที่ดีที่สุดจึงเลือกดำเนินการสร้างกำหนดสมการเชิงเส้นเพื่อใช้ในการยืนยันค่าที่เหมาะสมที่สุด [9]

2.5.2) ตัวแบบกำหนดการคณิตศาสตร์เชิงเส้น (Linear-Programming Formulation)

กำหนดให้

i คือ สินค้าแต่ละ SKUs

l คือ ตำแหน่งจัดเก็บสินค้า (ตำแหน่งจัดวาง number)

พารามิเตอร์ (parameter)

D_{il} คือ ระยะทางของการหยิบสินค้าแต่ละ SKUs (i) ในแต่ละตำแหน่งจัดวาง การจัดเก็บ (l) ถึงจุดพื้นที่วางสินค้า outbound (I/O)

F_i คือ ความถี่การหยิบของสินค้า SKU i

L คือ ตำแหน่งโซนการจัดเก็บ (ตำแหน่งจัดวาง number) โดยกำหนดให้ $L = \{1, 2, 3, \dots, 228\}$ ตัวแปรตัดสินใจ (decision variable)

X_{il} คือ สินค้า i ถูกเลือกจัดเก็บในตำแหน่งจัดเก็บสินค้า l สมการที่ (1) แสดงสมการวัตถุประสงค์ (objective function)

$$\min \sum_{i=1}^N \sum_{l=1}^L F_i D_{il} X_{il} \quad (1)$$

สมการที่ (2)-(6) สมการข้อจำกัด (constraints)

$$\sum_{i=1}^L X_{il} \leq 1 \quad \forall l \in L \quad (2)$$

$$\sum_{i \in SC} \sum_{l \in LC} X_{il} = 90 \quad (3)$$

$$\sum_{i \in SE} \sum_{l \in LE} X_{il} = 78 \quad (4)$$

$$\sum_{i \in SF} \sum_{l \in LF} X_{il} = 60 \quad (5)$$

$$X_{il} = 0,1 \quad (6)$$

โดยกำหนดให้

LC = เซตของโซนการจัดเก็บสินค้า โดย $LC = \{1, 2, \dots, 90\}$, Where $LC \in L$

LE = เซตของโซนการจัดเก็บสินค้า โดย $LE = \{91, 92, \dots, 168\}$, Where $LE \in L$

LF = เซตของโซนการจัดเก็บสินค้า โดย $LF = \{169, 170, \dots, 228\}$, Where $LF \in L$

N = จำนวนของสินค้า SKUs โดยที่ $N = \{1, 2, 3, \dots, 244\}$

SC = เซตของสินค้าที่จัดเก็บในโซน C , โดยที่ $SC \in N$

SE = เซตของสินค้าจัดเก็บในโซน E , โดยที่ $SE \in N$

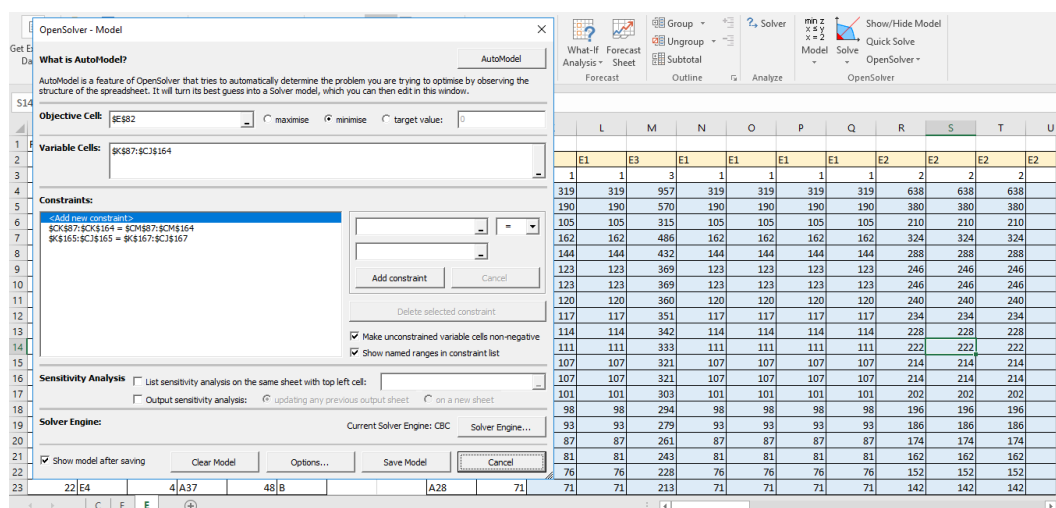
SF = เซตของสินค้าจัดเก็บในโซน F , โดยที่ $SF \in N$

สำหรับการหาคำตอบ ทางผู้วิจัยได้ทำการกำหนดโมเดลโดยการใช้ Excel Solver ในการระบุตำแหน่งที่เหมาะสมสร้างตาราง

template โดยมีข้อมูลสินค้า (Product-Code) , ตำแหน่งจัดวาง (L), ระยะทาง (D_{ij}) และความถี่การใช้งาน (F_i)

ตารางที่ 7 : ตาราง Template สำหรับการหาคำตอบ

Distance Matrix								
		E1	E13	E13	E13	E13	E13	E13
SKUs		1	13	13	13	13	13	13
A3	319	319	4147	4147	4147	4147	4147	4147
A7	190	190	2470	2470	2470	2470	2470	2470
A19	105	105	1365	1365	1365	1365	1365	1365
A8	162	162	2106	2106	2106	2106	2106	2106
A162	3	3	39	39	39	39	39	39
A163	3	3	39	39	39	39	39	39
D28	3	3	39	39	39	39	39	39
A164	2	2	26	26	26	26	26	26
A165	2	2	26	26	26	26	26	26



รูปที่ 16 : Model การหาคำตอบของปัญหาตำแหน่งจัดวางสินค้า (Storage Location Assignment Problem)

Decision Matrix			E1	E1	E3	E12	E12	E12	E13	E13	E13	E13	E13	E13			
SKUs			1	1	3	12	12	12	13	13	13	13	13	13			
A3	319		0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1 =		1
A7	190		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1 =		1
A158	3		0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1 =		1
A160	3		0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1 =		1
A161	3		0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1 =		1
A162	3		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1 =		1
A163	3		0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1 =		1
D28	3		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1 =		1
A164	2		0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1 =		1
A165	2		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1 =		1
			1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1			
			=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=			
			=	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1			

รูปที่ 17 : ตารางแสดงผลจากโปรแกรม Open Solver

2.5.3) ใช้ *Open Solver* ในการหาตำแหน่ง ตำแหน่งจัดวางที่ให้ค่าที่เหมาะสมที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 16 เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับ การจัดรูปแบบการจัดเก็บสินค้าจากเดิมทั้ง 4 รูปแบบ ผลที่ได้จากการหาคำตอบที่ดีที่สุด แสดงในรูปที่ 17

เปรียบเทียบระยะการเดินทางหยิบสินค้าตามรูปแบบการจัดเก็บสมการที่ (7) สมการคำนวณระยะทางการเดิน (Distance Matrix)

$$Z_{il} = |D_{il} * 2| \quad (7)$$

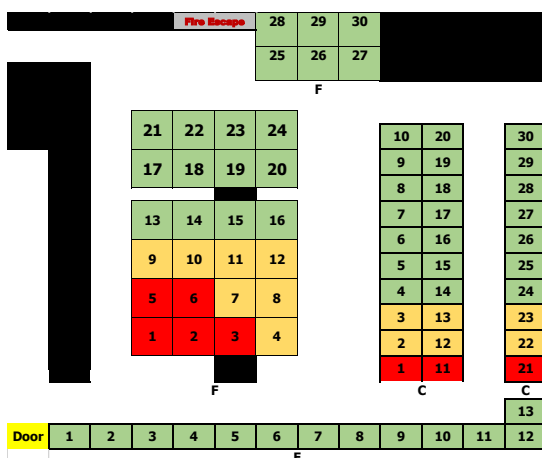
กำหนดให้ D_{il} คือ ระยะการเดินทางหยิบสินค้า i ที่จัดเก็บในตำแหน่งจัดเก็บสินค้า l

โดยหนึ่งรอบการหยิบสินค้าจะเริ่มต้นจากจุด I/O ไปยังตำแหน่งจัดวาง l และจากตำแหน่งจัดวาง l กลับมายังจุด I/O นับเป็น 1 รอบการเดินทางหยิบสินค้า นำค่าที่ได้ในแต่ละครั้งในการหยิบสินค้ามาคำนวณระยะทางในการเดินรวมทั้งหมดในแต่ละตำแหน่ง เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบระยะการเดินทางรวมต่อปีของรูปแบบการจัดเก็บสินค้าทั้ง 4 รูปแบบ

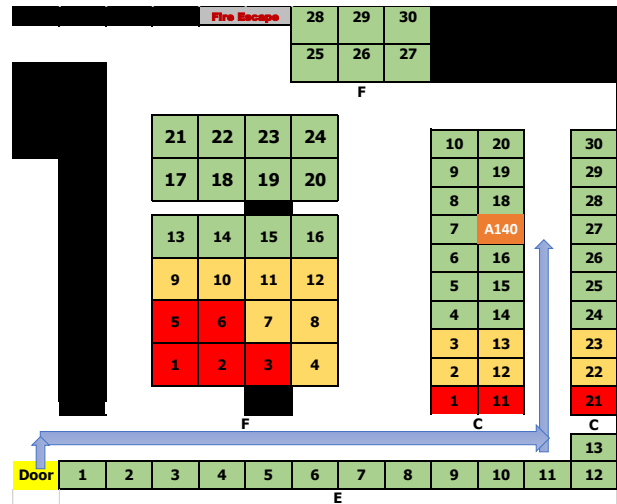
		OLE	Total Dis	12793
		NEW	Total Dis	12793
Rank	Location	Distance	SKUs	Frequent Class
1	E1	1	A3	319 A
2	E1	1	A7	190 A
3	E3	3	A19	105 A
4	E1	1	A8	162 A
5	E1	1	A10	144 A

รูปที่ 18 : ตารางแสดงผลจากโปรแกรม Open Solver

นำผลที่ได้รวมทั้งหมดต่อปีมาเปรียบเทียบกับรูปแบบการจัดเก็บสินค้าทั้ง 4 รูปแบบและสรุปผลที่ได้



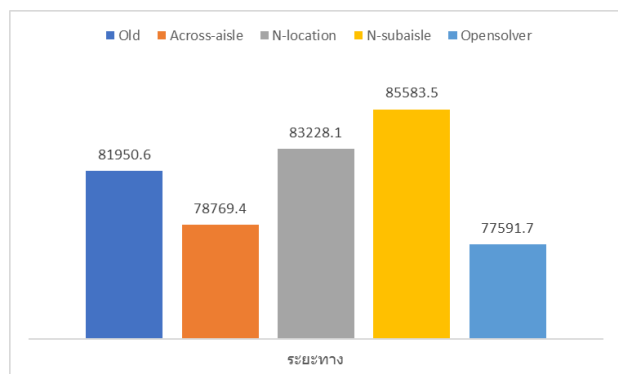
รูปที่ 19 : ลักษณะการจัดวางสินค้าแบบใหม่จากการใช้ Open solver ในการระบุตำแหน่ง



รูปที่ 20 : ลักษณะการเดินทางหยิบสินค้าที่จัดเก็บโดยการใช้ Open solver

3) ผลการวิจัย

หลังจากทำการทดลองปรับปรุงรูปแบบผังจัดวางตำแหน่งการจัดเก็บสินค้า ได้ทำการจำลองระยะการเดินทางหยิบสินค้าเพื่อทดสอบประสิทธิภาพของแต่ละตัวแบบ จากข้อมูลสถิติปริมาณความเคลื่อนไหวจากการใช้พัสดุของโรงพยาบาลรัฐแห่งหนึ่ง ในรายการสำรองวัสดุของคลังพัสดุในช่วงเวลา 12 เดือน ภายใต้เงื่อนไขกลุ่มสินค้าหมวด A และ D จำนวนสินค้า 244 SKUs พบว่าจากเดิมใช้ระยะทางเดินรวมทั้งหมด 81,950.6 เมตรต่อปี และดำเนินการเปรียบเทียบรูปแบบการปรับปรุงการจัดเก็บสินค้า ทั้ง 4 รูปแบบ ประกอบด้วย 1) Across-aisle 2) Diagonal 3) Within-Aisle และ 4) ตัวแบบคณิตศาสตร์เชิงเส้นเพื่อกำหนดตำแหน่งจัดวางสินค้า ผลการศึกษาพบว่า ระยะทางเดินหยิบสินค้าเท่ากับ 81,950.6, 78,769.4, 83,228.1, 85,583.5 และ 77,591.7 เมตรต่อปี ตามลำดับ สามารถสรุปได้ว่า การออกแบบผังและตำแหน่งจัดวางสินค้าด้วยตัวแบบคณิตศาสตร์เชิงเส้นเป็นตัวแบบที่ดีที่สุด เพราะให้ระยะทางในการเดินหยิบสินค้าที่สั้นที่สุด โดยคิดเป็นสัดส่วนของระยะทางเดินลดลง 5% จากระยะทางเดิมก่อนดำเนินการปรับปรุงการรูปแบบการจัดเก็บสินค้า รูปที่ 21 แสดงผลการเปรียบเทียบระยะทางกับการจัดรูปแบบการจัดเก็บสินค้าทั้ง 4 รูปแบบที่ได้ทำการศึกษาค้นคว้า



รูปที่ 21 : ผลเปรียบเทียบระยะทางกับการจัดรูปแบบการจัดเก็บสินค้าทั้ง 4 รูปแบบ

4) สรุปและอภิปรายผลและข้อเสนอแนะ

ผังจัดวางและตำแหน่งการจัดวางสินค้ามีผลต่อประสิทธิภาพการบริหารจัดการคลังสินค้า โดยเฉพาะระยะเวลาการหยิบสินค้า ซึ่งถือเป็นหนึ่งในต้นทุนที่ส่งผลต่อการดำเนินการด้านต้นทุนการแข่งขัน และระดับการให้บริการ ดังนั้นการลดระยะทางของการหยิบสินค้าที่ก่อให้เกิดมูลค่าหรือเกินความจำเป็นเป็นหนึ่งในส่วนสำคัญที่จะช่วยให้การดำเนินการบริหารคลังสินค้าให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพผังและตำแหน่งการจัดเก็บสินค้าของคลังพัสดุโรงพยาบาลแห่งหนึ่งที่มีการจัดเก็บสินค้าหลากหลายประเภท ซึ่งมีข้อจำกัดในการจัดเก็บที่แตกต่างกัน สินค้าจัดที่ถูกเก็บหลายชิ้นถูกจำกัดให้จัดเก็บได้ในเฉพาะบางพื้นที่ ตัวอย่างเช่น หมวดแบบพิมพ์ และพัสดุสำนักงาน อีกทั้งสินค้าส่วนใหญ่ถูกจัดเก็บตามลักษณะการวางตามรูปแบบของลักษณะของตัวสินค้าตามข้อจำกัด แต่ไม่ได้มีการจัดลำดับความสำคัญให้กับตัวสินค้า ทำให้สินค้าบางชนิดที่มีความถี่สูงถูกปะปนกับกลุ่มสินค้าที่มีความถี่ต่ำ ส่งผลให้กระบวนการหยิบสินค้ามีการใช้ระยะทางมากกว่าที่ควรจะเป็น

ผลการศึกษาจากกลุ่มพัสดุเป้าหมายของกรณีศึกษาพบว่า การออกแบบผังและตำแหน่งจัดวางสินค้าด้วยตัวแบบคณิตศาสตร์เชิงเส้นเป็นตัวแทนที่ดีที่สุดเพราะให้ระยะทางในการเดินหยิบสินค้าที่สั้นที่สุด ซึ่งการจัดเก็บแบบใหม่คาดว่าจะส่งผลให้ระยะทางภาพรวมลดลงเฉลี่ยประมาณ 5 เปอร์เซ็นต์จากระยะทางเดินหยิบสินค้าตามนโยบายเดิม ซึ่งจะส่งผลให้สามารถลดระยะการเดินทางหยิบสินค้าของพนักงานลงได้เป็นระยะทางกว่า 363 เมตรต่อเดือน หรือ 4,358 เมตรต่อปี

5) ข้อเสนอแนะ

1) เนื่องจากเป็นการนำข้อมูลพื้นที่เก็บสินค้าเพียงบางส่วนมาใช้ในการวิเคราะห์ผลลัพธ์ที่ได้จึงอาจเปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณของข้อมูลที่น่ามาวิเคราะห์

2) ด้วยข้อจำกัดในการเข้าถึงข้อมูลทำให้ไม่สามารถประมวลผลได้อย่างชัดเจน จำเป็นต้องมีการเก็บข้อมูลเพิ่มทั้งในส่วนของคุณภาพและข้อมูลเชิงปริมาณ

3) ในการออกแบบยังไม่ได้คำนึงข้อจำกัดด้านอื่น ๆ เช่น น้ำหนักของสินค้า ปริมาตรของตัวสินค้า รูปแบบการจัดวาง จึงควรมีการระบุตำแหน่งจัดวางพื้นที่ที่เหมาะสมกับสินค้าในแต่ละข้อจำกัด โดยทำการเพิ่มข้อจำกัดของตัวสินค้าเพื่อนำไปแก้ปัญหการจัดวางให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด

4) ข้อมูลจากการคำนวณอาจมีการคลาดเคลื่อนจากข้อจำกัดด้านข้อมูล จึงจำเป็นต้องทราบบทุดิagramการหยิบสินค้าจาก Order picking กับการปฏิบัติหน้างานจริง ในการจำลองการเดินหยิบสินค้าที่แม่นยำมากยิ่งขึ้น

5) จากสถานการณ์ปัจจุบันของโรคระบาดอาจส่งผลให้การปฏิบัติงานและข้อมูลมีการเปลี่ยนแปลงหรือเกิดตัวแปรที่มีความผันผวน ซึ่งอาจต้องทำการเก็บข้อมูลเพิ่มขึ้นหรือจัดทำข้อมูลใหม่ในการวิเคราะห์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดำเนินงานปรับปรุงพื้นที่คลังสินค้าต่อไป

REFERENCES

- [1] M. Hompel and T. Schmidt, *Warehouse Management: Automation and Organisation of Warehouse and Order Picking Systems*. Heidelberg, Germany: Springer, 2007.
- [2] N. Jamili, P. L. van den Berg, and R. Koster, "Quantifying the impact of sharing resources in a collaborative warehouse," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 302, no. 2, pp. 518–529, Oct. 2022.
- [3] J. J. Bartholdi and S. T. Hackman, *Warehouse & distribution science: release 0.96*. Atlanta, GA, USA: Georgia Institute of Technology, 2014.
- [4] M. M. Tambunan, K. Syahputri, I. Rizkya, R. M. Sari, and M. D. Cahyo, "Storage design using fast moving, slow moving and non moving (FSN) analysis," *MATEC Web Conf.*, vol. 197, 2018, Art. no. 14005.
- [5] W. Monprasith, "Design of layout and material handling system for a stationary warehouse," (in Thai), M.S. thesis, Dept. Ind. Eng., Chulalongkorn Univ., Bangkok, Thailand, 2014.

- [6] W. Sanpote and C. Kasemset, "Corrugated package plant layout design for the problem of uncertain demand," (in Thai), *TJOR*, vol. 4, no. 1, pp. 16–25, 2016.
- [7] K. Lawhawichitsak and A. Phongsatornwiwat, "Applying a two-stage clustering-assignment model for an item-associated product family warehouse storage location problem," (in Thai), *TJOR*, vol. 9, no. 1, pp. 92–105, 2021.
- [8] H. M. Beheshti, D. Grgurich, and F. W. Gilbert, "ABC inventory management support system with a clinical laboratory application," *J. Promot. Manag.*, vol. 18, no. 4, pp. 414–435, 2012, doi: 10.1080/10496491.2012.715502.
- [9] S. Muadpol, "Joint lot sizing and warehouse product layout problems under uncertain demand," (in Thai), M.S. thesis, Dept. Mech. Process Syst. Eng., Suranaree Univ., Nakhon Ratchasima, Thailand, 2019.
- [10] K. J. Roodbergen, "Storage assignment for order picking in multiple-block warehouses," in *Warehousing in the Global Supply Chain: Advanced Models, Tools and Applications for Storage Systems*. London, U.K.: Springer, 2012, pp. 139–155.
- [11] O. Kheawpum, S. Choosakoonkriang, S. Supaluknari, and P. Junmon, "Estimation of stature of person from shoe step length," (in Thai), *Rajamangala Univ.Technol. Tawan-ok Res. J.*, vol. 13, no. 1, pp. 30–37, 2020.

Performance Evaluation of Modified Tree Algorithm for Supporting Traffic with Different Priority Requirements

Warakorn Srichavengsup¹ Kanticha Kittipeerachon^{2*}

^{1,2*}*Computer Engineering Robotics and Technology Research Laboratory : CERT,
Faculty of Engineering, Thai-Nichi Institute of Technology, Bangkok, Thailand*

*Corresponding Author. E-mail address: kanticha@tni.ac.th

Received: 13 October 2022; Revised: 21 November 2022; Accepted: 24 November 2022

Published online: 22 December 2022

Abstract

In this paper, we are introducing 3 new algorithms that take high-priority services into account for more delay-sensitive multimedia traffic, namely, CFS, DAP type 1 and DAP type 2 algorithms, an extension of Binary tree algorithm. The CFS algorithm can be derived from Binary tree algorithm by setting the access probability of the first slot for class 1 users equal to 1. DAP type 1 algorithm can be obtained from Binary tree algorithm by adjusting the access probability of the first slot for class 1 users to the desired value. DAP type 2 algorithm can be derived from either Binary tree and DAP type 1 algorithm by adjusting the access probability of the first slot for class 1 users and the access probability of the first slot for class 2 users to the desired values. The goal is to make each type of traffic compliant with QoS requirements. The simulation results show that DAP type 2 algorithm has more feasible QoS indexes than the CFS and DAP type 1 algorithms. So it is more efficient and flexible to adjust system parameters to meet QoS requirements than CFS and DAP type 1 algorithm. In addition, we can conclude that the access probability of the first slot for class 1 users and class 2 users are the important parameters that must be set properly. So that the system can control QoS and still maintain high delay performance.

Keywords: Binary tree algorithm, Priority, QoS

I. INTRODUCTION

The most popular communication today is high-speed wireless communication, which can support a large number of users. If a large number of users would like to send data at the same time, it will cause a data collision and no user will be successful in transmitting data. Therefore, many Medium Access Control (MAC) protocols were designed. MAC protocols can be classified into contention free [1]–[3] and contention based [4], [5] protocols. Contention free protocols allocate resources to each user, ensuring no data collisions occur. Examples of this type of protocol are TDMA [6], [7], where time is allocated for each user to transmit data, and FDMA [8], [9], where each user is assigned a different frequency to transmit data. Using different times or frequencies will definitely not cause a collision. But these protocols have a disadvantage. If some users do not have the data to send. This will make the time or frequency that is reserved cannot be used by others. In order to solve this problem, the contention based algorithms were introduced. For contention based algorithms, if any user would like to transmit data, they will compete for access to the channel. The examples of this type of algorithm are ALOHA protocol [10], [11], slotted ALOHA protocol [12], [13], Carrier Sense Multiple Access (CSMA) protocol [14], [15] and binary tree algorithm [16], [17]. Binary tree algorithm has the advantage of being able to support a large number of users by splitting the collision-related users into 2 subgroups. When another collision occurs, the users involved in the collision are divided into two subgroups. This process continues until all users successfully access the channel. Fig. 1 illustrates the example of the collision resolution mechanism of Binary tree algorithm. From the figure, users A, B, C, D and E have a delay time of 4, 5, 8, 9 and 10, respectively.

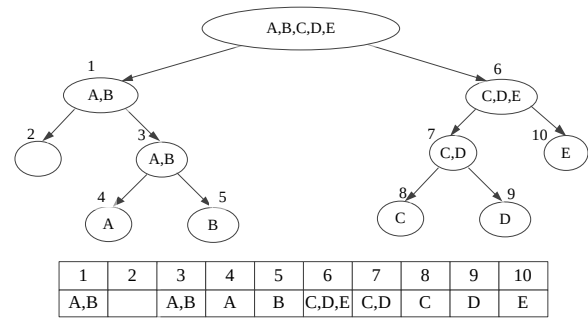


Figure 1: Collision resolution mechanism of Binary tree algorithm

Nowadays, in the era of high-speed communication, there are high demands on data transmission that require different quality of service. Although the binary tree algorithm can support a large number of users, however, it cannot be applied to systems where different users require different quality of service, such as audio or video transmission. Therefore, this paper presents 3 new algorithms, namely, CFS, DAP type 1 and DAP type 2 algorithms to support traffic with different priority requirements.

The paper is structured as follows. In section II, we shall describe the details of CFS, DAP type 1 and DAP type 2 algorithms. Results and discussions will be presented in section III. Finally, conclusions are presented in Section IV.

II. PROPOSED ALGORITHMS

This paper presents 3 algorithms that can support traffic with different priority requirements, which are CFS, DAP type 1 and DAP type 2. Each algorithm divides users into two groups, which are class 1 and class 2 users. Let class 1 users have the higher priority than class 2 users, i.e. class 1 users need less time delay than class 2 users. Moreover, we introduce a QoS index parameter to compare the quality of service of class 1 and class 2 users. The QoS index is defined as the ratio between the average delay time of class 2 users and the average delay time of class 1 users.

The details of all proposed algorithms are as follows.

A. Choosing First Slot (CFS)

In this algorithm, class 1 users always accesses the first slot. As illustrated in Fig. 2, it can be seen that user A, a class 1 user, accesses the first channel in order to gain access to the channel before other users. Whereas class 2 users randomly select one of the 2 slots, i.e. class 1 user accesses slot 1 with probability 1, while class 2 users randomly choose slots 1 and 2 with probability equal to 0.5.

For CFS algorithm, only one user can be a class 1 user. This is because if there are more than one user, there will be endless collisions. Because all class 1 users access to the first slot, causing an inevitable collision.

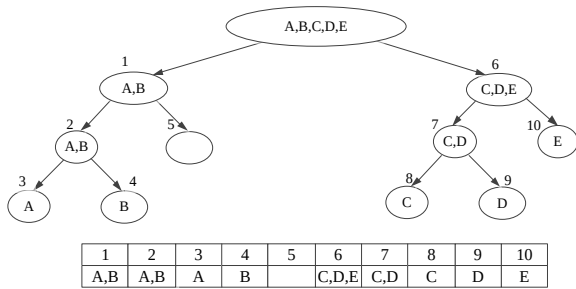


Figure 2: Collision resolution mechanism of CFS algorithm

B. Different Access Probability Type 1 (DAP Type 1)

For this algorithm, the probability of accessing the first slot of class 1 users is greater than 0.5. Therefore, class 1 users have the greater chance of accessing the first slot than the class 2 users, as illustrated in Fig. 3. In the figure, the access probabilities of class 1 and class 2 users are 0.7 and 0.5 respectively. Class 2 users behave like normal users in Binary tree algorithm. Let users A, B and C are class 1 users and users D and E are class 2 users. User A, a class 1 user, randomly selects a number between 0 and 1. If the random number is less than 0.7. User A will choose to access the first slot. But if the random number is greater than or equal to 0.7. User A will access the second slot. In this example, the random number of user A is equal to 0.65, so User A

chooses to access the first slot. While User D, a class 2 user, randomly selects a number between 0 and 1. If the random number is less than 0.5. User D will choose to access the first slot. In this example, the random number of user D is equal to 0.9, so User B chooses to access the second slot. This process is repeated until all users have successfully accessed the channel.

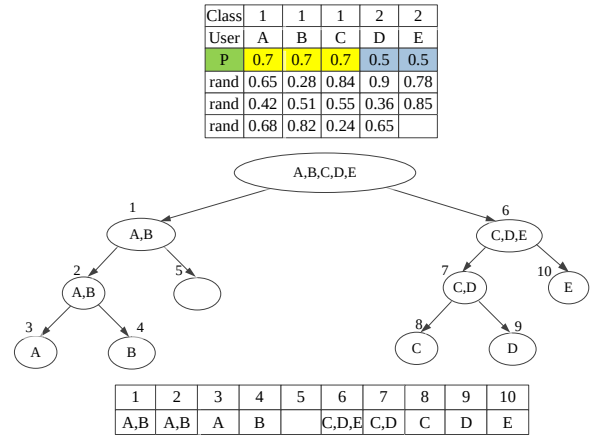


Figure 3: Collision resolution mechanism of DAP type 1 algorithm

C. Different Access Probability Type 2 (DAP Type 2)

For this algorithm, class 1 users have the higher chance of accessing the first slot than the second slot, as is the case with DAP type 1 algorithm. However, the access probability of class 2 users to access the first slot is not necessarily 0.5, as shown in Fig. 4. In the figure, the access probability of class 1 users is 0.7, while the access probability of class 2 users is 0.3. User A, a class 1 user, has a chance to access the first and second slots of 0.7 and 0.3 respectively. That is class 1 users have the higher chances of accessing the first slot than the second slot. Whereas User D, a class 2 user, has a probability of accessing the first slot of 0.3 and a probability of entering the second slot of 0.7. This means that class 2 users have the higher chances of accessing the second slot than the first slot. Therefore, in this case the average delay time of class 1 users will be less than the average delay time of class 2 users.

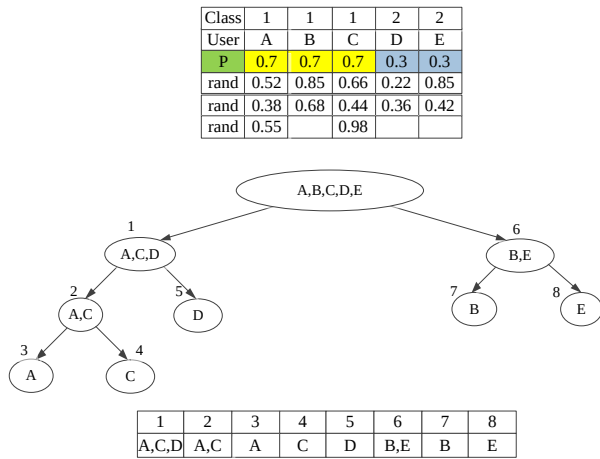


Figure 4: Collision resolution mechanism of DAP type 2 algorithm

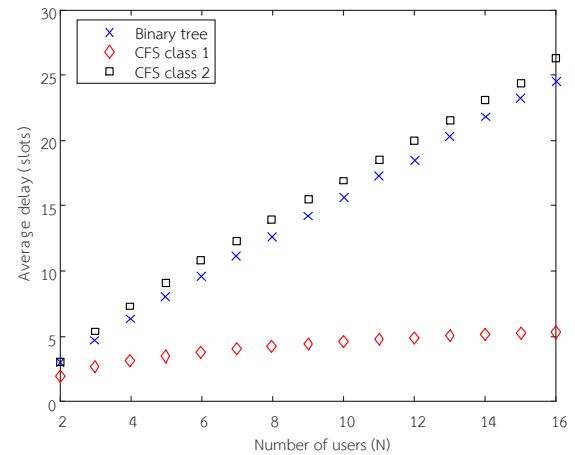


Figure 5: The average delay time vs the number of users for the Binary tree and CFS algorithms

III. RESULTS AND DISCUSSION

In this section, we shall investigate the performance of the proposed algorithms. The details are as follows.

A. Performance of CFS Algorithm

As can be seen in Fig. 5, the average delay time of class 1 and class 2 users increase with the number of users in the system. Since the number of slots is equal to 2, when there is a large number of users in the system, there will be frequent collisions. We can notice that the average delay time of the class 1 user is slightly increased. This is because class 1 user always accesses the first slot. If a collision occurs, the class 1 user and class 2 users involved in the collision are divided into subgroups to resolve the collision. This group of users will succeed in accessing the channel before other group of users. In addition, we found that the average delay time of class 2 users is higher than the average delay time of normal user for Binary tree algorithm. This is because a class 1 user always accesses the first slot and this increases the chance of a collision between class 1 user and some of class 2 users. The multiple slots is required to solve the collision. As a result, the average delay time of class 2 users is high.

Fig. 6 shows the relationship between the QoS index value and the number of users in the system. This figure shows that the QoS index increases with the number of users. This is because the QoS index is equal to the ratio between the average delay time of class 2 and class 1 users. From Fig. 5, it can be seen that the average delay time of class 2 users has a much higher rate of increase than the average delay time of class 1 users, resulting in the ratio increasing with the number of users.

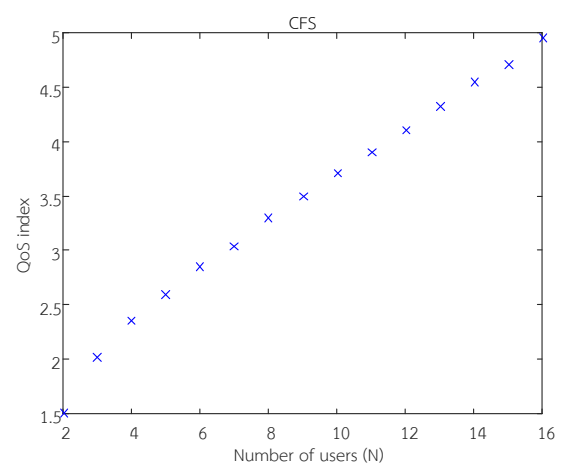


Figure 6: The QoS index vs the number of users for the CFS algorithm

B. Performance of DAP Type 1 Algorithm

Fig. 7 shows a comparison of the average delay time between class 1 and class 2 users of the DAP type 1 algorithm. The figure shows only the case that the access probability of class 1 users greater than or equal to 0.5. This is because in this paper we assign class 1 users a higher priority than class 2. users. If class 1 users use the access probability less than 0.5, then class 1 users will have a higher average delay time than class 2 users.

From the figure, we found that when increasing the probability of accessing the first slot of class 1 users the average delay time of class 1 users tends to decrease. However, when increasing the probability of accessing the first slot of class 1 users too much, the average delay time of class 1 users will be much higher. This is because using proper access probabilities will give class 1 users an appropriate channel access rate. This causes infrequent collisions between users. However, when increasing the access probability too much, the chance of collisions between class 1 users is high, resulting in a noticeable increase in the average delay time of class 1 users.

When considering the average delay time of class 2 users, it can be seen that the average delay time of class 2 users increases with the access probability of class 1 users because increasing the access probability of class 1 users would increase the chance of collisions between class 1 and class 2 users. In addition, when the number of class 1 users increases, increasing the access probability of class 1 users will increase the average delay time of class 2 users. Because there is a high chance of collision between class 1 users. Therefore, most class 2 users have to wait for collision-related class 1 users to successfully access the channel.

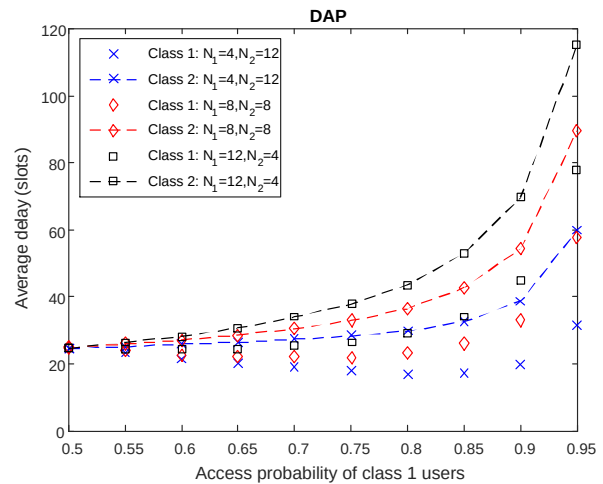


Figure 7: The average delay time vs the access probability of class 1 for the DAP type 1 algorithm when varying the number of users in each class

Fig. 8 shows the relationship between the QoS index and the access probability of class 1 users. It can be seen that when the access probability of class 1 users is 0.5, the QoS Index is 1. This is because all users use a probability value of 0.5, the users of both classes have the same chance of success. In this specific condition, the DAP type 1 algorithm becomes Binary tree algorithm.

When increasing the access probability of class 1 users, the QoS index tends to increase. This is because the average delay time of class 2 users increases with the access probability of class 1 users while the average delay time of class 1 users tends to slightly increased. The QoS Index is maximally increased at a certain access probability of class 1 users. Increasing more access probability of class 1 users will decrease the QoS index. This is because increasing the access probability of class 1 too much will increase the chance of collisions between class 1 users and multiple slots are required to solve the collision problem.

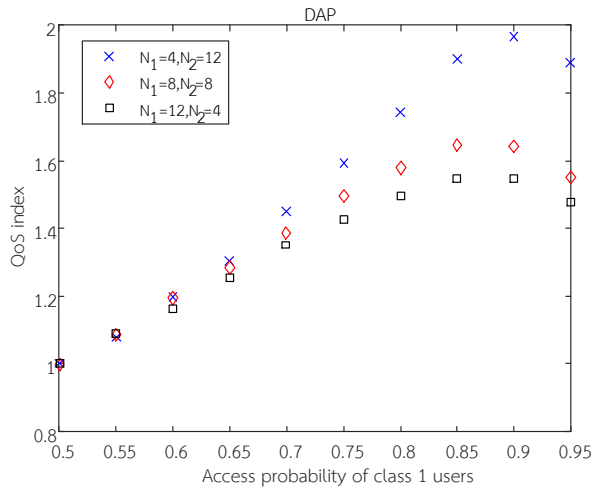


Figure 8: The QoS index vs the access probability of class 1 users for the DAP type 2 algorithm when varying the number of users in each class.

C. Performance of DAP Type 2 Algorithm

For conveniences, these notations are used in the following discussions:

p_1 = the access probability of the first slot for class 1 users.

p_2 = the access probability of the first slot for class 2 users.

N_1 = the number of class 1 users.

N_2 = the number of class 2 users.

Comparing Figs. 9(a), 9(b) and 9(c), it is found that if the number of class 1 users is greater than the number of class 2 users, changing the p_1 value will cause the average delay time of class 1 users to change rapidly. While changing the p_2 value will cause the average delay time of class 1 users to change slowly. On the contrary, if the number of class 2 users is greater than the number of class 1 users, changing the p_2 value will cause the average delay time of class 1 users to change rapidly. While changing the value of p_1 will cause the average delay time of class 1 users to change slowly.

The average delay time of class 1 users is lowest when p_1 is in the range 0.3–0.7 and p_2 is small. This is because using the proper value of p_1 can help reduce the chance of collisions between class 1 users, and

when p_2 is small, most class 2 users will access the second slot. This gives class 1 users a chance to achieve faster channel access.

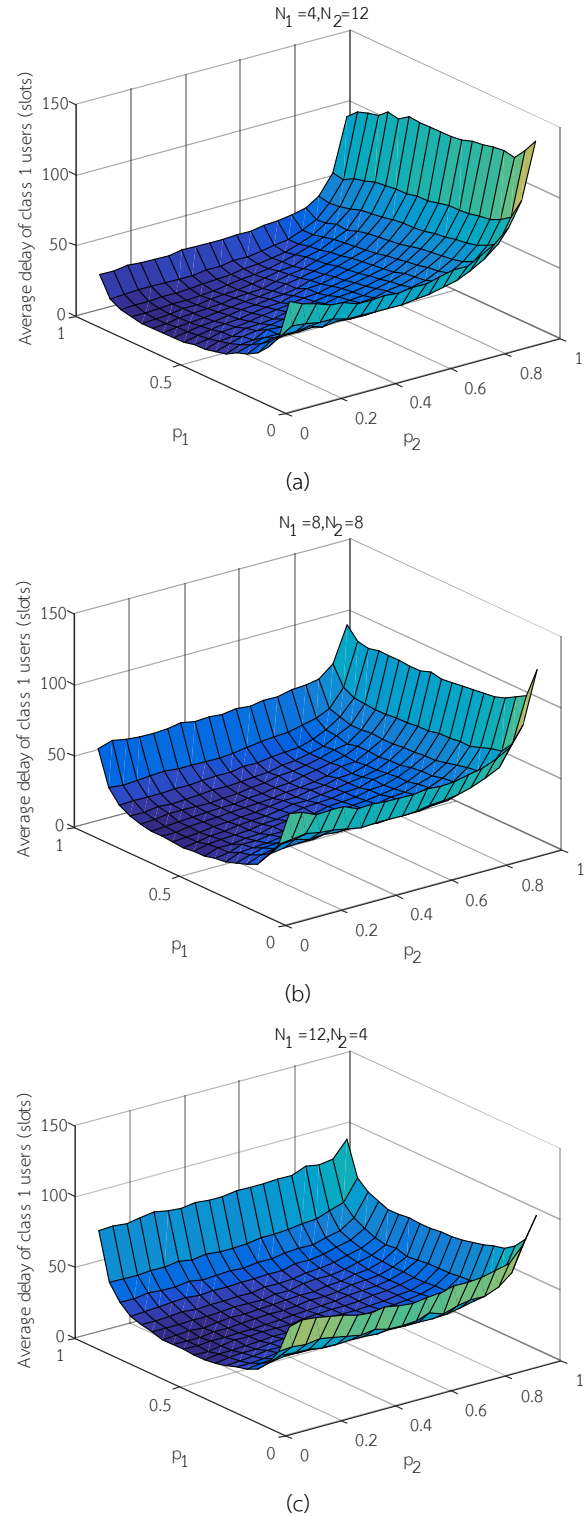


Figure 9: The average delay of class 1 users for the DAP type 2 algorithm as a function of p_1 and p_2 : (a) $N_1=4$, $N_2=12$ (b) $N_1=8$, $N_2=8$ (c) $N_1=12$, $N_2=4$

Fig. 10 shows the relationship between the average delay time of class 2 users and the values of p_1 and p_2 . From the figure, the average delay time of class 2 users tends to increase with the value of p_1 . This is because when p_1 is large such as 0.95, class 1 users have a high chance of accessing the first slot. Therefore, most class 2 users have to wait for collision-related class 1 users to successfully access the channel.

The average delay time of class 2 users is lowest when p_2 is in the range of 0.3–0.7 and p_1 is small. This is because using medium value of p_2 can help reduce the chance of collisions between class 2 users, and at the lowest p_1 value, most class 1 users will access the second slot. This gives class 2 users a chance to successfully access early slots.

Fig. 11 shows the relationship between the QoS index value with p_1 and p_2 . It is found that the QoS index is high when p_2 is low. This is because when p_2 is low, most class 2 users are successful in accessing the channel at the latter slots. As a result, class 2 users have a high average delay time value, resulting in a higher QoS index. When considering at a small p_2 value, the QoS index increases with p_1 until it reaches a maximum of a certain p_1 value. When p_1 is increased further, the QoS index decreases. This peculiar effect can be explained as the following. When p_1 is too low, most class 1 users will access the second slot, resulting in increased delay of the class 1 user. In the case of high p_1 values, there will be a high probability of collision between class 1 users, resulting in a high delay time and low QoS index value. If we would like to achieve a high QoS index we should use the small p_2 value and use a p_1 value between 0.3–0.7.

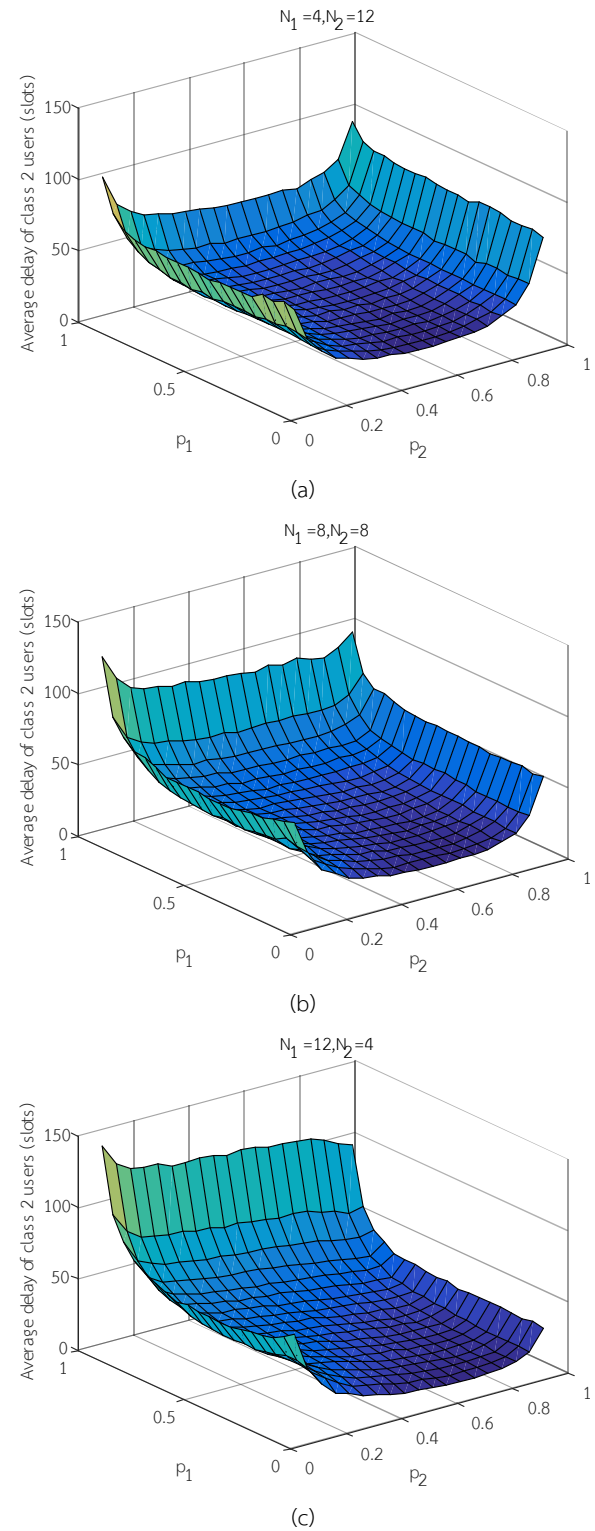


Figure 10: The average delay of class 2 users for the DAP type 2 algorithm as a function of p_1 and p_2 : (a) $N_1=4$, $N_2=12$ (b) $N_1=8$, $N_2=8$ (c) $N_1=12$, $N_2=4$

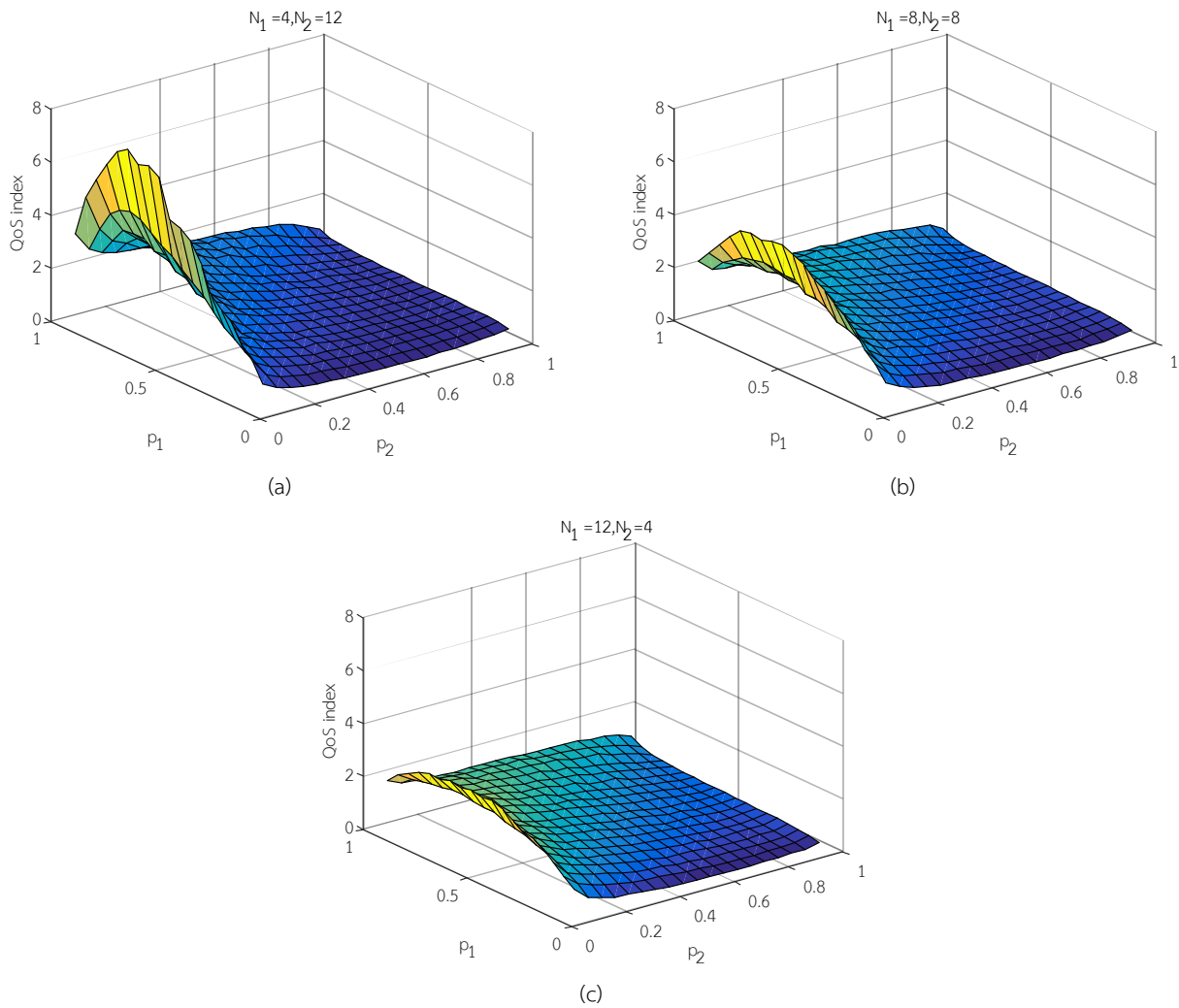
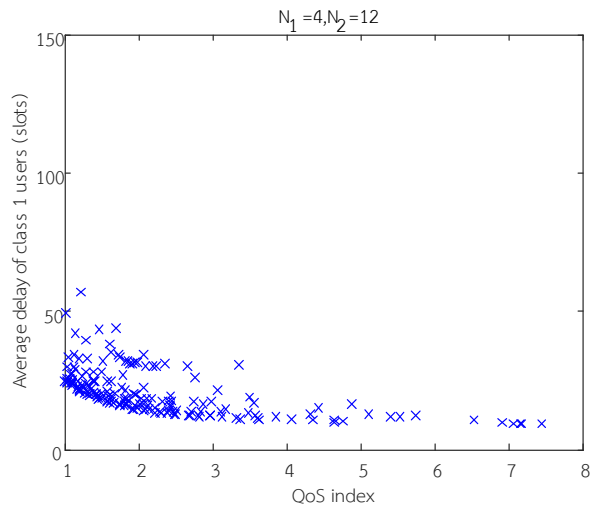


Figure 11: The QoS index for the DAP type 2 algorithm as a function of p_1 and p_2 : (a) $N_1=4, N_2=12$ (b) $N_1=8, N_2=8$ (c) $N_1=12, N_2=4$

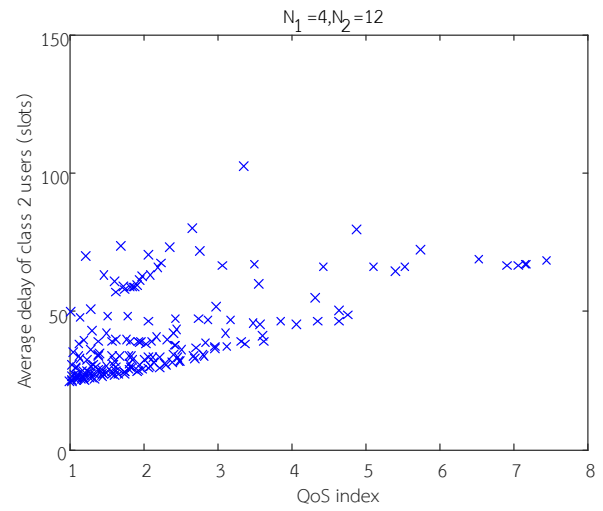
Figs. 12 and 13 show the relationship between QoS index value and the average delay time of class 1 and class 2 users respectively. It can be seen that at high QoS index value, the delay time of class 1 user is low. While the delay time of class 2 users is large. We also found that increasing the proportion of class 1 users would decrease the range of QoS index, reducing from 7.6 to 3.15.

When comparing Binary tree, CFS, DAP type 1 and DAP type 2 algorithms as shown in Figs. 14 and 15. We found that the DAP type 2 algorithm has more feasible QoS indexes than the other algorithms. So it is more effective and flexible in adjusting the system parameters to meet QoS requirements than CFS and

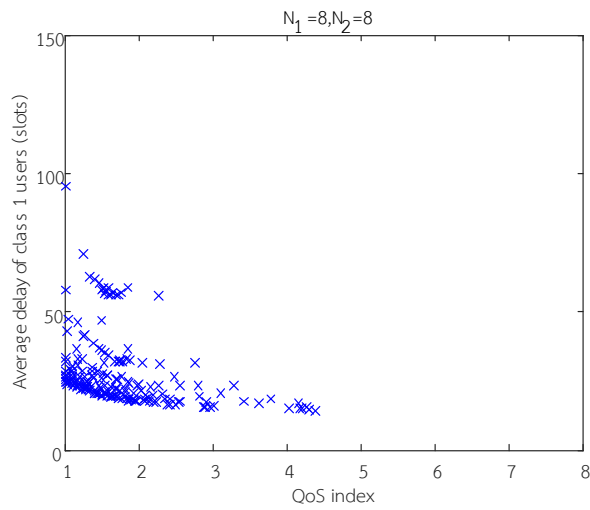
DAP type 1 algorithms. This is because DAP type 2 algorithm can use both p_1 and p_2 values to adjust the QoS index, whereas DAP type 1 algorithm can use only p_1 value to adjust the QoS index. For the CFS algorithm, p_1 and p_2 are constants of 1 and 0.5, respectively. Moreover, we can observe that the QoS index of Binary tree algorithm is equal to 1. This is because for the Binary tree algorithm all users use the same access probability, which is 0.5.



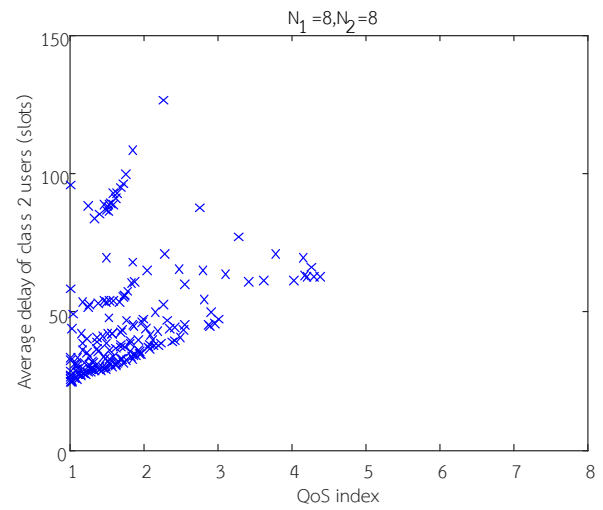
(a)



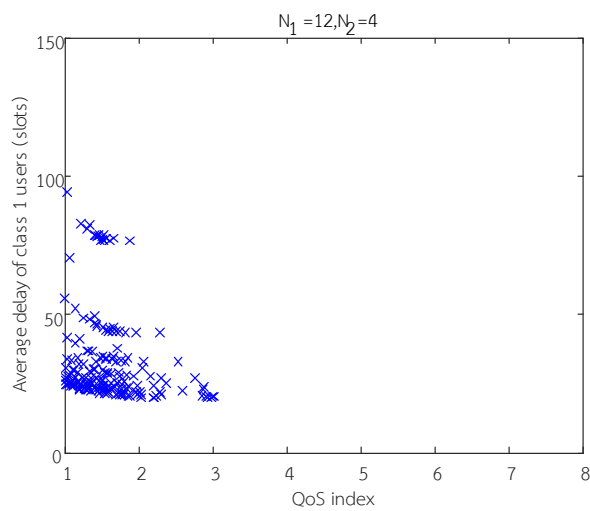
(a)



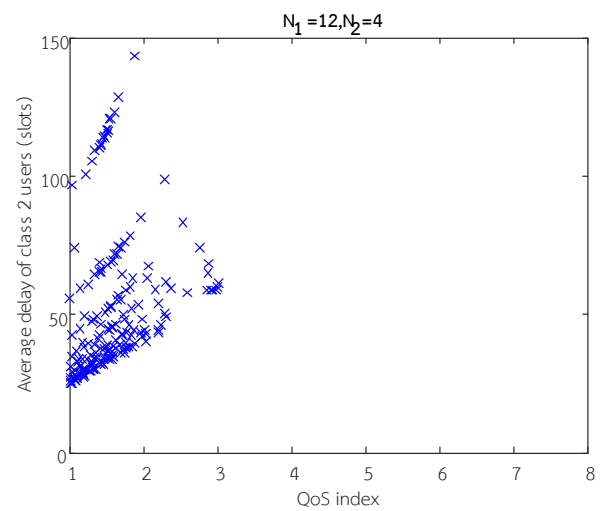
(b)



(b)



(c)



(c)

Figure 12: The average delay of class 1 users vs QoS index for the DAP type 2 algorithm : (a) $N_1=4$, $N_2=12$ (b) $N_1=8$, $N_2=8$ (c) $N_1=12$, $N_2=4$

Figure 13: The average delay of class 2 users vs QoS index for the DAP type 2 algorithm : (a) $N_1=4$, $N_2=12$ (b) $N_1=8$, $N_2=8$ (c) $N_1=12$, $N_2=4$

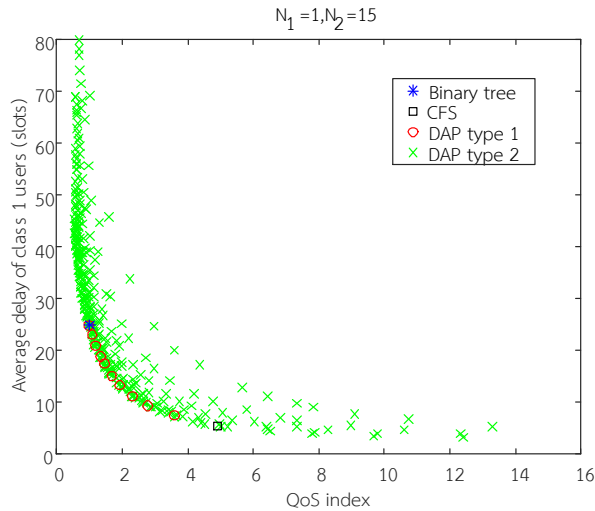


Figure 14: The average delay of class 1 users vs the QoS index for Binary tree, CFS, DAP type 1 and DAP type 2

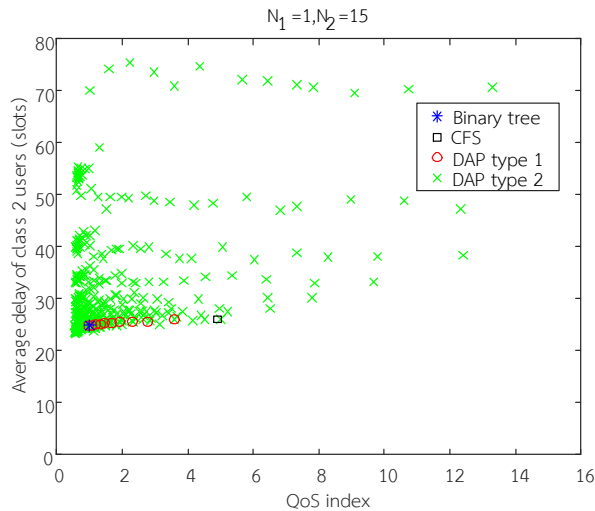


Figure 15: The average delay of class 2 users vs the QoS index for Binary tree, CFS, DAP type 1 and DAP type 2

At the end of the section, we summarize the relations among Binary tree, CFS, DAP type 1 and DAP type 2 algorithms as shown in Fig. 16. It can be seen that all proposed algorithms can be derived from Binary tree algorithm, which can be described as follows. The CFS algorithm can be derived from Binary tree algorithm by setting the value of p_1 equal to 1. DAP type 1 algorithm can be obtained from Binary tree algorithm by adjusting p_1 to the desired value. DAP type 2 algorithm can be

derived from either Binary tree and DAP type 1 algorithm by adjusting p_1 and p_2 to the desired values.

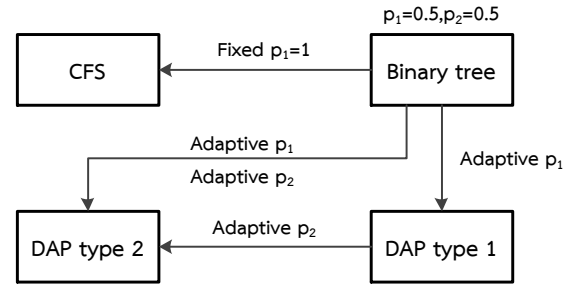


Figure 16: The relations between Binary tree, CFS, DAP type 1 and DAP type 2 algorithms

IV. CONCLUSION

In this paper, we have presented 3 new algorithms, namely, CFS, DAP type 1 and DAP type 2 algorithms to support multi-class traffic with different QoS requirements. All proposed algorithms can be derived from Binary tree algorithm. From the simulation results, we can conclude that the access probability of the first slot for class 1 users and class 2 users are the important parameters that must be set properly. So that the system can control QoS and still maintain high delay performance. When comparing among all proposed schemes in terms of QoS requirements we found that the DAP type 2 algorithm has more feasible QoS indexes than the CFS and DAP type 1 algorithms. So it is more effective and flexible in adjusting the system parameters to meet QoS requirements than CFS and DAP type 1 algorithms.

REFERENCES

- [1] G. Auer, S. Videv, B. Ghimire, and H. Haas, "Contention free inter-cellular slot reservation," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 13, no. 5, pp. 318–320, May 2009.
- [2] W. H. A. Yuen and W. S. Wong, "A contention-free mobility management scheme based on probabilistic paging," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 50, no. 1, pp. 48–58, Jan. 2001.



- [3] Z. H. Wei, B. J. Hu, E. J. Xia, and S. H. Lu, "A contention-free reporting scheme based MAC protocol for cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 38851–38859, Jul. 2018.
- [4] Y. P. Fallah, F. Agharebparast, M. R. Minhas, H. M. Alnuweiri, and V. C. M. Leung, "Analytical modeling of contention-based bandwidth request mechanism in IEEE 802.16 wireless networks," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 57, no. 5, pp. 3094–3107, Sep. 2008.
- [5] M. Rasheed, I. U. Din, M. Adnan, A. Tariq, S. Malik, and I. Syed, "ECM-MAC: An efficient collision mitigation strategy in contention based MAC protocol," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 62880–62889, Apr. 2021.
- [6] T. Zhang and Q. Zhu, "EVC-TDMA: An enhanced TDMA based cooperative MAC protocol for vehicular networks," *J. Commun. Netw.*, vol. 22, no. 4, pp. 316–325, Aug. 2020.
- [7] V. Sevani, B. Raman, and P. Joshi, "Implementation-based evaluation of a full-fledged multihop TDMA-MAC for WiFi mesh networks," *IEEE Trans. Mob. Comput.*, vol. 13, no. 2, pp. 392–406, Feb. 2014.
- [8] H. Nam, "Interpolation-based SC-FDMA transmitter with localized resource allocation," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 14, no. 10, pp. 948–950, Oct. 2010.
- [9] Y. Liu, G. Y. Li, Z. Tan, and H. Hu, "Noise power estimation in SC-FDMA systems," *IEEE Wirel. Commun. Lett.*, vol. 4, no. 2, pp. 217–220, Apr. 2015.
- [10] B. Zhi, W. Sainan, and H. Yigang, "A novel anti-collision algorithm in RFID for internet of things," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 45860–45874, Aug. 2018.
- [11] Y. Cui and Y. Zhao, "Performance evaluation of a multi-branch tree algorithm in RFID," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 58, no. 5, pp. 1356–1364, May 2010.
- [10] H. Wang and T. Li, "Hybrid ALOHA: A novel MAC protocol," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 55, no. 12, pp. 5821–5832, Dec. 2007.
- [11] I. B. Arun and T. G. Venkatesh, "Order statistics based analysis of pure ALOHA in channels with multipacket reception," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 17, no. 10, pp. 2012–2015, Oct. 2013.
- [12] D. Zheng, Y. Zhao, and Y. D. Yao, "An investigation of cooperative slotted ALOHA with the capture effect," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 18, no. 4, pp. 572–575, Apr. 2014.
- [13] P. W. de Graaf and J. S. Lehnert, "Performance comparison of a slotted ALOHA DS/SSMA network and a multichannel narrow-band slotted ALOHA network," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 46, no. 4, pp. 544–552, Apr. 1998.
- [14] M. Koseoglu and E. Karasan, "Spatio-temporal analysis of throughput for single-hop CSMA networks," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 18, no. 4, pp. 564–567, Apr. 2014.
- [15] J. Lee, H. W. Lee, Y. Yi, and S. Chong, "Improving TCP performance over optimal CSMA in wireless multi-hop networks," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 16, no. 9, pp. 1388–1391, Sep. 2012.
- [16] B. Zhi, W. Sainan, and H. Yigang, "A novel anti-collision algorithm in RFID for internet of things," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 45860–45874, Aug. 2018.
- [17] Y. Cui and Y. Zhao, "Performance evaluation of a multi-branch tree algorithm in RFID," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 58, no. 5, pp. 1356–1364, May 2010.

Performance Improvement of Tree Algorithm Using Adaptive Splitting Algorithms

Warakorn Srichavengsup^{1*} Kanticha Kittipeerachon²

^{1,2}*Computer Engineering Robotics and Technology Research Laboratory : CERT,
Faculty of Engineering, Thai-Nichi Institute of Technology, Bangkok, Thailand*

*Corresponding Author. E-mail address: warakorn@tni.ac.th

Received: 22 December 2021; Revised: 22 July 2022; Accepted: 14 September 2022

Published online: 22 December 2022

Abstract

In this paper, we propose the Adaptive Splitting Type-1 and Adaptive Splitting Type-2 algorithms that can be used in conjunction with the existing tree algorithms. binary tree and ternary tree algorithms divide users involved in a collision into a constant number of groups. Splitting users into a fixed number of groups without taking into account the number of collision-related users results in lower channel utilization. Therefore, the proposed algorithms are designed to improve the performance of tree algorithms by adjusting the number of groups to be split to match the number of users involved in the collision. It can be observed from the results that Adaptive Splitting Type-1 and Adaptive Splitting Type-2 algorithms perform better binary tree and ternary tree algorithms in terms of average delay, which indicates that the proposed algorithms can be used to enhance the efficiency of the tree algorithms. In particular, the Adaptive Splitting Type-2 algorithm offers the best performance.

Keywords: Adaptive splitting algorithms, Contention resolution, Tree algorithm



I. INTRODUCTION

In the era of high-speed communication, there is a quickly growing demand for large data transmissions. One problem in transmitting large and continuous data is a data collision. Data collisions occur when multiple users would like to transmit data at the same time. In order to alleviate the collision problem, several MAC protocols have been proposed. MAC protocols can be broadly classified into two types: contention-free MAC protocols and contention-based MAC protocols. In contention-free MAC protocols, a channel is allocated equally to each user. Therefore, there is no collision of data. Examples of contention-free MAC protocols include: Time Division Multiple Access (TDMA) [1], [2], Frequency Division Multiple Access (FDMA) [3], [4] and Code Division Multiple Access (CDMA) [5], [6]. One limitation of contention-free MAC protocols is in the event that the user has no data to send. A channel that is reserved for the user will be wasted because other users cannot use that channel. In contrast, contention-based MAC protocols are suitable for situations where there are many users in the system and each user may have different transmission requirements. Examples of contention-based MAC protocols are as follows: ALOHA protocol and its variants [7], [8], Carrier Sense Multiple Access (CSMA) protocols [9], [10] and tree-based algorithms [11]–[13]. Tree-based algorithms can support a large number of users and are able to resolve data collisions very well.

The principle of solving the data collision of tree-based algorithms can be described in detail as follows. When a collision occurs, the users involved in the collision are divided into subgroups. If another collision occurs in a subgroup, the users involved in that collision are divided again into subgroups. The collision-resolving process continues until all users successfully access the channel. The tree-based algorithm has a weakness in that the users involved in collisions are

always split into a fixed number of subgroups regardless of the number of users involved in collisions. For example, in the case of two users involved in a collision, the appropriate number of subgroups is 2. Dividing the users into 3 or more subgroups will cause the idle slot and inefficient access to the channel. Therefore in this paper we introduce the Adaptive Splitting algorithms to enhance the performance of the well-known tree algorithm.

This paper is structured as follows: Section II, we describe the process of solving the collision of known tree algorithms. The Adaptive Splitting algorithms are explained in Section III. The results and discussion will be illustrated in Section IV and followed by a conclusion in Section V.

II. REVIEW OF EXISTING TREE-BASED ALGORITHMS

In this section, we will describe the collision resolution mechanisms of binary tree and ternary tree algorithms.

A. Binary Tree Algorithm

Binary tree algorithm was developed by Capetanakis in 1979 [14] and Tsybakov and Mikhailov in 1978 [15]. For the binary tree, when a collision occurs all relevant users are randomly split into two groups. Fig. 1 shows an example of the collision resolution mechanism of binary tree algorithm. From the figure, we can see that in the first slot, there are 3 users accessing the same slot, resulting in data collision. The users involved in the collision are divided into 2 groups. We found that another collision occurred in 3rd slot. The users involved in the collision are divided into 2 groups, and the collision resolution will continue until all users have completed access to the channel. We can see from the figure that the total number of slots used is 14 slots.

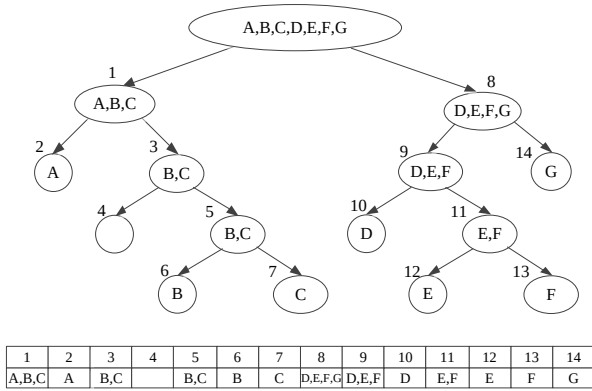


Figure 1: Collision resolution mechanism of binary tree algorithm.

B. Ternary Tree Algorithm

Binary tree algorithm has a significant degradation in performance when there are too many users in the system. This is because even if collision-related users are split into two groups, there is still a high chance of a collision in each group. In order to solve the collision problem in the event of a large number of users, an algorithm that divides the users into 3 groups is proposed. This algorithm is called ternary tree algorithm [16]. Fig. 2 displays an example of the collision resolution mechanism of ternary tree algorithm. The contention resolution mechanism of ternary tree algorithm is almost the same as the binary tree except that for every collision all involved users are split into new 3 groups. From the figure, the total number of slots used is 12 slots.

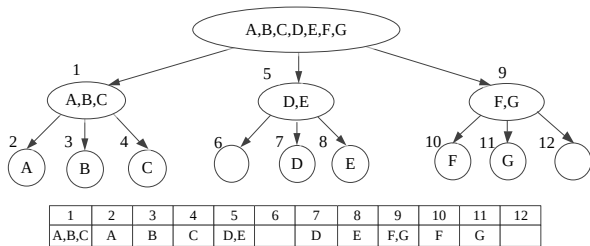


Figure 2: Collision resolution mechanism of ternary tree algorithm.

III. ADAPTIVE SPLITTING ALGORITHMS

In this section, we shall explain the collision resolution mechanisms of the proposed algorithms.

A. Adaptive Splitting Type-1 Algorithm

The Adaptive Splitting Type-1 algorithm has a collision resolution mechanism similar to the ternary tree algorithm. The difference is that when the number of remaining users in the system is equal to 2, the users involved in the collision are split into 2 groups instead of 3. For example, in 9th slot of Fig. 3, there is a collision between last 2 users. These 2 users are divided into 2 groups.

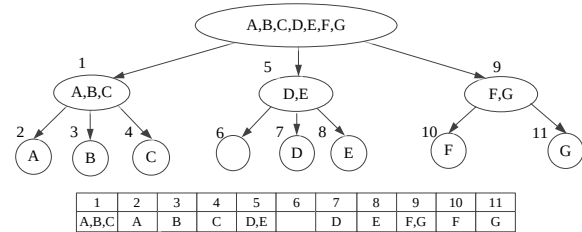


Figure 3: Collision resolution mechanism of Adaptive Splitting Type-1 algorithm.

The pseudo code of Adaptive Splitting Type-1 algorithm is given in Algorithm 1.

Algorithm 1 : Adaptive Splitting Type-1 algorithm

```

while the number of remaining users in the system is more than 0
    if number of remaining users is equal to 2
        users involved in the collision are split into 2 groups
    else
        users involved in the collision are split into 3 groups
    subtract the number of successful users from the number of
    remaining users
end while

```

B. Adaptive Splitting Type-2 Algorithm

The Adaptive Splitting Type-2 differs from Adaptive Splitting Type-1 as follows: In the case of Adaptive Splitting Type-1, users are split into 2 groups only if the collision occurs between the last 2 users. While in all cases of collision between two users, Adaptive Splitting Type-2 always divides the user involved in the collision into 2 groups. For example, in 5th and 8th slots of Fig. 4, there are collision between 2 users. The users involved in the collision are divided into 2 groups.

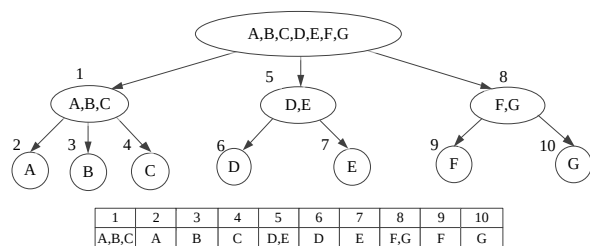


Figure 4: Collision resolution mechanism of Adaptive Splitting Type-2 algorithm.

The pseudo code of Adaptive Splitting Type-2 algorithm is given in Algorithm 2.

Algorithm 2 : Adaptive Splitting Type-2 algorithm

```

while the number of remaining users in the system is more than 0
    if number of users involved in the collision is equal to 2
        users involved in the collision are split into 2 groups else
        users involved in the collision are split into 3 groups
    subtract the number of successful users from the number of
    remaining users
end while

```

IV. RESULTS AND DISCUSSION

In this section, we shall first investigate the performance of tree algorithms with different number of split groups under light loads. Let the variable Q represent the number of groups divided. As can be seen in Fig. 5, the average delay increases with the number of users in the system. This is because the more users in the system, the higher the chance of the collisions and it will take more time to resolve the collision. Furthermore, binary tree provides the best performance when the number of users in the system is less than or equal to 2. Whereas ternary tree gives the best results when the number of users in the system is greater than or equal to 3.

When increasing the number of split groups to 4 and 5, poor performance is observed. This is because splitting the users into too many groups will significantly increase the idle slots, resulting in lower performance.

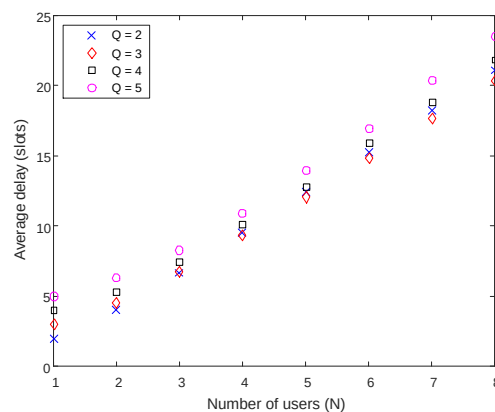


Figure 5: The average delay vs the number of users with varied number of split groups in case of light loads.

Fig. 6, demonstrates the performance comparison of tree algorithms with different number of split groups under heavy loads. It is found that the average delay tends to increase with an increase of the number of users. This decrease in performance is due to the increased number of collisions caused by a large number of user attempts to access the channel. It can be noticed that the result is similar to the case of light loads with the following details: Ternary tree gives the best results. Moreover, dividing users into 2 and 4 groups provide similar performance. While dividing users into 5 groups gives low performance.

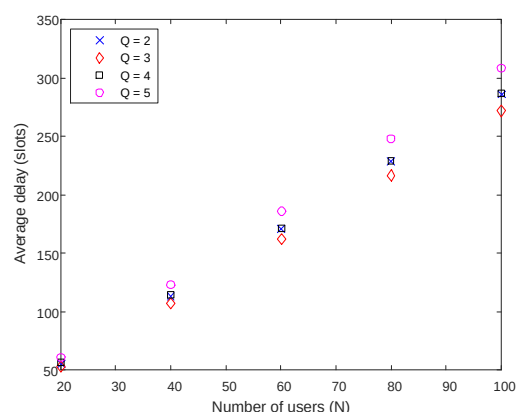


Figure 6: The average delay vs the number of users with varied number of split groups in case of heavy load loads.

Now we would like to turn our attention to investigate the effects of the number of split groups on the number

of idle slots and the number of collision slots. Figs. 7 and 8 display the relation between the number of idle slots and the number of users with different number of split groups under light and heavy load respectively. As we can see, the number of idle slots increases with the number of split groups. This is because in the case of the same number of users, the greater the number of split groups, the more idle slots are likely to occur.

Figs. 9 and 10 illustrate the relation between the number of collision slots and the number of users under light and heavy load respectively. As we can see, the number of collision slots decreases with the number of split groups. This is because when the number of split groups is large, there is a low chance of the collision.

Considering the total number of collision and idle slots as shown in Figs. 11 and 12, it can be noticed that when the number of users is less than or equal to 2 splitting the users involved in a collision into 2 groups provides the best performance. However, when the number of users involved in a collision is greater than or equal to 3, splitting users involved in a collision into 3 groups offers superior performance. From the results, we can conclude that the number of split groups has a significant effect on the performance of the system. Therefore, the number of split groups should be carefully chosen to match the number of users involved in the collision.

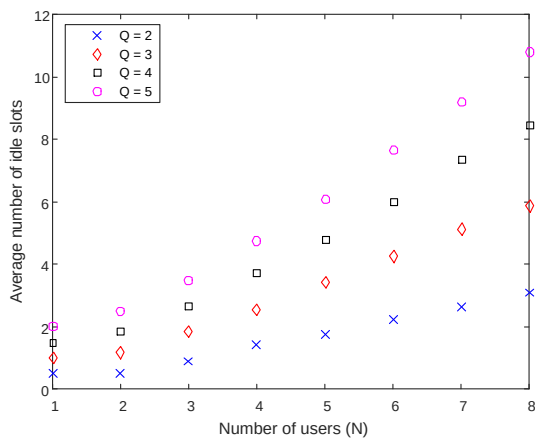


Figure 7: The average number of idle slots vs the number of users with varied number of split groups in case of light loads

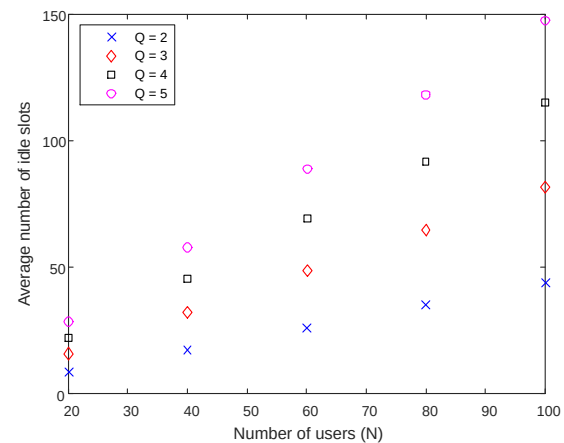


Figure 8: The average number of idle slots vs the number of users with varied number of split groups in case of heavy loads.

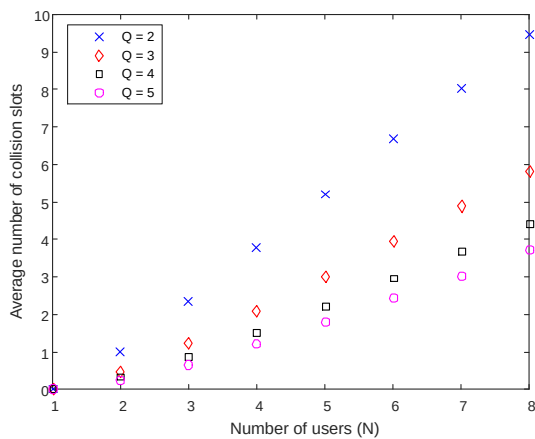


Figure 9: The average number of collision slots vs the number of users with varied number of split groups in case of light loads.

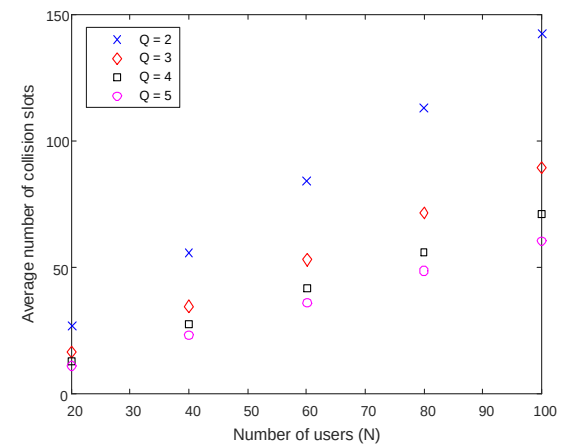


Figure 10: The average number of collision slots vs the number of users with varied number of split groups in case of heavy loads.

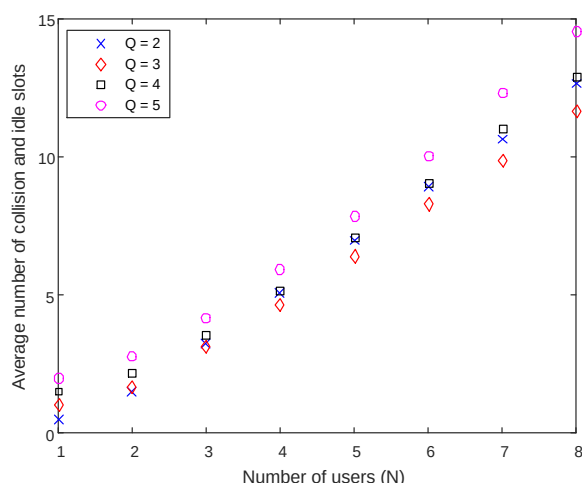


Figure 11: The average number of collision and idle slots vs the number of users with varied number of split groups in case of light loads.

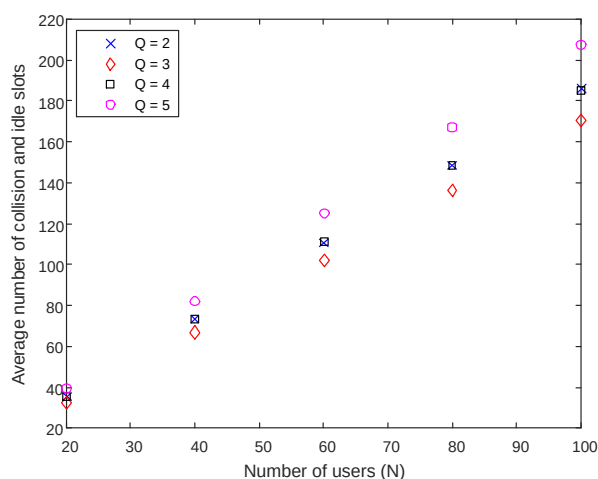


Figure 12: The average number of collision and idle slots vs the number of users with varied number of split groups in case of heavy loads.

Now we would to compare the performance of binary tree, ternary tree, Adaptive Splitting Type-1 and Adaptive Splitting Type-2 algorithms. For the Adaptive Splitting Type-1 algorithm, the users involved in a collision are divided into 2 groups when the number of remaining users in the system is 2. Whereas the users involved in a collision are divided into 3 groups when the number of remaining users in the system is greater than or equal to 3. For the Adaptive Splitting Type-2 algorithm, the users involved in a collision are divided

into 2 groups if the collision occurs between 2 users. The users involved in a collision are divided into 3 groups when the collision occurs between 3 or more users.

Figs. 13 and 14 illustrate the performance comparison among binary tree, ternary tree, Adaptive Splitting Type-1 and Adaptive Splitting Type-2 algorithms under light and heavy loads respectively. It is revealed that when there is one or two users in the system, the binary tree, Adaptive Splitting Type-1 and Adaptive Splitting Type-2 algorithms have the same performance. This is because all three algorithms divide the number of users involved in the collision into 2 groups. Whereas a ternary tree which divides 2 collision-related users into 3 groups gives lower performance due to more idle slots. Moreover, when the number of users in the system increases, the Adaptive Splitting Type-2 algorithm offers the best performance. This is because it can effectively reduce idle slots with small increase in collision slots. While binary tree algorithm gives the lowest performance because even if a large number of users are divided into 2 groups, each group still has a large number of users, causing frequent collisions.

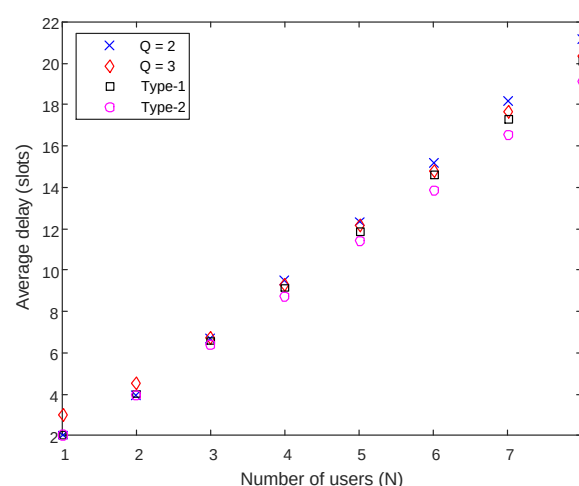


Figure 13: The average delay vs the number of users for binary tree, ternary tree, Adaptive Splitting Type-1 and Adaptive Splitting Type-2 algorithms in case of light loads.

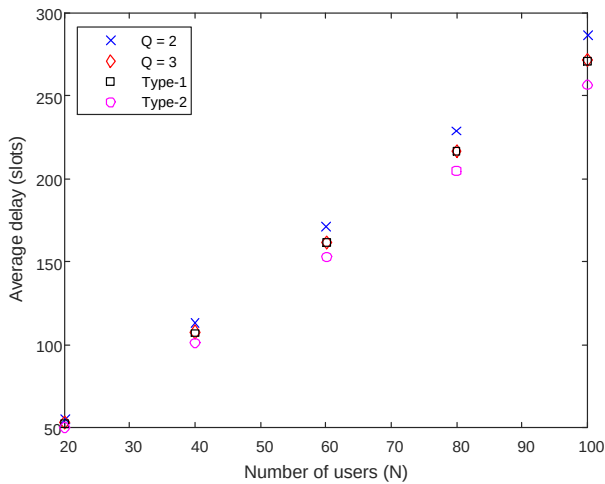


Figure 14: The average delay vs the number of users for binary tree, ternary tree, Adaptive Splitting Type-1 and Adaptive Splitting Type-2 algorithms in case of heavy loads.

Figs. 15 and 16, show the average number of collision slots for the system with light and heavy loads respectively. When comparing all algorithms, it is found that in the event that there are more than 2 users in the system, binary tree algorithm has the highest number of collisions. This is because the number of users in the system is relatively much higher than the number of split groups, so there is a high probability of collisions. Furthermore, it can be observed that the Adaptive Splitting Type-1 and Adaptive Splitting Type-2 algorithms have the higher average number of collision slots than ternary tree. This is because Adaptive Splitting Type-1 and Adaptive Splitting Type-2 algorithms divide users into 2 or 3 groups depending on the number of users involved in the collision. When users are divided into 2 groups, there is a greater chance of collision.

Figs. 17 and 18 demonstrate the relation between the average number of idle slots and the number of users under light and heavy loads. It is apparent that ternary tree algorithm has the highest number of idle slots. This is because Tree algorithm definitely divides the users into 3 groups while binary tree divides the users into 2 groups and Adaptive Splitting Type-1 and

Adaptive Splitting Type-2 algorithms divide users into 2 or 3 groups. The larger the number of split groups, the greater the idle slots are also more likely to occur. In addition, it is found that the Adaptive Splitting Type-1 algorithm can help reduce idle slots slightly compared to ternary tree algorithm while the Adaptive Splitting Type-2 algorithm can greatly reduce idle slots.

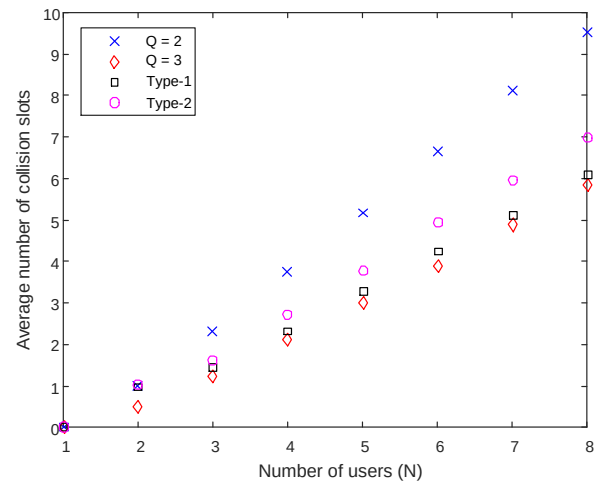


Figure 15: The average number of collision slots vs the number of users for binary tree, ternary tree, Adaptive Splitting Type-1 and Adaptive Splitting Type-2 algorithms in case of light loads.

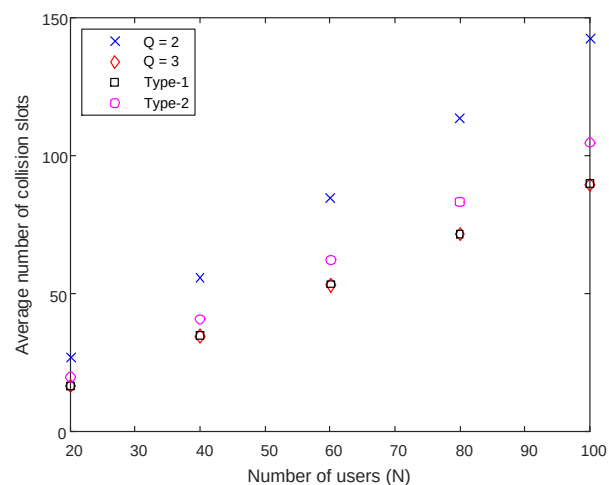


Figure 16: The average number of collision slots vs the number of users for binary tree, ternary tree, Adaptive Splitting Type-1 and Adaptive Splitting Type-2 algorithms in case of heavy loads.

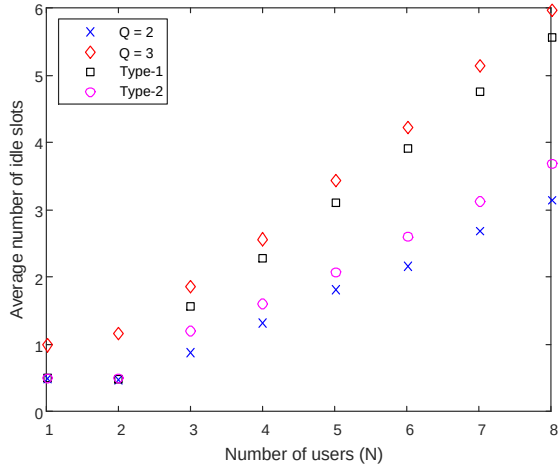


Figure 17: The average number of idle slots vs the number of users for binary tree, teranary tree, Adaptive Splitting Type-1 and Adaptive Splitting Type-2 algorithms in case of light loads.

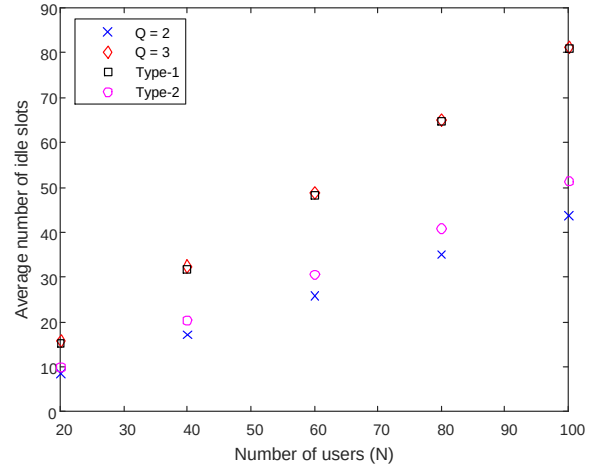


Figure 18: The average number of idle slots vs the number of users for Binary tree, teranary tree, adaptive Splitting Type-1 and Adaptive Splitting Type-2 algorithms in case of heavy loads.

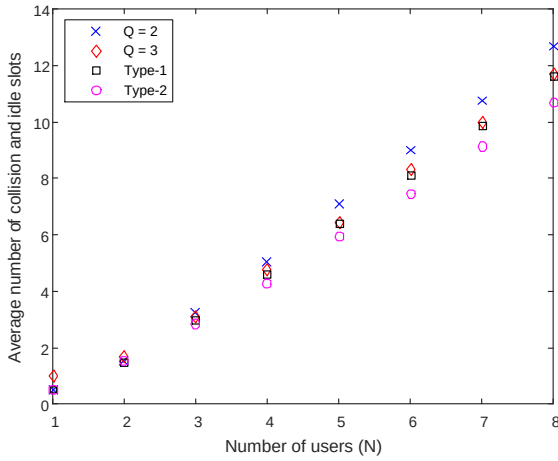


Figure 19: The average number of collision and idle slots vs the number of users for binary tree, teranary tree, Adaptive Splitting Type-1 and Adaptive Splitting Type-2 algorithms in case of light loads.

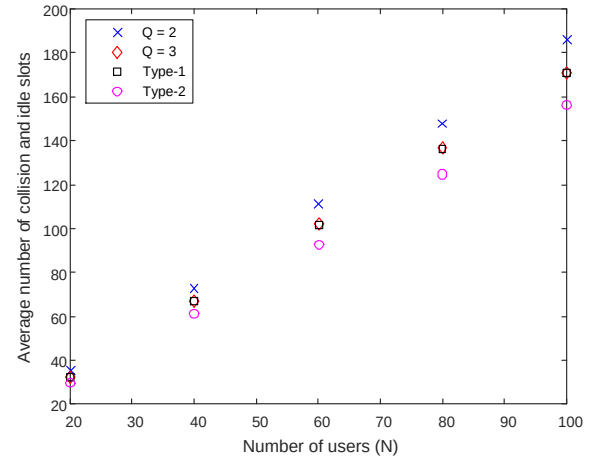


Figure 20: The average number of collision and idle slots vs the number of users for binary tree, teranary tree, Adaptive Splitting Type-1 and Adaptive Splitting Type-2 algorithms in case of heavy loads.

Figs. 19 and 20 illustrate the average number of collision and idle slots as a function of the number of users. These Figures reveal that Adaptive Splitting Type-2 has the best efficiency in reducing wasted slots and thus providing the superior system performance.

V. CONCLUSION

In this paper, we have proposed Adaptive Splitting algorithms to improve the performance of existing tree algorithms. From the results, it can be seen that the

number of split groups is a significant factor that affects the performance of the system, hence must be chosen cautiously. When comparing among binary tree, ternary tree, Adaptive Splitting Type-1 and Adaptive Splitting Type-2 in terms of delay performance, we found that both Adaptive Splitting Type-1 and Adaptive Splitting Type-2 algorithms perform better than binary tree and ternary tree algorithms. In particular, the Adaptive Splitting Type-2 algorithm obviously outperforms other algorithms. Especially, in the case of heavy loads

Adaptive Splitting Type-2 algorithm gives a delay of 10–20% better than other algorithms. This is because it can adjust the number of split groups to suit the number of users involved in collisions. In case of collision between two users, the number of subgroups divided should be 2, but in case of collision between more than 2 users, the number of subgroups divided should be 3.

REFERENCES

- [1] T. Zhang and Q. Zhu, "EVC-TDMA: An enhanced TDMA based cooperative MAC protocol for vehicular networks," *J. Commun. Netw.*, vol. 22, no. 4, pp. 316–325, Aug. 2020.
- [2] J. Lee, H. Noh, and J. Lim, "TDMA-based cooperative MAC protocol for multi-hop relaying networks," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 18, no. 3, pp. 435–438, Mar. 2014.
- [3] J. Zhang, L. Yang, L. Hanzo, and H. Gharavi, "Advances in cooperative single-carrier FDMA communications: Beyond LTE-advanced," *IEEE Commun. Surv. Tut.*, vol. 17, no. 2, pp. 730–756, May 2015.
- [4] M. Geles, A. Averbuch, O. Amrani, and D. Ezri, "Performance bounds for maximum likelihood detection of single carrier FDMA," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 60, no. 7, pp. 1945–1952, Jul. 2012.
- [5] B. Smida, S. Affes, K. Jamaoui, and P. Mermelstein, "A multicarrier CDMA space-time receiver with full-interference-suppression capabilities," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 57, no. 1, pp. 363–379, Jan. 2008.
- [6] X. Peng, K. Png, Z. Lei, F. Chin, and C. C. Ko, "Two-layer spreading CDMA: An improved method for broadband uplink transmission," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 57, no. 6, pp. 3563–3577, Nov. 2008.
- [7] H. Noh, J. Lee, and J. Lim, "ANC-ALOHA: Analog network coding ALOHA for satellite networks," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 18, no. 6, pp. 957–960, Jun. 2014.
- [8] H. Baek, J. Lim, and S. Oh, "Beacon-based slotted ALOHA for wireless networks with large propagation delay," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 17, no. 11, pp. 2196–2199, Nov. 2013.
- [9] J. Tong, L. Fu, and Z. Han, "Throughput enhancement of full-duplex CSMA networks using multiplayer bandits," *IEEE Internet Things J.*, vol. 8, no. 15, pp. 11807–11821, Aug. 2021.
- [10] A. Maatouk, M. Assaad, and A. Ephremides, "Energy efficient and throughput optimal CSMA scheme," *IEEE/ACM Trans. Netw.*, vol. 27, no. 1, pp. 316–329, Feb. 2019.
- [11] W. Srichavengsup, K. Kittipeerachon, and C. Thongwan, "Improving the performance of IEEE 802.11 DCF with constant contention window by reducing the wasted time slots," *J. Eng. Digit. Technol. (JEDT)*, vol. 8, no. 2, pp. 39–47, Dec. 2020.
- [12] Y. C. Lai and L. Y. Hsiao, "General binary tree protocol for coping with the capture effect in RFID tag identification," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 14, no. 3, pp. 208–210, Mar. 2010.
- [13] A. J. E. M. Janssen and M. J. M. de Jong, "Analysis of contention tree algorithms," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 46, no. 6, pp. 2163–2172, Sep. 2000.
- [14] J. I. Capetanakis, "Tree algorithms for packet broadcast channels," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 25, no. 5, pp. 505–515, Sep. 1979.
- [15] B. S. Tsybakov and B. A. Mikhailov, "Random multiple packet access: Part-and-try algorithm," *Problems Inform. Transmiss.*, vol. 16, no. 4, pp. 65–79, Oct. 1980.
- [16] P. Mathys and P. Flajolet, "Q-ary collision resolution algorithms in random-access systems with free or blocked channel access," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 31, no. 3, pp. 217–243, Mar. 1985.

การผลิตถ่านกัมมันต์จากกากมะพร้าวที่อุณหภูมิต่ำภายใต้ภาวะจำกัดอากาศ สำหรับการดูดซับเมธิลีนบลู

ณรงค์ ชัยสงเคราะห์¹ สุธารวดี สุขะวนวัฒน์² เบญจพล เฉลิมสินสุวรรณ³ ศศิธร สรรพอคำ^{4*}

^{1,2,4*} สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
เขตพื้นที่อุเทนถวาย, กรุงเทพมหานคร, ประเทศไทย

³ ศูนย์วิจัยเชื้อเพลิง ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพมหานคร, ประเทศไทย

*ผู้ประพันธ์บรรณกิจ อีเมล : sasithorn_su@rmutto.ac.th

รับต้นฉบับ: 6 กันยายน 2565; รับบทความฉบับแก้ไข: 22 พฤศจิกายน 2565; ตอบรับบทความ: 24 พฤศจิกายน 2565

เผยแพร่ออนไลน์: 22 ธันวาคม 2565

บทคัดย่อ

การใช้ชีวมวลเหลือทิ้งทางการเกษตรที่เป็นวัตถุดิบในการผลิตถ่านกัมมันต์มีมากขึ้น เนื่องจากมีราคาถูกและมีปริมาณมาก ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้สามารถใช้ในการกำจัดมลพิษในน้ำได้ งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิและเวลาต่อการผลิตถ่านกัมมันต์จากกากมะพร้าวจากพื้นที่ในจังหวัดชลบุรี โดยแบ่งการผลิตออกเป็น 2 ขั้นตอน คือ การผลิตถ่านชีวภาพและการผลิตถ่านกัมมันต์ จากการทดลองพบว่าอุณหภูมิและเวลามีผลต่อร้อยละผลได้ของแข็งและพื้นที่ผิวของถ่านชีวภาพอย่างมีนัยสำคัญ จากนั้นนำถ่านชีวภาพที่ผลิตจากภาวะต่าง ๆ มากระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ กรดฟอสฟอริก และกรดซัลฟูริก ความเข้มข้น 4 โมลาร์ และเผาที่อุณหภูมิและเวลาที่กำหนดเพื่อผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ พบว่าชีวภาพที่ผลิตด้วยการเผาที่ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ได้ถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวสูงสุด 1,147.74 ตารางเมตรต่อกรัม และการดูดซับเมธิลีนบลูสอดคล้องกับไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.9993

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการผลิตถ่านกัมมันต์จากกากมะพร้าวสามารถดำเนินการที่อุณหภูมิต่ำได้ รวมถึงมีความเป็นไปได้ในการสร้างเตาเผาเพื่อผลิตถ่านชีวภาพและถ่านกัมมันต์ที่ไม่ซับซ้อนและต้นทุนไม่สูง สามารถลดการใช้พลังงานได้ และใช้ต้นทุนน้อยกว่าถ่านกัมมันต์ที่มีขายเชิงพาณิชย์ จึงแสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในการลงทุนหรือต่อยอดเป็นผลิตภัณฑ์สำหรับการดูดซับมลพิษต่อไป

คำสำคัญ : ถ่านกัมมันต์ วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร กากมะพร้าว วิสาหกิจชุมชน

Production of Activated Carbon from Coconut Coir Using Chemical Activation at Low Temperature under Limited Air Condition for Methylene Blue Adsorption

Narong Chaisongkroh¹ Sutawadee Sukawanawat² Benjapon Chalermssinsuwan³ Sasithorn Sunphorka^{4*}

^{1,2,4*}Field of Chemical Engineering, Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology,
Uthen Thawai Area, Bangkok, Thailand

³Fuels Research Center, Department of Chemical Technology, Faculty of Science, Chulalongkorn University,
Bangkok, Thailand

*Corresponding Author. E-mail address: sasithorn_su@rmutto.ac.th

Received: 6 September 2022; Revised: 22 November 2022; Accepted: 24 November 2022

Published online: 22 December 2022

Abstract

The use of agricultural biomass as raw material for activated carbon production has been increasing because it is cheap and largely generated amount. The produced activated carbon was useful for remove the pollutants from aqueous media. This work aims to study the effects of temperature and time on the activated carbon production from coconut coir obtained from Chonburi province. The experiments were divided into two stages: (i) biochar production and (ii) activated carbon production. The results revealed that both temperature and operation time had the significant effects on solid yield and surface area of Biochar. After that, the biochar obtained from different conditions were activated by using 4M KOH, 4M H₃PO₄ and 4M H₂SO₄ at the desired temperatures and operating time to produce activated carbon. The results showed that biochar which was produced at 500 °C and 1 h, then activated by KOH at 200 °C and 2 h provided the activated carbons with the highest surface area of 1,147.74 m²/g. In addition, the Methylene Blue adsorption was found to follow the Langmuir isotherm model ($R^2 = 0.9993$).

The overall experimental results revealed that activated carbon produced from coconut coir could be operated under lower temperature and exhibited opportunity and possibility to design the cheap and uncomplicated kiln. The production energy can be reduced. Moreover, the production cost for activated carbon was presented that it was lower than that of commercial activated carbon. Therefore, it probably had an opportunity for commercial business competition or further development to new products for pollutant adsorption and other proposes.

Keywords: Activated carbon, Agricultural waste, Coconut coir, Community enterprise

1) บทนำ

จากข้อมูลการสำรวจในปี พ.ศ. 2563 [1] ประเทศไทยมีการผลิตมะพร้าว 591,017 ตัน โดยหลังจากแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ แล้วเกิดวัสดุเหลือทิ้งประเภทเปลือกมะพร้าวประมาณร้อยละ 33 ซึ่งเป็นปริมาณมากและก่อให้เกิดปัญหาและค่าใช้จ่ายในการขนส่งและการกำจัด ค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้นดังกล่าวเป็นสาเหตุหนึ่งในการเพิ่มต้นทุนการผลิตด้วย การแปรรูปวัสดุเหลือทิ้งเหล่านี้จึงมีความน่าสนใจ โดยเฉพาะการแปรรูปให้เป็นผลิตภัณฑ์ที่สามารถนำกลับมาใช้เพิ่มผลผลิตทางการเกษตร หรือสร้างรายได้และอาชีพใหม่ ๆ ในชุมชน การแปรรูปวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรให้เป็นถ่านกัมมันต์เป็นทางเลือกหนึ่งได้รับความสนใจเนื่องจากวิธีการไม่ซับซ้อนมาก [2] ถ่านกัมมันต์ที่ได้สามารถใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย เช่น ใช้เป็นเชื้อเพลิง ตัวดูดซับของเสียในน้ำ/อากาศ/ดิน ปุ๋ย รวมถึงนำมาผสมอาหารและผลิตภัณฑ์เสริมความงาม เป็นต้น [3], [4] ในช่วงหลายสิบปีที่ผ่านมาได้มีการศึกษาการผลิตถ่านกัมมันต์ด้วยวิธีต่าง ๆ โดยได้มีผู้รวบรวมการผลิตถ่านกัมมันต์จากถ่านชีวภาพซึ่งใช้การกระตุ้นทางเคมี อาทิ การกระตุ้นโดยใช้กรดไฮโดรคลอริกกับถ่านชีวภาพจากปอแก้ว ที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส ทำให้เกิดถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวระหว่าง 289.497 ถึง 346.570 ตารางเมตรต่อกรัม การกระตุ้นโดยใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์กับถ่านชีวภาพจากไม้ ที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียสทำให้เกิดถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิว 932 ตารางเมตรต่อกรัม [5] หรือการคาร์บอนไนซ์ขานอ้อยที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ภายใต้บรรยากาศอาร์กอน จากนั้นกระตุ้นโดยใช้ผงโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ผสมกับถ่านจากขั้นตอนแรก ในอัตราส่วน 4 ต่อ 1 และเผาที่ 800 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง พบว่าถ่านกัมมันต์ที่ได้มีพื้นที่ผิวสูงถึง 3,554 ตารางเมตรต่อกรัม [6] งานวิจัยที่เกี่ยวข้องแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมในการคาร์บอนไนซ์อยู่ที่ 400–800 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิที่เหมาะสมในการกระตุ้นด้วยสารเคมีอยู่ที่ 400–900 องศาเซลเซียส ซึ่งทำให้ถ่านกัมมันต์มีพื้นที่ผิวสูงที่สุดกว่า 2,000 ตารางเมตรต่อกรัม [7]

คณะผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการแปรรูปวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรให้สามารถนำกลับมาใช้ประโยชน์ได้ โดยนำกากมะพร้าวมาแปรรูปเป็นถ่านกัมมันต์ และหาภาวะที่เหมาะสมในการผลิตถ่านกัมมันต์ให้เหมาะสมกับการนำไปพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์หรือใช้ประโยชน์ทางการเกษตรอื่น ๆ หรือเป็นข้อมูลในการสร้างเตาเผาถ่านกัมมันต์สำหรับชุมชนต่อไป สำหรับกากมะพร้าวที่เลือกใช้เป็นกากมะพร้าวจากชุมชนตะเคียนเตี้ย ในตำบลตะเคียนเตี้ย อำเภอ

บางละมุง จังหวัดชลบุรี ซึ่งเป็นชุมชนที่มีการรวมกลุ่มและพัฒนาตนเองอย่างสม่ำเสมอ มีการทำสวนมะพร้าวร่วมกับการแปรรูปและจำหน่ายผลิตภัณฑ์จากมะพร้าว ได้แก่ น้ำมันมะพร้าวสกัดเย็น ขนมหอมพับ ขนมหอมพื้ ประดิษฐ์เครื่องใช้และของตกแต่งบ้านจากกะลามะพร้าว ร่วมกับการเปิดบ้านพักแบบโฮมสเตย์ให้นักท่องเที่ยวร่วมกิจกรรมปั่นจักรยานชมสวนมะพร้าว อย่างไรก็ตามปัญหาขยะกากมะพร้าวที่เกิดขึ้นทำให้เกิดผลเสีย เช่น ทำลายทัศนียภาพ เป็นที่อยู่ของแมลงบางชนิด และการเสียค่าใช้จ่ายในการขนส่งและการกำจัด

การผลิตถ่านกัมมันต์จากกากมะพร้าวนี้นี้จึงเป็นแนวทางหนึ่งในการกำจัดของเหลือทิ้งทางการเกษตรของชุมชน ควบคู่ไปกับการนำถ่านกัมมันต์ที่ได้ไปศึกษาการนำไปใช้ในสวนมะพร้าวของชุมชนในด้านต่าง ๆ เช่น การปรับปรุงคุณภาพดิน การเป็นปุ๋ยชีวภาพ แก่พืช เป็นต้น รวมถึงเป็นองค์ความรู้ในการแปรรูปวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรอื่น ๆ และเป็นข้อมูลในการออกแบบเตาเผาถ่านกัมมันต์เพื่อให้ชุมชนสามารถผลิตถ่านกัมมันต์ได้เอง ซึ่งทางวิสาหกิจชุมชนหนองมน อำเภอหนองมน จังหวัดชลบุรี สามารถผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวและไม้ไผ่ โดยใช้ไอน้ำในการกระตุ้นมีกำลังการผลิต 60 ตันต่อเดือน สามารถจำหน่าย 50 บาทต่อกิโลกรัม [8] ถ่านกัมมันต์ที่สังเคราะห์จากชีวมวลยังสามารถนำไปใช้เป็นตัวดูดซับสีและมลพิษอื่น ๆ จากน้ำเสียได้อีกด้วย ซึ่งมีหลายงานวิจัยที่ใช้เมทิลีนบลู (methylene blue: MB) ในการทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับของถ่านกัมมันต์ [9]–[11]

งานวิจัยนี้ได้มุ่งเน้นการผลิตถ่านกัมมันต์โดยใช้กากมะพร้าวซึ่งทำการทดลองโดยใช้ครุชีเบลและเผาในเตาเผาอุณหภูมิสูง (muffle furnace) ซึ่งเป็นระบบที่ใกล้เคียงกับเตาเผาถ่านที่มีในชุมชนเกษตรกรทั่วไป โดยมุ่งหวังให้สามารถนำไปพัฒนาเตาเผาต้นแบบให้เข้ากับสิ่งที่มีในชุมชนได้ การสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์แบ่งเป็น 2 ขั้นตอน คือ การผลิตถ่านชีวภาพและการกระตุ้นด้วยสารเคมี ได้แก่ กรดซัลฟูริก กรดฟอสฟอริก และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เพื่อศึกษาผลของปัจจัยที่เกี่ยวข้องของแต่ละขั้นตอน ถ่านกัมมันต์ที่สังเคราะห์ได้มีการนำไปทดสอบการดูดซับ MB พร้อมกับการคำนวณพื้นที่ผิวและระบุไอโซเทอร์มการดูดซับ เพื่อทราบความเป็นไปได้ในการนำไปใช้ดูดซับมลพิษในน้ำเสีย รวมถึงวิเคราะห์สถานะในการผลิตและต้นทุนการผลิตถ่านกัมมันต์ เพื่อประกอบการออกแบบเตาเผาที่เหมาะสม คณะผู้วิจัยคาดหวังว่าการทดลองในระบบที่ใกล้เคียงกับเตาเผาของชุมชน จะทำให้ชุมชนสามารถบริหารจัดการเองได้และเป็นต้นแบบในการพัฒนาสู่ชุมชน

ต่อไป นอกจากนี้การศึกษาระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์โดยแยกการศึกษาเป็น 2 ขั้นตอนนั้น จะทำให้ได้ข้อมูลผลของอุณหภูมิที่เป็นปัจจัยสำคัญในการผลิต [7] เพื่อสามารถควบคุมอุณหภูมิได้ดีขึ้นหรือใช้อุณหภูมิในการผลิตแต่ละส่วนต่ำลงได้เพื่อลดต้นทุนและความซับซ้อนของเตาเผา

2) วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาผลของปัจจัยต่าง ๆ ต่อการผลิตถ่านกัมมันต์จากกาบมะพร้าว
2. เพื่อหาภาวะที่เหมาะสมในการผลิตถ่านกัมมันต์จากกาบมะพร้าว
3. เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำถ่านกัมมันต์ไปใช้ประโยชน์ในด้านการดูดซับและอื่น ๆ

3) วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1) วัตถุดิบ สารเคมี และเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

วัตถุดิบที่ใช้ในงานวิจัยนี้ คือ กาบมะพร้าวจากพื้นที่ชุมชนตะเคียนเตี้ย อำเภอบางละมุง จังหวัดชลบุรี สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง ได้แก่ เมทิลีนบลูจาก Ajax Finechem กรดซัลฟูริก (H_2SO_4) ความเข้มข้น 95–97% จาก Merck กรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) ความเข้มข้น 85% จาก Ajax Finechem โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) จากศึกษาภัณฑ์พาณิชย์ กรดอะซิติก (CH_3COOH) glacial ความเข้มข้น 100% จาก Merck โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) AR Grade จาก QreC โดยทำการเผาด้วยเครื่องเตาเผาแบบ Muffle furnace รุ่น Nabertherm

3.2) การออกแบบการทดลอง

วิจัยนี้แบ่งการผลิตออกเป็น 2 ขั้นตอน คือ การผลิตถ่านชีวภาพ (การคาร์บอนไนซ์) และการผลิตถ่านกัมมันต์ ในการผลิตถ่านชีวภาพนั้นทำการออกแบบการทดลองโดยวิธี Central Composite Design (CCD) [12] เพื่อหาภาวะที่เหมาะสมในการผลิตถ่านชีวภาพ โดยกำหนดขอบเขตของภาวะที่ใช้ในการทดลองให้ครอบคลุมสำหรับการผลิตถ่านชีวภาพ จากการอ้างอิงและรวบรวมข้อมูลจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง [13]–[16] ในเบื้องต้นนั้น พบว่าอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมในการผลิตถ่านชีวภาพจะอยู่ระหว่าง 500–600 องศาเซลเซียส ที่เวลา 1–2 ชั่วโมง ดังนั้นการออกแบบการทดลองสามารถทำได้ดังตารางที่ 1 จากนั้นจะนำผลการทดลองที่ได้ไปวิเคราะห์โดยใช้วิธีพื้นผิวตอบสนอง (response surface methodology:

RSM) และการวิเคราะห์ความแปรปรวน (analysis of variance: ANOVA) ต่อไป

ตารางที่ 1 : ภาวะที่ใช้ในการทดลองตามการออกแบบการทดลองแบบ CCD

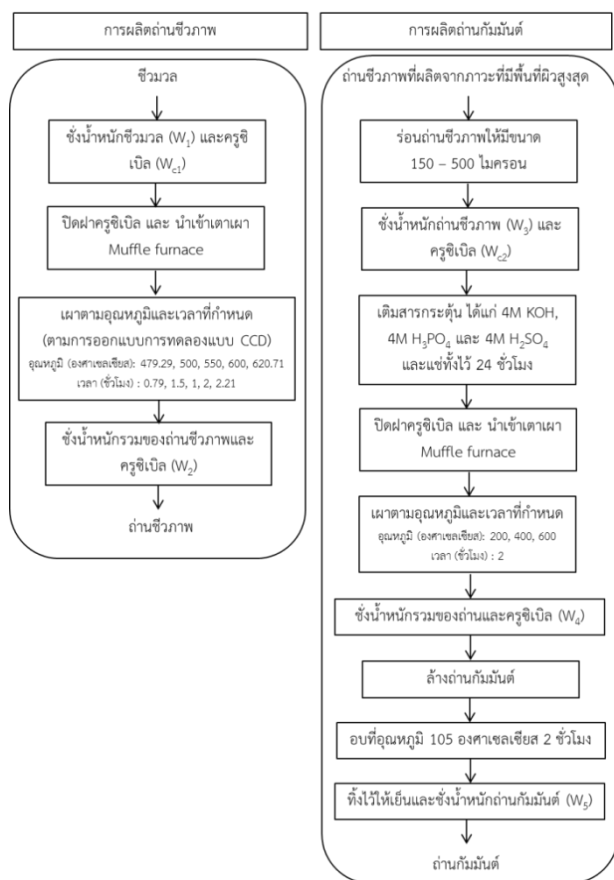
การทดลองที่	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส), ระดับ	เวลา (ชั่วโมง), ระดับ
1	479.29, -1.414	1.50, 0
2	479.29, -1.414	1.50, 0
3	500.00, -1	1.00, -1
4	500.00, -1	1.00, -1
5	500.00, -1	2.00, 1
6	500.00, -1	2.00, 1
7	550.00, 0	0.79, -1.414
8	550.00, 0	0.79, -1.414
9	550.00, 0	1.50, 0
10	550.00, 0	1.50, 0
11	550.00, 0	1.50, 0
12	550.00, 0	1.50, 0
13	550.00, 0	1.50, 0
14	550.00, 0	2.21, +1.414
15	550.00, 0	2.21, +1.414
16	600.00, 1	1.00, -1
17	600.00, 1	1.00, -1
18	600.00, 1	2.00, 1
19	600.00, 1	2.00, 1
20	620.71, +1.414	1.50, 0
21	620.71, +1.414	1.50, 0

เมื่อวิเคราะห์ผลการทดลองจนได้ภาวะที่เหมาะสมแล้ว จึงนำถ่านชีวภาพที่ผลิตได้จากภาวะที่เหมาะสมนั้นมาผลิตถ่านกัมมันต์โดยนำไปแช่ในสารกระตุ้น ได้แก่ กรดซัลฟูริก กรดฟอสฟอริก และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วจึงนำมาเผาที่อุณหภูมิ 200 400 และ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นทำการวิเคราะห์สมบัติของถ่านกัมมันต์ต่อไป

3.3) การเตรียมถ่านชีวภาพ

นำชีวมวลมาใส่ในครุชีเบล ซึ่งน้ำหนักครุชีเบล (W_{C1}) และน้ำหนักของชีวมวลที่ใช้ (W_1) ปิดฝาครุชีเบลและนำไปเข้าเตาเผา ตั้งเวลาและอุณหภูมิที่ต้องการ เมื่อครบตามกำหนดเวลาแล้ว ทั้งไว้ให้เย็นจนถึงอุณหภูมิห้อง นำออกจากเตาเผา เปิดฝา และชั่ง

น้ำหนัก (W_2) เก็บถ่านชีวภาพที่ได้ไว้ในตู้ดูดความชื้นจนกว่าจะมีการใช้งาน



รูปที่ 1 : แผนภาพขั้นตอนการผลิตถ่านชีวภาพและถ่านกัมมันต์

3.4) การเตรียมถ่านกัมมันต์

เตรียมสารกระตุ้นให้มีความเข้มข้น 4 โมลต่อลิตร กรองถ่านชีวภาพให้มีขนาดระหว่าง 150–500 ไมครอน ชั่งน้ำหนักครุชิลเบล (W_{c2}) และน้ำหนักของถ่านชีวภาพที่ใช้ (W_3) เติมสารกระตุ้นโดยใช้ปริมาณสารกระตุ้นต่อถ่านชีวภาพเท่ากับ 2 ต่อ 1 โดยน้ำหนัก แช่ทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำไปเผาที่อุณหภูมิ 200 400 และ 600 องศาเซลเซียส เวลา 2 ชั่วโมง เมื่อครบตามกำหนดเวลาแล้ว ทิ้งไว้ให้เย็นจนถึงอุณหภูมิห้อง นำออกจากเตาเผา เปิดฝา และชั่งน้ำหนักถ่านของถ่านกับครุชิลเบล (W_4) ล้างถ่านกัมมันต์โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ หรือสารละลายกรดอะซิติก ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร และน้ำกลั่นจนกระทั่งมีค่าพีเอชเป็นกลาง นำไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นทิ้งไว้ให้เย็นและชั่งน้ำหนัก (W_5) เก็บถ่านกัมมันต์ที่ได้ไว้ในตู้ดูดความชื้นจนกว่าจะมีการใช้งาน ขั้นตอนการทดลองโดยสรุปแสดงดังรูปที่ 1

3.5) การวิเคราะห์สารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์

3.5.1) การวิเคราะห์ความชื้น (Moisture) วิเคราะห์ปริมาณความชื้น ด้วยวิธี ASTM E-871-82 [17] ชั่งน้ำหนักครุชิลเบล (W_{mc}) และชั่งน้ำหนักตัวอย่างประมาณ 1 กรัม (W_{m1}) ใส่ในถ้วยครุชิลเบล แล้วไปอบในเตาอบที่อุณหภูมิ 103 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 16 ชั่วโมง ทิ้งไว้ให้เย็นในเดซิเคเตอร์ แล้วชั่งน้ำหนักของครุชิลเบล และตัวอย่างหลังอบ (W_{m2}) คำนวณได้ดังสมการที่ 1

$$\%M = \frac{W_{m2} - W_{mc}}{W_{m1}} \times 100 \quad (1)$$

โดยที่ %M คือ ปริมาณความชื้น (ร้อยละโดยน้ำหนัก)

W_{mc} คือ น้ำหนักครุชิลเบล (กรัม)

W_{m1} คือ น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ (กรัม), as received

W_{m2} คือ น้ำหนักตัวอย่างและครุชิลเบลหลังอบ (กรัม)

3.5.2) การวิเคราะห์เถ้า (% ash) วิเคราะห์ปริมาณเถ้า ด้วยวิธี ASTM E-1755-01 [18] ชั่งน้ำหนักครุชิลเบล (W_{ac}) และชั่งน้ำหนักตัวอย่างแห้งประมาณ 1 กรัม (W_{a1}) ใส่ในถ้วยครุชิลเบล แล้วไปเผาที่อุณหภูมิ 575 องศาเซลเซียส ทิ้งไว้ให้เย็น แล้วชั่งน้ำหนักของครุชิลเบลและตัวอย่างหลังเผา (W_{a2}) คำนวณได้ดังสมการที่ 2

$$\%ash = \frac{W_{a2} - W_{ac}}{W_{a1}} \times 100 \quad (2)$$

โดยที่ %ash คือ ปริมาณเถ้า (ร้อยละโดยน้ำหนัก)

W_{ac} คือ น้ำหนักครุชิลเบล (กรัม)

W_{a1} คือ น้ำหนักตัวอย่างก่อนเผา (กรัม), dry, ash-free basis

W_{a2} คือ น้ำหนักตัวอย่างและครุชิลเบล

3.5.3) การวิเคราะห์สารระเหย (Volatile Matter) ด้วยเทคนิค Thermogravimetric Analysis (TGA) โดยใช้เครื่อง Thermogravimetric Analyzer รุ่น NETZSCH TG 209 F3 Tarsus ตามวิธี ASTM E 1868-10 [19] ทำการวิเคราะห์ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน เริ่มบันทึกน้ำหนักที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส (W_{vm1}) จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิไปที่ 950 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการให้ความร้อน 200 องศาเซลเซียส/นาทีก และค้างไว้ที่อุณหภูมินี้ 7 นาที แล้วจึงบันทึกน้ำหนักอีกครั้ง (W_{vm1}) ปริมาณของสารระเหยคำนวณจากการนำน้ำหนักสุดท้ายลบด้วยน้ำหนักเริ่มต้น คำนวณได้ดังสมการที่ 3

$$\%VM = \frac{W_{vm1} - W_{vm2}}{W_{vm1}} \times 100 \quad (3)$$

โดยที่ %VM คือ ปริมาณสารระเหย (ร้อยละโดยน้ำหนัก)

W_{vm1} คือ น้ำหนักตัวอย่างที่อุณหภูมิ 110 องศา

เซลเซียส ก่อนเผา (กรัม)

W_{vm2} คือ น้ำหนักตัวอย่างหลังเผาที่อุณหภูมิ 950

องศาเซลเซียส (กรัม)

3.5.4) การคำนวณค่าคาร์บอนคงตัว คำนวณคาร์บอนคงตัวจากผลต่างดังนี้

$$\%FC = 100 - \%M - \%Ash - \%VM \quad (4)$$

โดยที่ %FC คือ คาร์บอนคงตัว (ร้อยละโดยน้ำหนัก)

3.5.5) การคำนวณค่าร้อยละผลได้ของแข็ง (% solid) คำนวณหาผลได้ของแข็งสำหรับการผลิตถ่านชีวภาพและการผลิตถ่านกัมมันต์เป็นร้อยละได้ดังสมการที่ (5) และ (6) ตามลำดับ ดังนี้

$$\%solid = \frac{W_2 - W_{c1}}{W_1} \times 100 \quad (5)$$

$$\text{และ} \quad \%solid = \frac{W_5}{W_3} \times 100 \quad (6)$$

โดยที่ %solid คือ ผลได้ของของแข็ง (ร้อยละโดยน้ำหนัก)

W_{c1} คือ น้ำหนักครุชีเบิล (กรัม)

W_1 คือ น้ำหนักชีวมวลแห้งก่อนทำการทดลอง (กรัม), dry, ash-free basis

W_2 คือ น้ำหนักถ่านชีวภาพและครุชีเบิลหลังทำการทดลอง (กรัม)

W_3 คือ น้ำหนักถ่านชีวภาพแห้งก่อนทำการทดลอง (กรัม), dry, ash-free basis

W_5 คือ น้ำหนักถ่านกัมมันต์ (กรัม)

3.5.6) การวิเคราะห์การดูดซับด้วย MB เตรียมสารละลาย MB ให้มีความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร (C_1) ปริมาตร 100 มิลลิตร ชั่งน้ำหนักถ่านชีวภาพ/ถ่านกัมมันต์ 0.2 กรัม (W) ใส่ในบีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิตร เทสารละลาย MB ที่เตรียมไว้แล้วกลายเป็นเวลา 3 ชั่วโมง นำของผสมที่ได้ไปกรองด้วยกระดาษกรองใยแก้ว GF/C glass microfiber filters ขนาด 47 มิลลิเมตร นำสารละลายที่ได้ไปวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV spectrometer ที่ความยาวคลื่น 667 นาโนเมตร คำนวณค่าความเข้มข้น (C_2) จากค่าการดูดกลืนแสงที่วัดได้โดยใช้ calibration curve

3.5.7) การคำนวณประสิทธิภาพการดูดซับ คำนวณหาประสิทธิภาพการดูดซับเป็นร้อยละได้ดังนี้

$$\%eff = \frac{C_1 - C_2}{C_1} \times 100 \quad (7)$$

โดยที่ %eff คือ ประสิทธิภาพการดูดซับ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)

C_1 คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย MB (มิลลิกรัมต่อลิตร)

C_2 คือ ความเข้มข้นสุดท้ายของสารละลาย MB (มิลลิกรัมต่อลิตร)

3.5.8) การความสามารถในการดูดซับ คำนวณหาความสามารถในการดูดซับของถ่านได้ดังนี้

$$Q_e = \frac{V(C_1 - C_2)}{W} \quad (8)$$

โดยที่ Q_e คือ ความสามารถในการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

C_1 คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย MB (มิลลิกรัมต่อลิตร)

C_2 คือ ความเข้มข้นสุดท้าย (ความเข้มข้นสมดุล) ของสารละลาย MB (มิลลิกรัมต่อลิตร)

V คือ ปริมาตรของสารละลายที่ใช้ (ลิตร)

W คือ น้ำหนักของถ่านที่ใช้ (กรัม)

3.5.9) การคำนวณพื้นที่ผิวของวัสดุ คำนวณหาพื้นที่ผิวของถ่านได้ดังนี้ [20], [21]

$$S = \frac{Q_e \times N_A \times A_m}{1,000 \times M_{MB}} \quad (9)$$

โดยที่ S คือ พื้นที่ผิว (ตารางเมตรต่อกรัม)

Q_e คือ ความสามารถในการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

N_A คือ Avogadro's number (6.02×10^{23} โมเลกุลต่อโมล)

A_m คือ พื้นที่ที่ถูกครอบครองด้วย MB 1 โมเลกุล (1.30×10^{-18} ตารางเมตรต่อโมเลกุล) [20]

M_{MB} คือ มวลโมเลกุลของ MB (373.89 กรัมต่อโมล)

4) ผลการวิจัย

4.1) ลักษณะของวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร

จากการสำรวจพื้นที่ในตำบลตะเคียนเตี้ย อำเภอบางละมุง จังหวัดชลบุรี พบว่าวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรส่วนใหญ่มาจากสวนมะพร้าว ได้แก่ กาบมะพร้าวและกะลามะพร้าว ซึ่งบางส่วนมีการนำไปแปรรูปแต่บางส่วนถูกทิ้งไว้ นอกจากนั้นยังมีขี้เลื่อย

จากต้นมะพร้าวและแกลบอีกจำนวนหนึ่ง ลักษณะของกาบมะพร้าว แกลบ และซีลี้อยแสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 : กาบมะพร้าว (ก) แกลบ (ข) และซีลี้อย (ค)

เมื่อนำไปวิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุ (ultimate analysis) พบว่าองค์ประกอบของกาบมะพร้าวและซีลี้อยใกล้เคียงกันโดยมีคาร์บอนประมาณร้อยละ 46 และออกซิเจนประมาณร้อยละ 48 ในขณะที่แกลบมีปริมาณคาร์บอนน้อยที่สุดดังแสดงในตารางที่ 2 นอกจากนี้ผลการวิเคราะห์แบบประมาณ (proximate analysis) ของกาบมะพร้าวพบว่ามีค่าความชื้นร้อยละ 2.19 ร้อยละสารระเหย 76.61 ร้อยละคาร์บอนคงตัว 18.51 และร้อยละเถ้า 2.69 ด้วยคุณสมบัติดังกล่าวจึงเลือกกากมะพร้าวมาผลิตถ่านชีวภาพ

4.2) การผลิตถ่านชีวภาพจากกากมะพร้าว

จากการผลิตถ่านชีวภาพโดยการออกแบบการทดลองแบบ CCD ดังรายละเอียดในตารางที่ 3 สำหรับร้อยละผลได้ของแข็งและพื้นที่ผิวของถ่านชีวภาพจากกากมะพร้าว พบว่าถ่านชีวภาพที่ได้จากกากมะพร้าวมีพื้นที่ผิวสูงสุดเมื่อเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง คิดเป็นค่าเฉลี่ย 104.75 ตารางเมตรต่อกรัม

เมื่อพิจารณาแนวโน้มโดยทั่วไปของร้อยละผลได้ของแข็งพบว่า เมื่ออุณหภูมิและเวลาเพิ่มขึ้นร้อยละผลได้ของแข็งจะลดลงเนื่องจากการสลายตัวทางความร้อน (thermal cracking) ของชีวมวลที่อุณหภูมิสูง ในทางกลับกันเมื่ออุณหภูมิและเวลาเพิ่มขึ้นพื้นที่ผิวของถ่านชีวภาพจะเพิ่มขึ้น เนื่องจากการสลายตัวของสารระเหยได้ที่มากขึ้น โดยที่สารระเหยได้บางส่วน รวมถึงเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสจะสลายตัวก่อนในช่วงอุณหภูมิ 200–500 องศาเซลเซียส จากนั้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นมากกว่า 500 องศาเซลเซียส ลิกนินและสารอินทรีย์อื่นที่มีพันธะที่แข็งแรงจะ

เกิดการสลายตัว และเมื่ออุณหภูมิสูงเกิน 650 องศาเซลเซียส ถ่านชีวภาพจะมีความเสถียรและไม่ชอบน้ำมากขึ้น [22]

ตารางที่ 2 : ผลการวิเคราะห์ปริมาณร้อยละคาร์บอน (C) ร้อยละไฮโดรเจน (H) ร้อยละไนโตรเจน (N) และ ออกซิเจน (O) (โดยน้ำหนัก) ของชีวมวล

ชีวมวล	% C	% H	% N	% O
กากมะพร้าว	46.65	5.15	0.25	47.95
แกลบ	40.72	5.30	0.36	53.62
ซีลี้อย	45.59	5.87	0.48	48.06

ตารางที่ 3 : ร้อยละผลได้ของแข็งและพื้นที่ผิวของถ่านชีวภาพจากกากมะพร้าว

อุณหภูมิคาร์บอน (องศาเซลเซียส)	เวลา (ชั่วโมง)	ร้อยละผลได้ของแข็ง	พื้นที่ผิว (ตารางเมตรต่อกรัม)
479.29	1.50	34.28	90.93
479.29	1.50	35.28	89.99
500.00	1.00	34.68	75.45
500.00	1.00	36.11	80.44
500.00	2.00	29.23	97.85
500.00	2.00	27.95	103.14
550.00	0.79	32.76	99.51
550.00	0.79	32.88	103.48
550.00	1.50	29.14	94.07
550.00	1.50	30.90	102.51
550.00	1.50	29.76	95.53
550.00	1.50	27.93	93.09
550.00	1.50	28.77	97.29
550.00	2.21	24.19	110.69
550.00	2.21	26.49	110.71
600.00	1.00	28.85	99.51
600.00	1.00	30.57	103.56
600.00	2.00	25.94	106.79
600.00	2.00	24.89	102.71
620.71	1.50	25.44	108.11
620.71	1.50	27.62	112.75

เมื่อนำผลการทดลองของการผลิตถ่านชีวภาพจากกากมะพร้าวมาวิเคราะห์หาปัจจัยที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของแข็งและพื้นที่ผิวด้วยวิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) แสดงรายละเอียดในตารางที่ 4 เมื่อพิจารณาจากค่า p-value พบว่าค่า p-value ของปัจจัย A (อุณหภูมิ) และ B (เวลา) สำหรับการวิเคราะห์ ANOVA ของร้อยละผลได้ของแข็งและพื้นที่ผิวของถ่านชีวภาพ มีค่าน้อยกว่า 0.05 ซึ่งเป็นการระบุว่าอุณหภูมิและเวลามี

ผลต่อร้อยละผลได้ของแข็งและพื้นที่ผิวของถ่านชีวภาพอย่างมีนัยสำคัญ สำหรับพื้นที่ผิวนั้นพบว่าปัจจัย AB หรืออันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิและเวลาส่งผลอย่างมีนัยสำคัญเช่นเดียวกัน อย่างไรก็ตาม จากตารางที่ 4 จะเห็นว่าค่า p-value ของปัจจัยที่ไม่อยู่ในลักษณะเชิงเส้น (quadratic effects) เช่น A^2 และ B^2 มีค่ามากกว่า 0.05 แสดงว่าไม่มีผลต่อร้อยละผลได้ของแข็งและ

พื้นที่ผิวของถ่านชีวภาพอย่างมีนัยสำคัญ ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยและผลการทดลองจึงมีลักษณะเชิงเส้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองจากงานวิจัยก่อนหน้า [23] ค่าร้อยละผลได้ของแข็งและพื้นที่ผิวของถ่านชีวภาพที่สูงที่สุดจึงพบได้จากภาวะที่สูงสุดหรือต่ำสุดของแต่ละปัจจัย ดังจะเห็นในกราฟพื้นผิวตอบสนองและ contour plot ในรูปที่ 3 และ 4 ที่จะอภิปรายต่อไป

ตารางที่ 4 : ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับร้อยละผลได้ของแข็ง (ก) และพื้นที่ผิว (ข) ของถ่านชีวภาพจากกาบมะพร้าว

(ก) ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับร้อยละผลได้ของแข็ง

Source	Sum of Squares	Degree of Freedom	Mean Square	F-value	p-value
Model	231.93	5	46.39	42.34	< 0.0001*
A-Temperature	105.39	1	105.39	96.19	< 0.0001*
B-Time	117.41	1	117.41	107.17	< 0.0001*
AB	3.14	1	3.14	2.87	0.1111
A^2	4.42	1	4.42	4.04	0.0629
B^2	0.18	1	0.18	0.16	0.6918
Residual	16.43	15	1.10		
Lack of Fit	2.06	3	0.69	0.57	0.6436
Pure Error	14.38	12	1.20		
Cor Total	248.36	20			

(ข) ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับพื้นที่ผิว

Source	Sum of Squares	Degree of Freedom	Mean Square	F-value	p-value
Model	1452.81	5	290.56	12.14	< 0.0001*
A-Temperature	786.33	1	786.33	32.84	< 0.0001*
B-Time	376.02	1	376.02	15.7	0.0013*
AB	186.89	1	186.89	7.81	0.0136*
A^2	0.42	1	0.42	0.02	0.8970
B^2	94.56	1	94.56	3.95	0.0655
Residual	359.15	15	23.94		
Lack of Fit	241.85	3	80.62	8.25	0.0030
Pure Error	117.30	12	9.78		
Cor Total	1811.96	20			

*The factors with p-value < 0.05 are significant

จากนั้นเมื่อนำผลการคำนวณมาสร้างสมการถดถอยสำหรับร้อยละผลได้ของแข็งและพื้นที่ผิว แสดงดังสมการที่ 10 และ 11

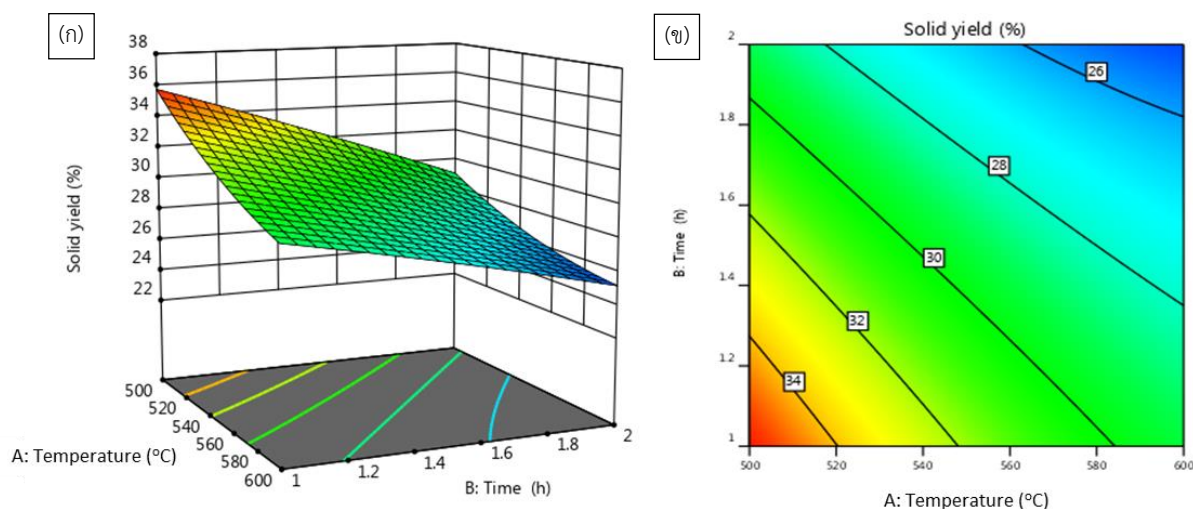
$$\text{Solid yield} = 29.3 - 2.57(T) - 2.71(t) + 0.63(Tt) + 0.65(T^2) - 0.13(t^2) \quad (10)$$

$$\text{Surface area (m}^2\text{/g)} = 96.5 + 7.01(T) + 4.85(t) - 4.83(Tt) + 0.20(T^2) - 3.03(t^2) \quad (11)$$

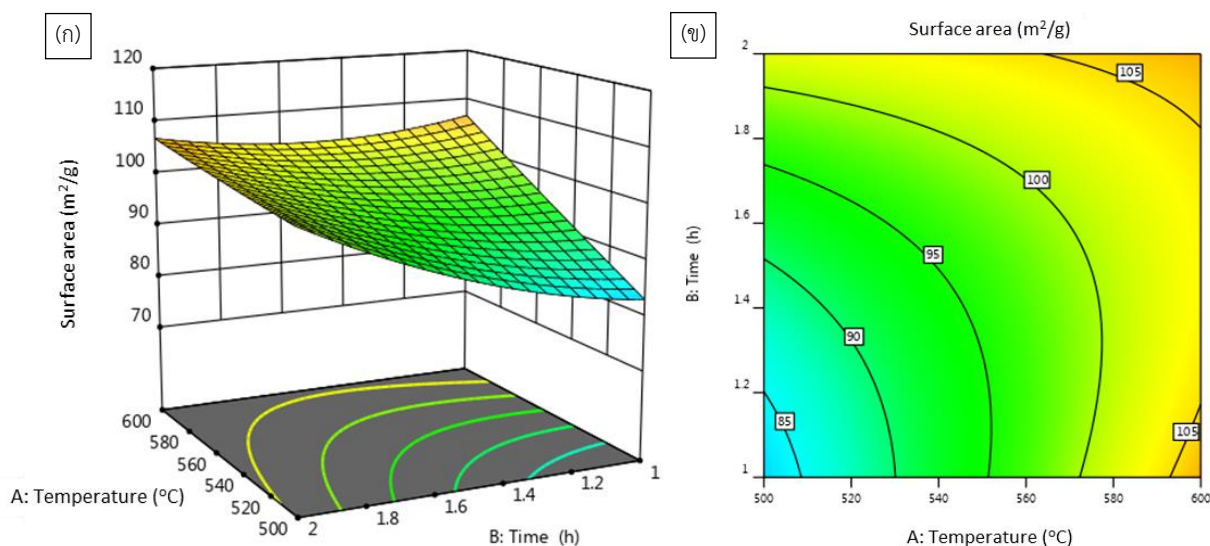
เมื่อ T และ t คือ ระดับของอุณหภูมิและเวลา ตามลำดับจากสมการถดถอยพบว่าสัมประสิทธิ์หน้า T (อุณหภูมิ) และ t (เวลา) สำหรับร้อยละผลได้ของแข็งมีค่าเป็นลบ แสดงว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิและเวลาร้อยละผลได้ของแข็งลดลง ในขณะที่สัมประสิทธิ์หน้า T (อุณหภูมิ) และ t (เวลา) สำหรับพื้นที่ผิวมีค่าเป็นบวก แสดงว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิและเวลา พื้นที่ผิวของถ่านชีวภาพจะเพิ่มขึ้นซึ่งสอดคล้องกับการอธิบายผลการทดลองข้างต้นและ

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง [7] จากนั้นนำสมการถดถอยมาสร้างเป็นกราฟพื้นผิวตอบสนองและ contour plot สำหรับร้อยละผลได้ของแข็งและพื้นที่ผิว แสดงได้ดังรูปที่ 3 และ 4 ตามลำดับ จะทำให้สามารถสังเกตแนวโน้มของผลการทดลองได้ชัดเจนขึ้น รวมถึงสามารถทำนายผลการทดลองในช่วงอุณหภูมิ 500–600 องศาเซลเซียสและเวลา 1–2 ชั่วโมงได้โดยมีค่า $R^2 = 0.93$ และ 0.80 สำหรับร้อยละผลได้ของแข็งและพื้นที่ผิว ตามลำดับ นอกจากนี้ในรูปที่ 4 (ข) แสดงให้เห็นความโค้งของ contour อันเนื่องมาจากผลของอันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิและเวลาที่มีต่อพื้นที่ผิวนั่นเอง

จากผลการทดลองการผลิตถ่านชีวภาพจากกากมะพร้าว ทำให้สามารถเลือกภาวะที่ใช้ในการผลิตถ่านชีวภาพเพื่อนำมากระดุนโดยใช้สารเคมี ได้แก่ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ กรดฟอสฟอริก และกรดซัลฟิวริก ความเข้มข้น 4 โมลาร์ได้ โดยเลือกถ่านชีวภาพที่ได้ 3 ภาวะ ได้แก่ ภาวะที่ได้อ้อยละผลได้ของแข็งสูงที่สุด ภาวะที่ได้พื้นที่ผิวมากที่สุด และภาวะที่ได้ความพึงพอใจสูงสุด (คำนวณโดยโปรแกรม Design-Expert) เพื่อให้ลักษณะของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้มีความหลากหลาย โดยภาวะที่เลือกแสดงดังตารางที่ 5



รูปที่ 3 : พื้นผิวตอบสนอง (ก) และ contour plot (ข) ของร้อยละผลได้ของแข็ง



รูปที่ 4 : พื้นผิวตอบสนอง (ก) และ contour plot (ข) ของพื้นที่ผิว

ตารางที่ 5 : ภาพการผลิตถ่านชีวภาพจากกากมะพร้าวที่เลือกก่อนนำมา
กระตุ้นด้วยสารเคมี

ภาวะ	อุณหภูมิคาร์บอนไนซ์ (องศาเซลเซียส)	เวลา (ชั่วโมง)
Highest surface area	600	2
Highest solid yield	500	1
Highest desirability	600	1

4.3) การผลิตถ่านกัมมันต์

เมื่อเลือกภาวะที่ต้องการได้ตามตารางที่ 5 จึงนำถ่านชีวภาพที่ผลิตได้ตามภาวะดังกล่าวไปกระตุ้นด้วยสารเคมี ได้แก่ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ กรดฟอสฟอริก และกรดซัลฟูริก ความเข้มข้น 4 โมลาร์ โดยใช้อุณหภูมิ 200, 400 และ 600 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 6 เมื่อพิจารณาแนวโน้มในภาพรวมจากการทดลองพบว่าเมื่อใช้อุณหภูมิกระตุ้นมากขึ้นร้อยละผลได้ของแข็งของถ่านกัมมันต์ลดลง ในขณะที่การเพิ่มอุณหภูมิมีผลต่อพื้นที่ผิวแตกต่างกัน

4.3.1) ผลของชนิดสารกระตุ้นต่อพื้นที่ผิว จากการวิเคราะห์ร้อยละผลได้ของแข็งดังแสดงในตารางที่ 6 (ก) พบว่าการผลิตถ่านกัมมันต์โดยการกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ให้ร้อยละผลได้ของแข็งสูงถึงร้อยละ 100 และเมื่อพิจารณาพื้นที่ผิวดังแสดงในตารางที่ 6 (ข) พบว่ามีพื้นที่ผิวสูงมากกว่า 550 ตารางเมตรต่อกรัมและมากกว่าพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นด้วยกรดทั้งสองชนิด ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ในการกระตุ้นทำให้ไฮดรอกไซด์ไอออนเข้าไปทำปฏิกิริยากับหมู่ฟังก์ชันที่ประกอบด้วยออกซิเจนของผิวถ่านชีวภาพ และสร้างหมู่ฟังก์ชันที่ประกอบด้วยออกซิเจนใหม่จำนวนมากและมีคุณสมบัติในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (cation exchange capacity) มากขึ้น [24], [25] เมื่อนำไปทดสอบการดูดซับด้วย MB จึงพบว่าสามารถดูดซับ MB ได้มาก ค่าพื้นที่ผิวที่คำนวณได้จึงมีค่าสูง

นอกจากนี้ เมื่อนำถ่านชีวภาพและถ่านกัมมันต์ไปวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่ กำลังขยาย 250 เท่า พบว่าผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 5 ลักษณะพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกหรือกรดซัลฟูริก และเผาที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส มีลักษณะค่อนข้างเรียบเมื่อเปรียบเทียบกับถ่านชีวภาพก่อนนำไปกระตุ้น ในขณะที่ถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และเผาที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส สามารถสังเกตเห็นรูพรุน

ที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวได้ ทั้งนี้แนวโน้มดังกล่าวสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Brunauer-Emmett-Teller (BET) จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ซึ่งในงานวิจัยนี้ระบุว่าการกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ทำให้เกิดรูพรุนขนาดเล็ก (micropores) และรูพรุนขนาดกลาง (mesopores) ซึ่งทำให้ MB สามารถแพร่เข้าไปในโครงสร้างที่เป็นรูพรุนขนาดกลางได้ง่ายขึ้น ในขณะที่การกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกและกรดซัลฟูริกไม่สามารถมองเห็นรูพรุนที่เกิดขึ้นได้ [26] อย่างไรก็ตาม ร้อยละผลได้ของแข็งของถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ยังคงเท่ากับร้อยละ 100 เนื่องจากการเข้าไปทำปฏิกิริยาระหว่างไฮดรอกไซด์ไอออนกับถ่านชีวภาพ และอุณหภูมิต่ำเกินกว่าที่สารระเหยจากถ่านชีวภาพจะสลายตัวออกไปจนส่งผลให้น้ำหนักลดลงอย่างเห็นได้ชัด

4.3.2) ผลของอุณหภูมิกระตุ้นต่อพื้นที่ผิว จากตารางที่ 6 (ก) พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิในการกระตุ้นทำให้อัตราผลได้ของแข็งลดลงเนื่องจากการสลายตัวของสารระเหยบางส่วนที่อุณหภูมิสูง อย่างไรก็ตามร้อยละผลได้ของแข็งของถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกกลับมีค่ามากขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 200 เป็น 400 องศาเซลเซียส จากนั้นจึงลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจนถึง 600 องศาเซลเซียส สาเหตุอาจเนื่องมาจากการเกิดปฏิกิริยาระหว่างกรดฟอสฟอริกกับคาร์บอนในชีวมวล ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาเชื่อมขวางและเกิดหมู่ $P-O-C / C-O-PO_3$ ทำให้การกักเก็บคาร์บอน (carbon retention) ของถ่านชีวภาพมีค่ามากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับคาร์บอนที่ไม่เติมกรด นอกจากนี้ยังพบว่าค่าการกักเก็บคาร์บอนเพิ่มมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 350 เป็น 500 องศาเซลเซียส และลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็น 650 องศาเซลเซียส [27] ปรากฏการณ์ดังกล่าวสอดคล้องกับร้อยละผลได้ของแข็งซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นจากนั้นจึงลดต่ำลงเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 500 องศาเซลเซียส

จากตารางที่ 6 (ข) พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิในการกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ทำให้พื้นที่ผิวลดลง ส่วนหนึ่งอาจเนื่องมาจากการดูดซับ MB บนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยเบสเป็นปฏิกิริยาคายพลังงาน (exothermic reaction) การเพิ่มอุณหภูมิจึงทำให้ MB หลุดออกจากโครงสร้างได้ง่าย รวมถึงอาจเกิดการจัดเรียงตัวของโครงสร้างและรูพรุนใหม่ทำให้ความเป็นรูพรุนลดลงหรือมีลักษณะที่ไม่เหมาะสมต่อการดูดซับ ในทางกลับกัน การเพิ่มอุณหภูมิจาก 200 เป็น 400 องศาเซลเซียสในการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกและกรดซัลฟูริกทำให้พื้นที่ผิวเพิ่มขึ้น เป็นไปได้ว่าที่อุณหภูมิต่ำการเกิดรูพรุนยังไม่สมบูรณ์ [28] การเพิ่มอุณหภูมิทำให้รูพรุนสามารถเกิดได้ดีขึ้นจากการสลายตัวเพิ่มเติมของสาร

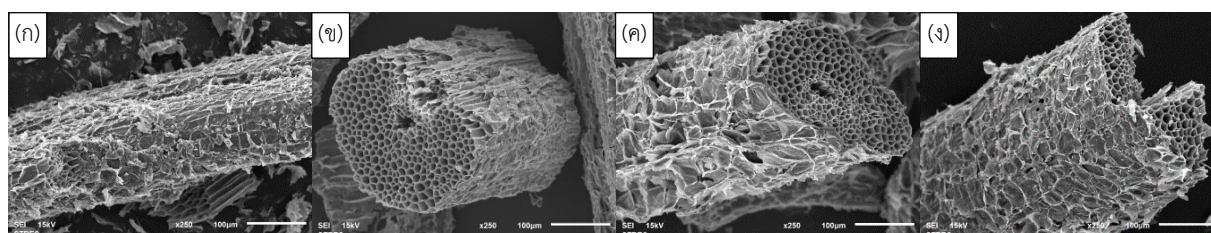
ระเหยที่เกิดจากปฏิกิริยาของกรดกับถ่านชีวภาพ ทำให้เกิดรูพรุนมากขึ้น จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์มีผลดีในแง่ของการใช้อุณหภูมิที่ต่ำกว่าทำให้สามารถประหยัดพลังงานในการผลิตได้มากกว่าการใช้กรด

ทั้งนี้สำหรับพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นถ่านชีวภาพจากกากบะพราวด้วยกรดฟอสฟอริกและกรดซัลฟูริกที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ไม่สามารถวิเคราะห์ได้ เนื่องจากลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความแตกต่างจากลักษณะทั่วไปของถ่านกัมมันต์ เช่น เป็นสีขาว สีน้ำตาล หรือเหลืองนวลมาก อันเนื่องมาจากการเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันบางส่วนของถ่านกัมมันต์ที่อุณหภูมิสูง [29] รวมถึงอาจเกิดการออกซิเดชันกับอากาศที่ค้างอยู่ในครุชีเบลบางส่วน

เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมาซึ่งมีการใช้อุณหภูมิสูงในการกระตุ้นและใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบท่อ [6], [7] ซึ่งมีความซับซ้อนและไม่เหมาะสมต่อการนำไปใช้งานในระดับชุมชน พบว่างานวิจัยนี้ทำทดลองใน muffle furnace ซึ่งมีข้อดีคือเป็นระบบที่ใกล้เคียงกับการสร้างเตาเผาที่ไม่ซับซ้อนและมีความเป็นไปได้

ในการสร้างเพื่อผลิตถ่านชีวภาพในชุมชน รวมถึงสามารถปรับเป็นเตาเผาสำหรับการผลิตถ่านกัมมันต์ได้ในลักษณะใกล้เคียงกัน แต่ข้อเสียคือไม่สามารถทำให้เป็นระบบปิดหรือทำการทดลองภายใต้ inert atmosphere ได้อย่างสมบูรณ์ดังนั้นจึงมีอากาศอยู่จำนวนหนึ่งในครุชีเบลหลังจากที่ปิดฝาแล้ว เมื่อทำการเผาที่อุณหภูมิสูงออกซิเจนที่มีอยู่จึงทำปฏิกิริยาออกซิเดชัน ส่งผลให้ถ่านกลายไปเถ้าได้บางส่วนดังที่กล่าวไปแล้วข้างต้น

จากผลการทดลองที่แสดงในตารางที่ 6 จะเห็นว่าการผลิตถ่านกัมมันต์จากกากบะพราวที่อุณหภูมิสูงให้ร้อยละผลได้ของแข็งของถ่านกัมมันต์ต่ำ แต่ร้อยละผลได้ของแข็งเพิ่มขึ้นเมื่อใช้อุณหภูมิต่ำลง จนเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 100 ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ซึ่งต่ำกว่างานวิจัยก่อนหน้า [6], [7] และให้พื้นที่ผิวสูงสุดถึง 1,147.74 ลูกบาศก์เมตรต่อกรัม แสดงให้เห็นว่าการใช้วิธีการผลิตถ่านกัมมันต์นี้ สามารถผลิตถ่านกัมมันต์โดยใช้อุณหภูมิต่ำได้ ทำให้ช่วยลดพลังงาน ลดความซับซ้อนและต้นทุนของการสร้างเตาเผา ซึ่งคณะผู้วิจัยจะศึกษาการผลิตถ่านกัมมันต์โดยเน้นการใช้อุณหภูมิต่ำในงานวิจัยขั้นต่อไป



รูปที่ 5 : ภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 250 เท่า ของถ่านชีวภาพจากกากบะพราวที่เผาอุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง (ก) และถ่านกัมมันต์ที่ผลิตโดยการนำถ่านชีวภาพจากกากบะพราวที่เผาอุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง ไปกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (ข) กรดฟอสฟอริก (ค) และกรดซัลฟูริก (ง)

4.3.3) ผลของภาวะที่ใช้ในการผลิตถ่านชีวภาพต่อพื้นที่ผิว จากตารางที่ 6 เมื่อสังเกตภาพรวมของการผลิตถ่านกัมมันต์จากถ่านชีวภาพพบว่า การผลิตถ่านชีวภาพโดยใช้อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมงทำให้ได้ถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวสูงกว่าถ่านชีวภาพที่ผลิตจากภาวะอื่น อาจเนื่องมาจากโครงสร้างที่ยังมีสารระเหยบางส่วนเหลืออยู่ทำให้การเกิดรูพรุนโดยการกระตุ้นด้วยสารเคมีสามารถเกิดได้สมบูรณ์มากกว่าทั้งนี้ควรวิเคราะห์ด้วยเทคนิคอื่น ๆ เพิ่มเติมเพื่อตรวจสอบสมมุติฐาน รวมถึงทดลองผลิตถ่านชีวภาพด้วยภาวะที่รุนแรงน้อยกว่านี้เพื่อทดสอบผลการกระตุ้นเพิ่มเติม

4.3.4) ไอโซเทอร์มของถ่านกัมมันต์ การศึกษาไอโซเทอร์มสำหรับการดูดซับถ่านกัมมันต์ด้วย MB ผู้วิจัยเลือกถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากการคาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง และกระตุ้นที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เวลา 2 ชั่วโมง ด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (พื้นที่ผิว 1,147.74 ตารางเมตรต่อกรัม) มาทำการทดสอบเพื่อวิเคราะห์หาไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ (Langmuir Adsorption Isotherms) และไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรูดลิช (Freudlich Adsorption Isotherms) [29] โดยมีสมการการดูดซับดังนี้

สมการการดูดซับแบบแลงเมียร์:

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{q_{\max} K_L} + \frac{C_e}{q_{\max}} \quad (11)$$

สมการการดูดซับแบบฟรุนดลิช:

$$\log(q_e) = \log(K_F) + \frac{1}{n} \log(C_e) \quad (12)$$

โดยที่ q_e คือ ความเข้มข้นสมดุลของสารละลาย MB บนถ่านกัมมันต์ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

C_e คือ ความเข้มข้นสมดุลของสารละลาย MB (มิลลิกรัมต่อลิตร)

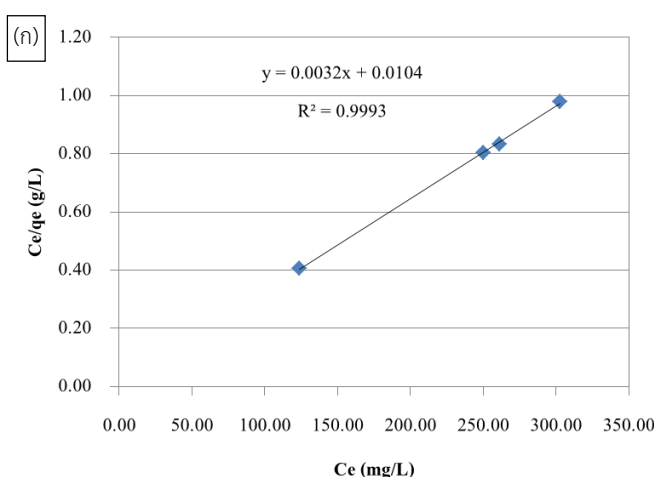
$q_{\max}$ คือ ความสามารถในการดูดซับแบบชั้นเดียวของถ่านกัมมันต์ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

K_L คือ ค่าคงที่การดูดซับแบบแลงเมียร์ (ลิตรต่อมิลลิกรัม)

K_F คือ ค่าคงที่การดูดซับแบบฟรุนดลิช (ลิตรต่อมิลลิกรัม)

N คือ ค่าแฟกเตอร์ความแตกต่างของพื้นผิวตัวดูดซับ (heterogeneity factor)

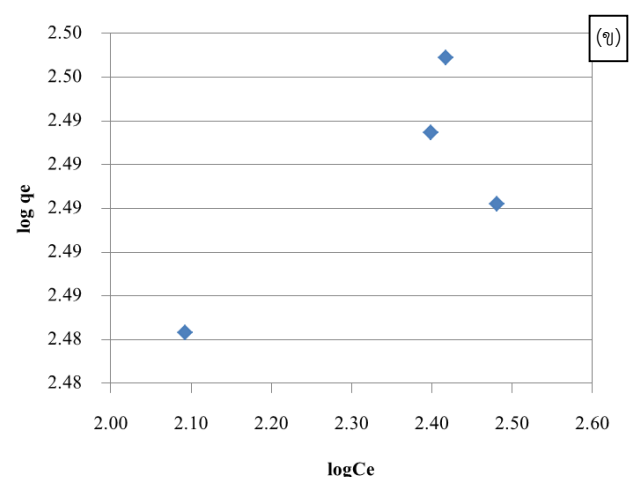
เมื่อนำข้อมูลไปพลอตกราฟระหว่าง C_e/q_e กับ C_e และกราฟระหว่าง $\log(q_e)$ กับ $\log(C_e)$ จะได้ดังรูปที่ 5 จากรูปพบว่าการดูดซับ MB สอดคล้องกับไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ ค่าสหสัมพันธ์ (R^2 , linear regression square) เท่ากับ 0.9993 โดยที่สามารถคำนวณค่า $q_{\max}$ ได้เท่ากับ 312.50 มิลลิกรัมต่อกรัม และค่า K_L เท่ากับ 0.31 ลิตรต่อมิลลิกรัม แสดงให้เห็นว่าการดูดซับของ MB บนถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้เป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayer adsorption)



4.4 วิเคราะห์ต้นทุนการผลิตถ่านกัมมันต์และเสนอแนวทางการนำไปใช้

จากการผลิตถ่านกัมมันต์จากกากบะปั่วด้วยภาวะต่าง ๆ ข้างต้น ผู้วิจัยได้คำนวณต้นทุนการผลิตโดยอ้างอิงจากภาวะที่ทำให้ได้พื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์สูงสุด คือ การคาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง และกระตุ้นที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เวลา 2 ชั่วโมงด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ โดยมีพื้นที่ผิว 1,147.74 ตารางเมตรต่อกรัม และนำไปเทียบกับถ่านกัมมันต์ทางการค้าเพื่อวิเคราะห์ความเป็นไปได้ในการแข่งขันเชิงธุรกิจ ผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 7

จากตารางจะเห็นว่าการผลิตถ่านกัมมันต์จากกากบะปั่วมีต้นทุนที่ต่ำกว่าถ่านกัมมันต์ทางการค้าโดยอ้างอิงจากยี่ห้อ Fluka (รหัส Honeywell Fluka 05120-1KG) ซึ่งมีการนำมาใช้ในหลายงานวิจัยเนื่องจากมีลักษณะการใช้งานที่ใกล้เคียงกัน จากการวิเคราะห์แสดงให้เห็นโอกาสในการลงทุนผลิต อย่างไรก็ตามการผลิตในเชิงพาณิชย์จำเป็นต้องมีการวิเคราะห์คุณภาพของถ่านกัมมันต์ในด้านอื่นให้ตรงตามมาตรฐาน มอก. 900-2547 ด้วย สำหรับการนำถ่านกัมมันต์ไปใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ นั้น สามารถนำไปใช้ในการดูดซับสีในกระบวนการผลิตสิ่งทอ การปรับปรุงคุณภาพน้ำ การดูดกลืน หรืออื่น ๆ ได้ตามความเหมาะสม



รูปที่ 6 : ไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ (ก) และไอโซเทอร์มแบบฟรุนดลิช (ข) ของการดูดซับสี ด้วยถ่านกัมมันต์จากกากบะปั่ว

ตารางที่ 6 : ร้อยละผลได้ของแข็ง (ก) และพื้นที่ผิว (ข) ของถ่านกัมมันต์จากกาบมะพร้าวที่ได้จากการกระตุ้นด้วย โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ กรดฟอสฟอริก และกรดซัลฟิวริก ที่สภาวะต่าง ๆ

สารเคมี	อุณหภูมิคาร์บอนไนซ์ (องศาเซลเซียส)	เวลา (ชั่วโมง)	(ก) ร้อยละผลได้ของแข็ง			(ข) พื้นที่ผิว (ตารางเมตรต่อกรัม)		
			อุณหภูมิกระตุ้น (องศาเซลเซียส)			อุณหภูมิกระตุ้น (องศาเซลเซียส)		
			200	200	400	200	400	600
KOH	500	1	100.00	61.00	17.82	1,147.74	483.27	45.70
	600	1	100.00	62.00	18.48	635.58	608.03	49.94
	600	2	100.00	60.00	11.27	555.18	406.60	32.16
H ₃ PO ₄	500	1	75.81	99.70	34.06	56.26	370.90	-ไม่ระบุ-
	600	1	84.80	100.00	30.38	26.85	316.01	-ไม่ระบุ-
	600	2	75.33	77.31	42.69	75.77	417.01	-ไม่ระบุ-
H ₂ SO ₄	500	1	89.41	40.74	13.28	46.53	287.31	-ไม่ระบุ-
	600	1	100.00	67.62	15.78	64.96	337.40	-ไม่ระบุ-
	600	2	100.00	66.37	27.42	71.00	289.17	-ไม่ระบุ-

ตารางที่ 7 : การประมาณราคาต้นทุนการผลิตถ่านกัมมันต์ 1 กิโลกรัมจากกาบมะพร้าว

รายการ	ราคาต่อหน่วย	หน่วย	จำนวนที่ใช้	หน่วย	ราคารวม (บาท)
กาบมะพร้าว	0	บาทต่อกิโลกรัม	3.5	กิโลกรัม	0
ค่าแรง	300	บาทต่อวันต่อคน	3	วันต่อคน (1คน)	900
โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์	600	บาทต่อกิโลกรัม	2	กิโลกรัม	1,200
กรดแอซิดิก	320	บาทต่อลิตร	1	ลิตร	320
น้ำ	0.02	บาทต่อกิโลกรัม	500	กิโลกรัม	10
ไฟฟ้า	4	บาทต่อหน่วย	90	หน่วย	360
ค่าขนส่ง	100	เหมาจ่ายต่อรอบ	1	รอบ	100
ราคารวม					2,890

หมายเหตุ: ภาวะในการผลิตคือ คาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง และกระตุ้นที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เวลา 2 ชั่วโมงด้วย โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เทียบกับราคาถ่านกัมมันต์จาก Fluka (Honeywell Fluka 05120-1KG) เป็นราคาประมาณ 4,745.90 บาท ข้อมูล ณ วันที่ 10 สิงหาคม 2564

5) สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการผลิตถ่านกัมมันต์จากวัสดุเหลือทิ้งจากกาบมะพร้าว โดยเริ่มต้นจากการนำชีวมวลมาผลิตถ่านชีวภาพ หลังจากนั้นเลือกภาวะที่เหมาะสมในการผลิตถ่านชีวภาพเพื่อนำถ่านชีวภาพที่ผลิตได้มากระตุ้นให้เป็นถ่านกัมมันต์ โดยใช้สารเคมีกระตุ้น 3 ชนิดได้แก่ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ กรดฟอสฟอริก และกรดซัลฟิวริก ผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

1. ภาวะที่ได้ร้อยละของแข็งสูงที่สุดสำหรับกาบมะพร้าวคือ เภาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง คิดเป็นร้อยละของแข็งเฉลี่ยเท่ากับ 35.39 ในขณะที่ถ่านชีวภาพที่ได้จากกาบมะพร้าวมีพื้นที่ผิวสูงสุดเมื่อเภาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง คิดเป็นค่าเฉลี่ย 104.75 ตารางเมตรต่อกรัม

และพบว่าทั้งอุณหภูมิและเวลามีผลต่อร้อยละผลได้ของแข็งและพื้นที่ผิวของถ่านชีวภาพอย่างมีนัยสำคัญ

2. เมื่อนำถ่านชีวภาพที่ผลิตจากภาวะที่แตกต่างกันมากระตุ้นเพื่อผลิตถ่านกัมมันต์ พบว่าการผลิตถ่านชีวภาพโดยใช้อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ทำให้ได้ถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวสูงที่สุด การใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์กระตุ้นที่อุณหภูมิต่ำเหมาะสมสำหรับการผลิตถ่านกัมมันต์มากกว่าการใช้กรดทั้งสองชนิด ซึ่งถ่านกัมมันต์จากกาบมะพร้าวที่เตรียมโดยการคาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง และกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เวลา 2 ชั่วโมง มีพื้นที่ผิว 1,147.74 ตารางเมตรต่อกรัม ซึ่งใช้ข้อมูล

ค่อนข้างต่ำในการผลิต ทำให้ประหยัดพลังงานในการผลิต ลดต้นทุนและความซับซ้อนของเตาเผาได้

3. การดูดซับ MB ของถ่านกัมมันต์จากกากมะพร้าวสอดคล้องกับไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์

4. จากการวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตถ่านกัมมันต์พบว่าต้นทุนการผลิตอยู่ที่ 2,890 บาทต่อ กิโลกรัม ซึ่งถูกกว่าราคาถ่านกัมมันต์ที่ขายเชิงพาณิชย์จึงมีความเป็นไปได้ในการลงทุน

จากสรุปผลการทดลองดังกล่าว งานวิจัยนี้ทำการทดลองใน muffle furnace ซึ่งเป็นระบบที่ไม่ซับซ้อน สามารถนำไปปรับใช้ในการออกแบบเตาเผาในระดับภาคสนามได้ โดยการออกแบบเตาเผาเพื่อผลิตถ่านชีวภาพที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง และผลิตถ่านกัมมันต์ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เวลา 2 ชั่วโมง ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตขึ้นสามารถนำไปใช้ในการดูดซับ MB และคาดว่าจะสามารถนำไปใช้ในการดูดซับมลพิษในน้ำเสียอื่นได้ สำหรับงานวิจัยที่มีความน่าสนใจในการดำเนินการต่อไป คือ การทำการทดลองเพื่อศึกษาผลของเวลาที่เหมาะสมในการดูดซับ MB สำหรับถ่านกัมมันต์ที่ภาวะต่าง ๆ การผลิตถ่านกัมมันต์ในช่วงอุณหภูมิต่ำ รวมถึงการศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับและการนำถ่านกัมมันต์ที่ใช้แล้วมาใช้ใหม่ เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์ในการดูดซับ MB เพิ่มขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยประจำปี 2563 จากเงินงบประมาณผลประโยชน์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก คณะผู้วิจัยขอขอบคุณผู้ประสานงานจากสถาบันวิจัยและพัฒนา และผู้ทรงคุณวุฒิที่ให้คำแนะนำในการดำเนินโครงการ ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ เขตพื้นที่อุเทนถวายที่ได้ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือและสถานที่ในการทำวิจัย รวมถึงบุคลากรสายสนับสนุนที่กรุณาช่วยเหลือด้านเอกสาร ขอขอบคุณผู้นำชุมชน ชาวบ้าน และบุคลากรที่เกี่ยวข้องในพื้นที่ชุมชนตะเคียนเตี้ย ตำบลตะเคียนเตี้ย อำเภอบางละมุง จังหวัดชลบุรีที่ให้ความอนุเคราะห์วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรในการนำมาใช้ในงานวิจัย ตลอดจนผู้เกี่ยวข้องที่ไม่ได้กล่าวนามทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือและสนับสนุนงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงได้

REFERENCES

- [1] Office of Agricultural Economics. "Mature coconut: Percentage and monthly yield including country, region and province in 2020." OAE.go.th. <https://www.oae.go.th/assets/portals/1/fileups/prcaidata/files/Coconut%20percent%2063.pdf> (accessed Aug. 23, 2020)
- [2] S. Tatayanon, T. Piriyaoytha, T. Boonyaem, and C. Osot, "Feasibility study on the simple production of activated carbon from biomass," Forest Research and Development Bureau, Bangkok, Thailand, 2017. [Online]. Available: <https://shorturl.asia/b3Jd0>
- [3] Medthai. "Activated charcoal." (in Thai), MEDTHAI.com. <https://shorturl.asia/VWlpM> (accessed Aug. 23, 2020)
- [4] J. Manaonok, S. Gonkhamdee, K. Dejbhimon, W. K. Polpinit, and D. Jothityangkoon, "Biochar: Its effect on soil properties and growth of wet-direct seeded rice (a pot trial)," (in Thai), *Khon Kaen Agr. J.*, vol. 45, no. 2, pp. 209–220, 2017.
- [5] X. Tan et al., "Biochar as potential sustainable precursors for activated carbon production: Multiple applications in environmental protection and energy storage," *Bioresour. Technol.*, vol. 227, pp. 359–372, Mar. 2017.
- [6] M. Dwiyaniti et al., "Extremely high surface area of activated carbon originated from sugarcane bagasse," in *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, vol. 909, no. 1, 2020, pp. 1–8.
- [7] M. S. Reza et al., "Preparation of activated carbon from biomass and its' applications in water and gas purification, a review," *Arab J. Basic Appl. Sci.*, vol. 27, no. 1, pp. 208–238, 2020.
- [8] Chulalongkorn University. "High quality smokeless charcoal briquettes and activated carbon products from agricultural waste by the learning and demonstration of solid fuel production center, Chulalongkorn University." (in Thai), CHULA.ac.th. <https://www.chula.ac.th/news/30933/> (accessed Aug. 23, 2020)
- [9] M. F. Nazzal, S. T. Ali, and I. A. Abdulwahab, "Removal of methylene blue dye from wastewater using activated carbon: A review," *Solid State Technol.*, vol. 63, no. 3, pp. 4290–4296, 2020.
- [10] S. Karagoz, T. Tay, S. Ucar, and M. Erdem, "Activated carbons from waste biomass by sulfuric acid activation and their use on methylene blue adsorption," *Bioresour. Technol.*, vol. 99, no. 14, pp. 6214–6222, Sep. 2008.



- [11] A. L. Ahmad, M. M. Loh, and J. A. Aziz, "Preparation and characterization of activated carbon from oil palm wood and its evaluation on Methylene blue adsorption," *Dyes and Pigments*, vol. 75, no. 2, pp. 263–272, 2007.
- [12] J. Sabseeree, "DOE: Central composite design," *For Quality*, (in Thai), no. 145, pp. 72–74, Nov. 2009.
- [13] Z. Guo *et al.*, "Activated carbons with well-developed microporosity prepared from Phragmites australis by potassium silicate activation," *J. Taiwan Inst. Chem. Eng.*, vol. 45, no. 5, pp. 2801–2804, Sep. 2014.
- [14] N. M. A. Lagtah, A. H. Al-Muhtaseb, M. N. M. Ahmad, and Y. Salameh, "Chemical and physical characteristics of optimal synthesised activated carbons from grass-derived sulfonated lignin versus commercial activated carbons," *Microporous Mesoporous Mater.*, vol. 225, pp. 504–514, May 2016.
- [15] C. R. Correa, T. Otto, and A. Kruse, "Influence of the biomass components on the pore formation of activated carbon," *Biomass and Bioenergy*, vol. 97, pp. 53–64, Feb. 2017.
- [16] S. Li, K. Han, J. Li, M. Li, and C. Lu, "Preparation and characterization of super activated carbon produced from gulfweed by KOH activation," *Microporous Mesoporous Mater.*, vol. 243, pp. 291–300, May 2017.
- [17] *Standard Test Method for Moisture Analysis of Particulate Wood Fuels*, ASTM E871-82(2006), Nov. 26, 2013. [Online], Available: <https://www.astm.org/e0871-82r06.html>
- [18] *Standard Test Method for Ash in Biomass*, ASTM E1755-01(2015), Aug. 13, 2020. [Online], Available: <https://www.astm.org/e1755-01r15.html>
- [19] *Standard Test Methods for Loss-On-Drying by Thermo gravimetry*, ASTM E1868-10(2021), Aug. 23, 2022. [Online]. Available: <https://www.astm.org/e1868-10r21.html>
- [20] N. Hegyesiab, R. T. Vadab, and B. Pukánszky, "Determination of the specific surface area of layered silicates by methylene blue adsorption: The role of structure, pH and layer charge," *Appl. Clay Sci.*, vol. 146, pp. 50–55, Sep. 2017.
- [21] A. Albalasmeh *et al.*, "Characterization and artificial neural networks modelling of methylene blue adsorption of biochar derived from agricultural residues: Effect of biomass type, pyrolysis temperature, particle size," *J. Saudi Chem. Soc.*, vol. 24, no. 11, pp. 811–823, Nov. 2020.
- [22] A. Tomczyk, Z. Sokołowska, and P. Boguta, "Biochar physicochemical properties: pyrolysis temperature and feedstock kind effects," *Rev. Environ. Sci. Biotechnol.*, vol. 19, pp.191–215, 2020.
- [23] S. Pap *et al.*, "Optimising production of a biochar made from conifer brash and investigation of its potential for phosphate and ammonia removal," *Ind. Crops. Prod.*, vol. 185, Oct. 2022.
- [24] M. Hu *et al.*, "Towards understanding the chemical reactions between KOH and oxygen-containing groups during KOH-catalyzed pyrolysis of biomass," *Energy*, vol. 245, Apr. 2022, Art no. 123286.
- [25] W. Chen *et al.*, "Insight into KOH activation mechanism during biomass pyrolysis: Chemical reactions between O-containing groups and KOH," *Appl. Energy*, vol. 278, Nov. 2020, Art. no. 1157303.
- [26] J. O. Amode, J. H. Santos, Z. Md. Alam, A. H. Mirza, and C. C. Mei, "Adsorption of methylene blue from aqueous solution using untreated and treated (Metroxylon spp.) waste adsorbent: equilibrium and kinetics studies," *Int. J. Ind. Chem.*, vol. 7, pp. 333–345, 2016.
- [27] L. Zhao *et al.*, "Roles of phosphoric acid in biochar formation: Synchronously improving carbon retention and sorption capacity," *J. Environ. Qual.*, vol. 46, no. 2, pp. 393–401, 2017.
- [28] Y. Li, X. Zhang, R. Yang, G. Li, and C. Hu, "The role of H₃PO₄ in the preparation of activated carbon from NaOH-treated rice husk residue," *RSC Adv.*, vol. 5, no. 41, pp. 32626–32636, 2015.
- [29] N. Yuan, H. Cai, T. Liu, Q. Huang, and X. Zhang, "Adsorptive removal of methylene blue from aqueous solution using coal fly ash-derived mesoporous silica material," *Adsorpt. Sci. Technol.*, vol. 37, no. 3-4, pp. 333–348, 2019.

การออกแบบและควบคุมสำหรับหุ่นยนต์ดูลยภาพด้วยตัวควบคุมพีดี และแอลคิวอาร์ โดยใช้โปรแกรม Simulink

กฤษนันท์ เจริญสุข¹ กมลวรรณ วงศ์วุฒิ² ดวงกมล อังอำนาจศิริ³ ครรชิต ภาวนานนท์^{4*}

¹สาขาวิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและการจัดการนวัตกรรม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน,
กรุงเทพมหานคร, ประเทศไทย

²สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี, เพชรบุรี, ประเทศไทย

^{3,4*}สาขาวิศวกรรมหุ่นยนต์และอิเล็กทรอนิกส์อัจฉริยะ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี,
เพชรบุรี, ประเทศไทย

*ผู้ประพันธ์บรรณกิจ อีเมล : analog_dir99@hotmail.com

รับต้นฉบับ: 14 พฤษภาคม 2565; รับบทความฉบับแก้ไข: 27 กรกฎาคม 2565; ตอรับบทความ: 19 กันยายน 2565

เผยแพร่ออนไลน์: 22 ธันวาคม 2565

บทคัดย่อ

บทความนี้มีจุดมุ่งหมายที่จะแสดงให้เห็นถึงหลักการออกแบบของหุ่นยนต์ดูลยภาพของตัวควบคุมแบบ พีดี และแอลคิวอาร์ ในการออกแบบนั้น หุ่นยนต์ใช้หลักการเคลื่อนไหวยแบบไดนามิกและกฎของนิวตัน แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของหุ่นยนต์ดูลยภาพ จะไม่เป็นแบบเส้นตรง ดังนั้น หุ่นยนต์ต้องแปลงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของหุ่นยนต์ดูลยภาพไม่เชิงเส้นให้เป็นแบบเชิงเส้น แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของหุ่นยนต์ดูลยภาพนำไปใช้กับการออกแบบตัวควบคุม ในการออกแบบตัวควบคุมหลักสำหรับหุ่นยนต์ ปรับสมมูล ผู้วิจัยได้เลือกตัวควบคุมทั้งสองเพราะง่ายต่อการปรับให้เหมาะสมกับระบบของหุ่นยนต์ทรงตัว โดยเลือกใช้ Simulink จำลองการเคลื่อนที่และทดลองตรรกะของตัวควบคุมเพื่อทำให้หุ่นยนต์ทรงตัวให้มีเสถียรภาพ โดยการจำลองระบบของหุ่นยนต์ทรงตัว ที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุม และเปรียบเทียบประสิทธิภาพของมุม และทรงตัวของหุ่นยนต์ เพื่อรักษาเสถียรภาพและขจัดสัญญาณรบกวนที่อาจเกิดขึ้นในระบบ ผลการทดสอบได้เปรียบเทียบค่าดัชนีสมรรถนะของระบบควบคุมหุ่นยนต์ดูลยภาพที่ใช้ตัวควบคุมทั้งสองแบบ การควบคุมระบบหุ่นยนต์ดูลยภาพจะใช้ตัวควบคุมในการรักษาเสถียรภาพของมุม และทรงตัวของหุ่นยนต์ดูลยภาพ จากผลการทดสอบ พบว่าในการรักษาเสถียรภาพของหุ่นยนต์ดูลยภาพโดยใช้ควบคุมแบบแอลคิวอาร์ให้การรักษาเสถียรภาพดีกว่าตัวควบคุมแบบพีดี

คำสำคัญ : หุ่นยนต์ดูลยภาพ อินเวอร์ทเพนดูลัม ตัวควบคุมแบบแอลคิวอาร์ ตัวควบคุมแบบพีดี ซิมูลิงค์

The Design and Control for the Balancing Robot with PD and LQR Controller Using Program Simulink

Kritchanan Charoensuk¹ Kamolwan Wongwut² Daungkamol Angamnuaaysiri³ Kanchit Pawanant^{4*}

¹*Department of Industrial Technology and Innovation Management, Faculty of Science and Technology,
Pathumwan Institute of Technology, Bangkok, Thailand*

²*Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering and Industrial Technology,
Phetchaburi Rajabhat University, Phetchaburi, Thailand*

^{3,4*}*Department of Robots and Smart Electronics Engineering, Faculty of Engineering and Industrial Technology,
Phetchaburi Rajabhat University, Phetchaburi, Thailand*

*Corresponding Author. E-mail address: analog_dir99@hotmail.com

Received: 14 May 2022; Revised: 27 July 2022; Accepted: 19 September 2022

Published online: 22 December 2022

Abstract

In this article, the purpose is to demonstrate PD and LQR balancing robot design principles. In that design, the robot uses the principle of dynamic movement and Newton's laws. The mathematical model of the balancing robot is not linear. Therefore the robot must convert the nonlinear balancing robot mathematical model to a linear one. A mathematical model of the balancing robot is applied to the controller design. In the design of the controller for balancing robots, the researchers chose both controllers because they were easy to adapt to the system of the balancing robot. The Simulink was used to simulate motion and experiment with the controller's logic to stabilize the robot by simulating the system of the robotic balance used in the design of the controller and comparing the efficiency of the robot's angle and balance to maintain stability and eliminate potential interference in the system. The examination results compared the performance index of the balancing robot control system using both controllers. The control of the balancing robot system uses a controller to stabilize the equilibrium robot's angle and balance. The test results showed that stabilizing the balancing robot using the LQR control furnishes better stabilization than the PD controller.

Keywords: Balancing robot, Inverted pendulum, LQR controller, PD controller, Simulink

1) บทนำ

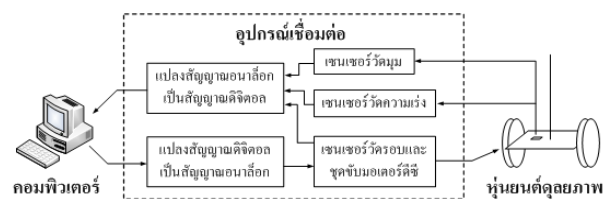
หุ่นยนต์ดุลยภาพ (balancing robot) เป็นอินเวอร์ทเพนดูลัม (invert pendulum) แบบหนึ่งที่มีคุณสมบัติไม่เป็นเชิงเส้นและไม่มีเสถียรภาพ การควบคุมหุ่นยนต์ดุลยภาพจำเป็นต้องเลือกตัวควบคุมที่เหมาะสมเพื่อรักษาเสถียรภาพของหุ่นยนต์ดุลยภาพควบคู่กับการปรับปรุงสมรรถนะของระบบควบคุมหุ่นยนต์ดุลยภาพ [1]–[4] ในการนำเสนอตัวควบคุมแบบพื้นฐานและการประยุกต์ใช้งานหลักของการออกแบบตัวควบคุมแบบ PID (proportional-integral-derivative) เป็นตัวควบคุมที่ถูกใช้งานกันอย่างแพร่หลาย ทั้งในงานอุตสาหกรรมและมีความเสถียรภาพและเป็นที่ยอมรับกันโดยทั่วไป ส่วนในงานการศึกษาที่มีการนำไปใช้งานกันอย่างแพร่หลาย บทความนี้จึงนำตัวควบคุมพื้นฐานมาใช้ในการควบคุมหุ่นยนต์ดุลยภาพ ซึ่งหุ่นยนต์ดุลยภาพนั้นมีความไม่เป็นเชิงเส้นและไม่มีเสถียรภาพดังที่กล่าวมาแล้ว [5] แต่เนื่องด้วยระบบของหุ่นยนต์ดุลยภาพในบทความนี้มีค่า Integral อยู่ภายในระบบอยู่แล้วจึงใช้แค่ตัวควบคุมแบบ PD controller ลักษณะของการควบคุมที่ผ่านมาในอดีตจะใช้ตัวควบคุมแบบ PD controller ที่เป็นแบบ Single-input และ Single-output ทำให้ง่ายต่อการออกแบบและการคำนวณหาค่าเกณฑ์ของตัวควบคุม

ในปัจจุบันตัวควบคุมนั้นมีความหลากหลายและมีความซับซ้อนในการออกแบบและการคำนวณมากขึ้นซึ่งส่งผลดีกับระบบมากยิ่งขึ้น บทความนี้จึงเลือกใช้ตัวควบคุมแบบ LQR controller โดยจะเป็นแบบ Multi-input และ Multi-output ส่งผลให้การออกแบบและการคำนวณหาค่าเกณฑ์ของตัวควบคุมมีความยากมากกว่าตัวควบคุมแบบ PD controller และนำความสามารถของโปรแกรม MATLAB มาใช้ในการออกแบบตัวควบคุมและหาค่า State-space ของหุ่นยนต์ดุลยภาพ เพื่อให้ง่ายต่อการศึกษาระบบและเข้าใจถึงหลักการของระบบควบคุม โดยในการออกแบบตัวควบคุม บทความนี้ได้ใช้โปรแกรม Simulink ในการออกแบบตัวควบคุมพื้นฐาน PD controller และที่สำคัญโปรแกรม Simulink ยังสามารถเชื่อมต่อกับบอร์ด Arduino MEGA 2560 แต่ต้องไปโหลด Add-Ons เพิ่ม Get Hardware Support Packages และไปที่ Arduino เมื่อติดตั้งเสร็จจะมีไลบรารีเพิ่มขึ้นมาบนโปรแกรม Simulink ดังนั้นจึงทำให้สามารถนำโปรแกรม Simulink ไปควบคุมหุ่นยนต์ดุลยภาพได้ จึงทำให้สะดวกต่อการออกแบบและแก้ไขตัวควบคุมบนโปรแกรม Simulink

อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดค่ามุมของหุ่นยนต์ดุลยภาพได้เลือกใช้ เซนเซอร์ MPU-6050 (gyroscope accelerometer) เป็นโมดูลวัดความเร่ง วัดได้ 3 แกน x, y, z โดยค่าของอัตราเร่งเชิงมุม (วัดได้โดย Accelerometer) และ อัตราเร็วเชิงมุม (วัดได้โดย Gyroscope) เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของเซนเซอร์ และเซนเซอร์มีการสื่อสารกับบอร์ด Arduino ในรูปแบบ I2C โดยจะส่งค่าสัญญาณป้อนกลับไปยังบอร์ดอาดูโนเพื่อทำการประมวลผล และบอร์ดที่ใช้ในการควบคุมมอเตอร์หรือเรียกว่า การควบคุมแบบ H-bridge Drive จะเป็นค่าเอาต์พุต ซึ่งสามารถควบคุมทิศทางและความเร็วโดยใช้สัญญาณควบคุมแบบ Pulse Width Modulation (PWM) ส่วนของค่าสัญญาณอินพุตหรือเรียกว่า Setpoint จะเป็นการติดตั้งเซนเซอร์ให้ขนานกับพื้น

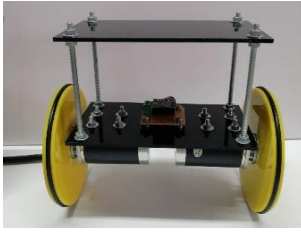
2) วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการวิจัย

การออกแบบหุ่นยนต์ดุลยภาพเพื่อใช้ในการศึกษาและทดลองเนื่องจากคุณสมบัติที่ไม่เป็นเชิงเส้นและไม่มีเสถียรภาพ โดยแบ่งออกเป็น 3 ส่วนคือ โครงสร้างหุ่นยนต์ดุลยภาพที่มีลักษณะแบบไม่เป็นเชิงเส้น บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ทำหน้าที่ในการเชื่อมต่อเซนเซอร์ที่ติดตั้งอยู่บนโครงสร้างหุ่นยนต์ดุลยภาพ และคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการประมวลผลสัญญาณและควบคุมการทำงานของระบบ (รูปที่ 1)

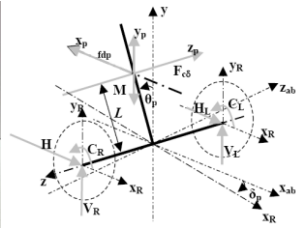


รูปที่ 1 : โครงสร้างระบบควบคุมหุ่นยนต์ดุลยภาพ

หุ่นยนต์ดุลยภาพประกอบด้วย อินเวอร์ทเพนดูลัม (โครงสร้าง) ล้อสองล้อ และมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง โดยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ทำหน้าที่รักษาสถิตของหุ่นยนต์ดุลยภาพและขับเคลื่อนหุ่นยนต์ดุลยภาพเพื่อรักษาสถิต [6]–[8] ล้อสองล้อ ทำหน้าที่เคลื่อนที่เพื่อรักษาสถิตของหุ่นยนต์ดุลยภาพ อินเวอร์ทเพนดูลัม ทำหน้าที่เปลี่ยนแปลงจุดสมดุลของหุ่นยนต์ดุลยภาพ [9] ซึ่งเป็นไปตามแผนภาพอิสระ และแบบจำลองหุ่นยนต์ดุลยภาพ ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 : แบบจำลองหุ่นยนต์คู่ลูกภาพ



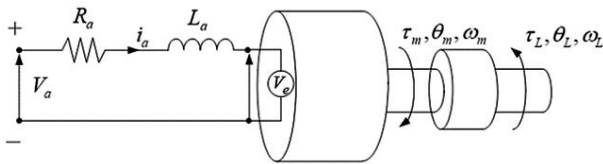
$$\tau_m = \tau_L + b_m \omega_m + I_m \ddot{\theta}_m \quad (4)$$

ค่าของสัมประสิทธิ์ความหนืด b_m มีค่าน้อยมากจึงสามารถประมาณ $b_m \approx 0$ นำสมการได้ สมการที่ 2 และนำสมการที่ 3 แทนค่าลงในสมการที่ 4 และพิจารณาค่าของสัมประสิทธิ์โมเมนต์ความเฉื่อยมอเตอร์ $I_m \ll \tau_L$ จึงส่งผลให้ $I_m \approx 0$ จะได้สมการที่ 5

$$\tau_L = \frac{K_m V_a - K_m K_e \dot{\theta}_m}{R_a} \quad (5)$$

2.1) โครงสร้างระบบขับเคลื่อน

ในการขับเคลื่อนหุ่นยนต์คู่ลูกภาพโดยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงสองตัว [9] แบบจำลองของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงสามารถพิจารณาดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 : แบบจำลองมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

แรงดันไฟฟ้าอาร์เมเจอร์ V_a เท่ากับผลรวมของแรงดันไฟฟ้าบนตัวต้านทานของอาร์เมเจอร์ R_a ความเหนี่ยวนำไฟฟ้าของอาร์เมเจอร์ L_a และแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ (back EMF) V_e ดังสมการที่ 1

$$V_a = i_a R_a + L_a \frac{d i_a}{dt} + V_e \quad (1)$$

เนื่องจากค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่อาร์เมเจอร์มีค่าน้อยมากจึงสามารถประมาณ $L_a \approx 0$ จากสมการที่ 2.1 สามารถเขียนสมการใหม่ได้เป็นสมการที่ 2

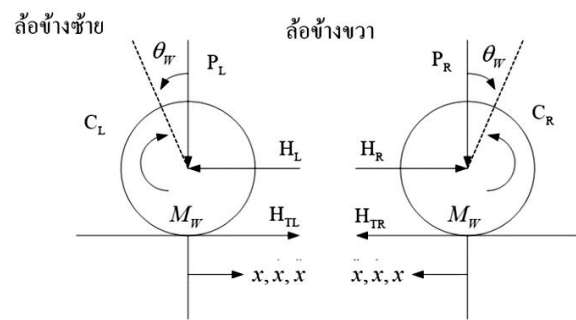
$$i_a = \frac{V_a - V_e}{R_a} \quad (2)$$

เมื่อมีกระแส i_a ที่อาร์เมเจอร์ มอเตอร์จะสร้างแรงบิด τ_m โดยจะแปรผันกับค่าของกระแส i_a ดังสมการที่ 3

$$\tau_m = K_m i_a \quad (3)$$

แรงบิดที่อาร์เมเจอร์จะมีค่าเท่ากับผลรวมของแรงบิด [10], [11] ที่เกิดจากความเสียดทานสถิต τ_L โดยแรงบิดที่เกิดจากความเสียดทานจลน์นั้น จะมีค่าสัมประสิทธิ์ความหนืด b_m ซึ่งเกิดขึ้นขณะที่เพลาหมุน และแรงบิดที่ทำให้อาร์เมเจอร์ซึ่งมีค่าโมเมนต์ความเฉื่อย I_m เกิดความเร่งเชิงมุม ดังสมการที่ 4

2.2) แบบจำลองล้อสองล้อของหุ่นยนต์คู่ลูกภาพ



รูปที่ 4 : แบบจำลองล้อสองล้อของหุ่นยนต์คู่ลูกภาพ

จากรูปที่ 4 มุมที่ล้อทั้งสองหมุน จะได้ผลรวมของแรงในแนวแกนนอน โดยมีโมเมนต์รวมรอบจุดศูนย์กลางของล้อแกนของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ต่ออยู่กับล้อของหุ่นยนต์คู่ลูกภาพ จะได้แรงที่ล้อของหุ่นยนต์คู่ลูกภาพ จากสมการที่ 5 เมื่อ $\theta_w = \theta_m$ สามารถเขียนสมการใหม่ได้ ดังสมการที่ 6

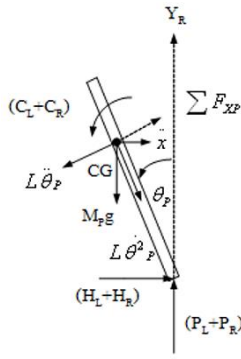
$$C_L = \tau_L = \frac{K_m V_a - K_m K_e \dot{\theta}_w}{R_a} \quad (6)$$

เนื่องจากโมเมนต์ล้อซ้ายและล้อขวามีค่าเท่ากัน ดังนั้นผลรวมโมเมนต์ล้อซ้ายและล้อขวา สามารถเขียนสมการใหม่ ดังสมการที่ 7

$$2 \left(M_w + \frac{I_w}{r^2} \right) \ddot{x} = - \frac{2 K_m K_e \dot{x}}{R_a r^2} + \frac{2 K_m V_a}{R_a r} - (H_L + H_R) \quad (7)$$

2.3) แบบจำลองอินเวอร์ทเพนดูลัม

ผลรวมของแรงที่ได้จากแบบจำลองของอินเวอร์ทเพนดูลัม ดังแสดงรูปที่ 5 ในแนวแกนนอนผลรวมของแรงในแนวตั้งฉากของอินเวอร์ทเพนดูลัม



รูปที่ 5 : แบบจำลองอินเวอร์ทเพนดูลัม

จากผลรวมของโมเมนต์ความเฉื่อยรอบจุดศูนย์กลางของอินเวอร์ทเพนดูลัมดังสมการที่ 8

$$I_p \ddot{\theta}_p = -(H_L + H_R)L \cos \theta_p - (P_L + P_R)L \sin \theta_p - (C_L + C_R) \quad (8)$$

ผลรวมของแรงที่ล้อของหุ่นยนต์ดูดยภาพ ดังสมการที่ 6 สามารถเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของการเคลื่อนที่แบบเชิงเส้น $\theta_w = \dot{x}/r$ จากนั้นแทนค่าลงในสมการที่ 8 สามารถเขียนสมการใหม่ได้ดังสมการที่ 9

$$-(H_L + H_R)L \cos \theta_p - (P_L + P_R)L \sin \theta_p = I_p \ddot{\theta}_p + \frac{2K_m V_a}{R_a r} - \frac{2K_m K_e \dot{x}}{R_a r} \quad (9)$$

และนำ -L คูณสมการทั้งสองข้าง และกำจัด $(H_L + H_R)$ ออกจากระบบพลวัตของมอเตอร์จะได้

$$\begin{aligned} & \left(2M_w + \frac{2I_w}{r^2} + M_p \right) \ddot{x} \\ & = -\frac{2K_m K_e \dot{x}}{R_a r^2} + \frac{2K_m V_a}{R_a r} - M_p L \ddot{\theta}_p \cos \theta_p + M_p L \dot{\theta}_p^2 \sin \theta_p \end{aligned} \quad (10)$$

2.4) การประมาณเชิงเส้น ณ จุดสมดุลล่าง

การประมาณค่าเชิงเส้นของสมการปริภูมิสถานะ โดยการประมาณให้ $\theta_p = \pi + \phi_p$ เมื่อ ϕ_p เป็นมุมขนาดเล็กมาก ที่อยู่ในแนวแกนตั้ง ดังนั้นจะได้สมการการเคลื่อนที่แบบเชิงเส้นจากสมการที่ 10

$$\ddot{\phi}_p = \frac{M_p L \ddot{x}}{\alpha} + \frac{2K_m K_e \dot{x}}{R_a r \alpha} - \frac{2K_m V_a}{R_a r \alpha} + \frac{M_p g L \phi_p}{\alpha} \quad (11)$$

$$\ddot{x} = \frac{2K_m V_a}{R_a r \beta} - \frac{2K_m K_e \dot{x}}{R_a r^2 \beta} + \frac{M_p L \ddot{\phi}_p}{\beta} \quad (12)$$

$$\text{เมื่อ } \alpha = I_p + M_p L^2, \quad \beta = 2M_w + \frac{2I_w}{r^2} + M_p$$

นำสมการที่ 11 แทนลงในสมการที่ 12 และนำสมการที่ 12 แทน

ลงในสมการที่ 11 จากนั้นนำสมการมาจัดเรียงกัน โดยทางพีชคณิตจะได้รูปแบบของปริภูมิสถานะเชิงเส้น (linear state space) $\dot{x} = Ax + Bu$ ดังสมการที่ 13

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \ddot{x} \\ \dot{\phi}_p \\ \ddot{\phi}_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & A_{22} & A_{23} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & A_{42} & A_{43} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \\ \phi_p \\ \dot{\phi}_p \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ B_{21} \\ 0 \\ B_{41} \end{bmatrix} V_a \quad (13)$$

$$\text{เมื่อ } A_{22} \text{ คือ } \left(\frac{M_p L}{\beta} \right) \left(\frac{2K_m K_e}{R_a r \alpha} \right) - \frac{2K_m K_e}{R_a r^2 \beta}$$

$$A_{23} \text{ คือ } \frac{(M_p L)^2 g}{\alpha \beta}$$

$$A_{42} \text{ คือ } \left(\frac{M_p L}{\alpha} \right) \left(-\frac{2K_m K_e}{R_a r^2 \beta} \right) + \frac{2K_m K_e}{R_a r \alpha}$$

$$A_{43} \text{ คือ } \frac{M_p L g}{\alpha}$$

$$B_{21} \text{ คือ } \left(\frac{M_p L}{\beta} \right) \left(-\frac{2K_m}{R_a r \alpha} \right) + \frac{2K_m}{R_a r \beta}$$

$$B_{41} \text{ คือ } \left(\frac{M_p L}{\alpha} \right) \left(\frac{2K_m}{R_a r \beta} \right) - \frac{2K_m}{R_a r \alpha}$$

$$u \text{ คือ } V_a$$

2.5) การประมาณเชิงเส้น ณ จุดสมดุลบน

การประมาณค่าเชิงเส้นของสมการปริภูมิสถานะ โดยการประมาณให้ เมื่อเป็นมุมขนาดเล็กมาก ที่อยู่ในแนวแกนตั้ง ดังนั้นจะได้สมการการเคลื่อนที่แบบเชิงเส้นจากสมการที่ 10

$$\ddot{\theta}_p = -\frac{M_p L \ddot{x}}{\alpha} + \frac{2K_m K_e \dot{x}}{R_a r \alpha} - \frac{2K_m V_a}{R_a r \alpha} - \frac{M_p g L \theta_p}{\alpha} \quad (14)$$

$$\ddot{x} = \frac{2K_m V_a}{R_a r \beta} - \frac{2K_m K_e \dot{x}}{R_a r^2 \beta} - \frac{M_p L \ddot{\theta}_p}{\beta} \quad (15)$$

$$\text{เมื่อ } \alpha = I_p + M_p L^2, \quad \beta = 2M_w + \frac{2I_w}{r^2} + M_p$$

นำสมการที่ 14 แทนลงในสมการที่ 15 และนำสมการที่ 15 แทนลงในสมการที่ 14 จากนั้นนำสมการมาจัดเรียงกัน โดยทางพีชคณิตจะได้รูปแบบของปริภูมิสถานะเชิงเส้น (linear state space) $\dot{x} = Ax + Bu$ ดังสมการที่ 16

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \ddot{x} \\ \dot{\theta}_p \\ \ddot{\theta}_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & A_{22} & A_{23} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & A_{42} & A_{43} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \\ \theta_p \\ \dot{\theta}_p \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ B_{21} \\ 0 \\ B_{41} \end{bmatrix} V_a \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \text{เมื่อ } A_{22} & \text{ คือ } \left(-\frac{M_p L}{\beta} \right) \left(\frac{2K_m K_e}{R_a r \alpha} \right) - \frac{2K_m K_e}{R_a r^2 \beta} \\ A_{23} & \text{ คือ } \frac{(M_p L)^2 g}{\alpha \beta} \\ A_{42} & \text{ คือ } \left(-\frac{M_p L}{\alpha} \right) \left(-\frac{2K_m K_e}{R_a r^2 \beta} \right) + \frac{2K_m K_e}{R_a r \alpha} \\ A_{43} & \text{ คือ } -\frac{M_p L g}{\alpha} \\ B_{21} & \text{ คือ } \left(-\frac{M_p L}{\beta} \right) \left(-\frac{2K_m}{R_a r \alpha} \right) + \frac{2K_m}{R_a r \beta} \\ B_{41} & \text{ คือ } \left(-\frac{M_p L}{\alpha} \right) \left(\frac{2K_m}{R_a r \beta} \right) - \frac{2K_m}{R_a r \alpha} \\ u & \text{ คือ } V_a \end{aligned}$$

2.6) ฟังก์ชันถ่ายโอนของหุ่นยนต์ดูลยภาพ

แบบจำลองเบื้องต้นของงานวิจัยนี้ สมมติให้ล้อของหุ่นยนต์ดูลยภาพไม่มีการสั่นไหว โดยจะพิจารณาโมเดลในการเคลื่อนที่ของอินเวอร์ทเพนดูลัมเป็นมุมขนาดเล็กมาก ในการชั่งน้ำหนักของหุ่นยนต์ดูลยภาพและวัดระยะระหว่างจุดหมุนกับจุดศูนย์กลางมวลของอินเวอร์ทเพนดูลัม และหาค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของหุ่นยนต์ดูลยภาพแล้ว สามารถรวบรวมค่าคงที่ของพารามิเตอร์ของหุ่นยนต์ดูลยภาพดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 : ค่าคงที่ของพารามิเตอร์ของหุ่นยนต์ดูลยภาพ

พารามิเตอร์	ค่าคงที่
แรงบิดคงที่ของมอเตอร์ (K_m)	0.3674 (N-m/A)
แรงดันไฟฟ้าย้อนกลับมอเตอร์ (K_e)	0.7661 (V-s/rad)
มวลของอินเวอร์ทเพนดูลัม (M_p)	1.5 (kg)
มวลของล้อ (M_w)	0.2 (kg)
ความต้านทานที่ขดลวดอาร์เมเจอร์ของมอเตอร์ (R_a)	14 (Ω)
รัศมีของล้อ (r)	0.06 (m)
ระยะระหว่างจุดหมุนกับศูนย์กลางมวลของอินเวอร์ทเพนดูลัม (L)	0.05 (m)
ความเร่งของแรงโน้มถ่วงของโลก (g)	9.81 (m/sec ²)
โมเมนต์ความเฉื่อยของล้อ (I_w)	0.00036 (kg-m ²)
โมเมนต์ความเฉื่อยของอินเวอร์ทเพนดูลัม (I_p)	0.003278 (kg-m ²)

การประมาณเชิงเส้นของหุ่นยนต์ดูลยภาพที่พิจารณา ณ ตำแหน่งจุดสมดุลบนนั้น มีวัตถุประสงค์เพื่อนำแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่ได้จากการประมาณเชิงเส้นไปใช้ออกแบบตัวควบคุมเสถียรภาพของหุ่นยนต์ดูลยภาพ จากนั้นแทนค่าพารามิเตอร์ที่

แสดงในตาราง 1 ลงในสมการที่ 16 ดังนั้นสามารถเขียนสมการใหม่ได้เป็นสมการที่ 17

$$\begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{\theta}_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -2.6304 & 2.9515 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 30.4676 & -82.6407 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \\ \theta_p \\ \dot{\theta}_p \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -3.0925 \\ 0 \\ 101.7638 \end{bmatrix} V_a \quad (17)$$

และ

$$y = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} [x \ \dot{x} \ \theta_p \ \dot{\theta}_p]^T \quad (18)$$

และมีฟังก์ชันถ่ายโอน (transfer function)

$$\frac{\theta_p(s)}{V_a(s)} = C(sI - A)^{-1}B + D \quad (19)$$

จากนั้นทำการหาค่าเมทริกซ์ผกผันที่แสดงในสมการที่ 20 ดังนี้

$$\det(sI - A) = \begin{vmatrix} s & -1 & 0 & 0 \\ 0 & s + 2.6304 & -2.9515 & 0 \\ 0 & 0 & s & -1 \\ 0 & -30.4676 & -82.6407 & s \end{vmatrix} \quad (20)$$

$$= s^4 + 2.6304s^3 - 82.64s^2 - 307.3s$$

เพราะฉะนั้นจะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนดังนี้

$$\frac{\theta_p(s)}{V_a(s)} = \frac{101.8s + 173.5}{s^3 + 2.63s^2 - 82.64s - 307.3} \quad (21)$$

ในการหาฟังก์ชันถ่ายโอนของตำแหน่งก็ทำในลักษณะเดียวกันกับการหาฟังก์ชันถ่ายโอนของมุม

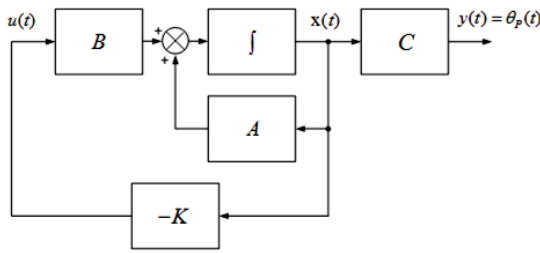
$$\frac{X(s)}{V_a(s)} = [1 \ 0 \ 0 \ 0] \left(\frac{1}{\det(sI - A)} \text{adj}(sI - A) \right) \begin{bmatrix} 0 \\ -3.0925 \\ 0 \\ 101.7638 \end{bmatrix} + [0]$$

$$\frac{X(s)}{V_a(s)} = \frac{-3.093s^2 + 555.9}{s^4 + 2.63s^3 - 82.64s^2 - 307.3s} \quad (22)$$

จากสมการที่ 17 กับสมการที่ 21 จะได้ปริภูมิสถานะของหุ่นยนต์ดูลยภาพและฟังก์ชันถ่ายโอนของหุ่นยนต์ดูลยภาพที่พิจารณา ณ ตำแหน่งจุดสมดุลบนเพื่อนำไปใช้ในการออกแบบตัวควบคุมเพื่อรักษาเสถียรภาพของหุ่นยนต์ดูลยภาพตามลำดับ

2.7) ทฤษฎีตัวควบคุมแบบแอลคิวอาร์

การควบคุมแบบแอลคิวอาร์เป็นวิธีการควบคุมที่อาศัยหลักการป้อนกลับของสัญญาณสถานะภายในระบบควบคุมหุ่นยนต์ดูลยภาพ [4] โดยในการคำนวณหาอัตราขยาย K ของสัญญาณควบคุม นั้น ดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 : โครงสร้างระบบควบคุมแบบแอลคิวอาร์

จะต้องออกแบบให้ค่าดัชนีสมรรถนะ (performance index) มีค่าน้อยที่สุด เมื่อ

$$J = \int_0^{\infty} (x^T Q x + u^T R u) dt \quad (23)$$

โดยเป็นเมทริกซ์สมมาตรที่เป็นค่ากึ่งบวกแน่นอน (positive-semi definite) ซึ่งเป็นเมทริกซ์ถ่วงน้ำหนักที่มีความสำคัญในการควบคุมตัวแปรสถานะในแต่ละตัว และเป็นเมทริกซ์สมมาตรที่เป็นบวกแน่นอน (positive-definite) และทำหน้าที่ถ่วงน้ำหนักสำหรับสัญญาณควบคุม และสัญญาณควบคุมนี้ถูกกำหนดให้ไม่มีข้อจำกัด (unconstraint) ในการพิจารณาแบบจำลองของตัวควบคุมแบบแอลคิวอาร์จะได้สมการดังนี้

$$\dot{x} = Ax + Bu \text{ และ } y = Cx \quad (24)$$

$$u = -Kx \quad (25)$$

นำสมการที่ 25 แทนลงในสมการที่ 23 และสามารถเขียนสมการใหม่ได้คือ

$$\dot{x} = Ax - BKx = (A - BK)x \quad (26)$$

กำหนดให้เมทริกซ์ $A - BK$ มีเสถียรภาพหรือมีค่าของผลลัพธ์ที่มีเครื่องหมายเป็นลบทั้งหมด เมื่อแทนค่า $u(t)$ ในสมการดัชนีสมรรถนะในสมการที่ 24 จะได้

$$J = \int_0^{\infty} (x^T Q x + x^T K^T R K x) dt \quad (27)$$

กำหนดให้

$$x^T (Q + K^T R K) x = -\frac{d}{dt} (x^T P x) \quad (28)$$

เมื่อ P เป็นเมทริกซ์สมมาตรกึ่งบวกแน่นอนเราจะได้

$$x^T (Q + K^T R K) x = x^T P x - x^T P \dot{x} = -x^T [(A - BK)^T P + P(A - BK)] x$$

ดังนั้น

$$(A - BK)^T P + P(A - BK) = -(Q + K^T R K) \quad (29)$$

เมื่อ $A - BK$ เป็นเมทริกซ์ที่มีเสถียรภาพ จะมี P เป็นเมทริกซ์สมมาตรบวกแน่นอนโดยสอดคล้องกับสมการที่ 29 และในกรณี

ที่ระบบมีเสถียรภาพแล้วสามารถหาค่า P ที่เป็นเมทริกซ์สมมาตรที่เป็นบวกแน่นอน ได้เพียงค่าเดียว ดังนั้นค่า P อื่น ที่ได้จากการแก้สมการที่ 29 จะไม่เป็นเมทริกซ์สมมาตรที่เป็นบวกแน่นอน จากดัชนีสมรรถนะจะได้

$$J = \int_0^{\infty} x^T (Q + K^T R K) x dt = -x^T(\infty) P x(\infty) + x^T(0) P x(0) \quad (30)$$

และเนื่องจากค่าเจาะจงของ $A - BK$ ถูกกำหนดให้เป็นลบทั้งหมดหรือ $x(\infty) \rightarrow 0$ ดังนั้นจะได้

$$J = x^T(0) P x(0) \quad (31)$$

แสดงว่าดัชนีสมรรถนะเป็นฟังก์ชันของค่าเริ่มต้น $x(0)$ และเมทริกซ์ P โดยกำหนดให้

$$R = T^T T \quad (32)$$

เมื่อ R เป็นเมทริกซ์สมมาตรที่เป็นบวกแน่นอน และ T ไม่เป็นเมทริกซ์หนึ่งหน่วย จากสมการที่ 30 สามารถเขียนได้ดังนี้

$$(A^T - K^T B^T) P + P(A - BK) + Q + K^T T^T T K = 0 \quad (33)$$

โดยพยายามทำให้ค่า J ต่ำที่สุดโดยการปรับค่า K หรือต้องการค่าต่ำที่สุดของ

$$x^T [TK - (T^T)^{-1} B^T P]^T [TK - (T^T)^{-1} B^T P] x \quad (34)$$

ซึ่งเป็นพจน์ที่มีค่าเป็นกึ่งบวกแน่นอนจึงมีค่าต่ำที่สุดคือศูนย์ ซึ่งจะเป็นเช่นนั้นเมื่อ

$$TK = (T^T)^{-1} B^T P \quad (35)$$

ดังนั้น

$$K = T^{-1} (T^T)^{-1} B^T P = R^{-1} B^T P \quad (36)$$

จากสมการที่ 36 เป็นสมการที่ให้ค่า K ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับระบบดังกล่าว ดังนั้นสามารถคำนวณหาสัญญาณควบคุมที่เหมาะสมที่สุดคือ

$$u(t) = -Kx(t) = -R^{-1} B^T P x(t) \quad (37)$$

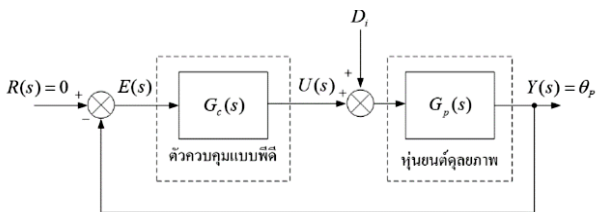
ซึ่งเมทริกซ์ P ในสมการที่ 37 ต้องสอดคล้องกับสมการที่ 29 หรือสามารถลดสมการลงได้คือ

$$A^T P + PA - P B R^{-1} B^T P + Q = 0 \quad (38)$$

ในการออกแบบตัวควบคุมจากสมการที่ 38 นั้น เป็นการหาค่าเมทริกซ์ P และเมื่อปรากฏค่า P ที่เป็นเมทริกซ์สมมาตรที่เป็นบวกแน่นอน แสดงได้ว่าระบบมีเสถียรภาพหรือเมทริกซ์ $A - BK$ มีเสถียรภาพและแทนค่าเมทริกซ์ P ในสมการที่ 36 เพื่อคำนวณหา K ที่เหมาะสมที่สุด

2.8) การออกแบบตัวควบคุมแบบพีดี

การออกแบบตัวควบคุมให้สามารถรักษาเสถียรภาพของหุ่นยนต์ดูลยภาพได้นั้น จะต้องทำการกำจัดสัญญาณรบกวน Di (disturbance) ของระบบควบคุม [12] โดยในบทนี้ได้นำเสนอตัวควบคุมพื้นฐานคือตัวควบคุมแบบพีดี โดยตัวควบคุมที่แบบจะทำหน้าที่รักษาสถิตของหุ่นยนต์ดูลยภาพให้มีเสถียรภาพ [13]–[15] ระบบควบคุมเพื่อรักษาสถิตของหุ่นยนต์ดูลยภาพให้มีเสถียรภาพโดยมีโครงสร้างของระบบควบคุมแบบพีดีในรูปที่ 7



รูปที่ 7 : โครงสร้างระบบควบคุมแบบพีดี

ในการรักษาเสถียรภาพของหุ่นยนต์ดูลยภาพ โดยใช้ตัวควบคุมแบบพีดีเป็นตัวป้อนกลับสัญญาณสถานะให้กับระบบ เพื่อรักษาสถิตของหุ่นยนต์ดูลยภาพด้วยวิธีการวางโพล โดยมีฟังก์ชันการถ่ายโอนของตัวควบคุมแบบพีดีดังนี้

$$G_c(s) = K_d s + K_p \quad (39)$$

จากฟังก์ชันการถ่ายโอนของหุ่นยนต์ดูลยภาพ ในสมการที่ 20 และสัมประสิทธิ์ของพหุนามคุณลักษณะของฟังก์ชันการถ่ายโอนคือ $a_0 = -307.3$, $a_1 = -82.64$ และ $a_2 = 2.63$ ดังนั้นในการหาค่าที่เหมาะสมในการป้อนกลับเพื่อให้ระบบมีเสถียรภาพนั้นจะทำการวางค่าโพลตัวใหม่เข้าไปในระบบเพื่อทำให้ระบบมีเสถียรภาพ โดยในการเลือกค่าโพลจะอ้างอิงจากวิธีลดลงด้วยอัตราหนึ่งในสี่ (quarterly-decay) โดยค่าโพลตัวใหม่มีค่าเท่ากับ $-2.2499 + 14.0737i$, $-2.2499 - 14.0737i$, -0.8787 ดังนั้นจากสมการที่ 39 จะได้ค่าสัมประสิทธิ์ค่า $P(s)$ คือ

$$s^3 + 2.63s^2 - 82.64s - 307.3 + [(K_d s + K_p) \cdot (101.8s + 173.5)] \quad (40)$$

เทียบสัมประสิทธิ์หาค่าของ K_p และ K_d จะได้

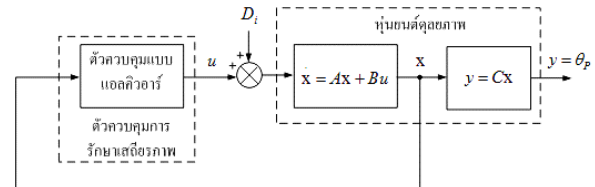
$$K_p = \frac{178.5 + 307.3}{173.5} = 2.8 \quad (41)$$

$$K_d = \frac{(5.3786 - 2.63)}{101.8} = 0.0270 \quad (42)$$

เพราะฉะนั้นจะได้ค่า $K_p = 2.8$ และ $K_d = 0.0270$

2.9) การออกแบบตัวควบคุมเสถียรภาพของหุ่นยนต์ดูลยภาพด้วยตัวควบคุมแบบแอลคิวอาร์

ระบบควบคุมเพื่อรักษาสถิตของหุ่นยนต์ดูลยภาพให้มีเสถียรภาพโดยมีโครงสร้างของระบบควบคุมแบบแอลคิวอาร์ในรูปที่ 8



รูปที่ 8 : โครงสร้างระบบควบคุมแบบแอลคิวอาร์

ในการรักษาเสถียรภาพของหุ่นยนต์ดูลยภาพ โดยใช้ตัวควบคุมแบบแอลคิวอาร์เป็นตัวป้อนกลับสัญญาณสถานะของระบบ เพื่อรักษาสถิตของหุ่นยนต์ดูลยภาพ

ดังนั้นในการหาค่าที่เหมาะสม [14], [15] ในการป้อนกลับเพื่อให้ระบบมีเสถียรภาพนั้นจะต้องทำให้ค่าดัชนีสมรรถนะในสมการที่ 23 นั้นมีค่าน้อยที่สุด ดังแสดง คือ

$$J = \int_0^\infty (x^T Q x + u^T R u) dt$$

และกำหนดให้เมทริกซ์ $R = [0.1]$ และเมทริกซ์

$$Q = \begin{bmatrix} 0.001 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.0001 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 19.9671 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.069975 \end{bmatrix}$$

เมื่อแทนค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของหุ่นยนต์ดูลยภาพดังแสดงอยู่ใน

รูปของปริภูมิสถานะ คือ $\dot{x} = Ax + Bu$ โดยสมการหุ่นยนต์ดูลยภาพที่พิจารณาจะได้เมทริกซ์ A คือ เมทริกซ์ระบบ และเมทริกซ์ B คือ เมทริกซ์อินพุต ตามลำดับดังนี้

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -2.6304 & 2.9515 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 30.4676 & 82.6407 & 0 \end{bmatrix}$$

และ

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ -3.0925 \\ 0 \\ 101.7638 \end{bmatrix}$$

จากนั้นสามารถหาค่าของเมทริกซ์ P จากสมการที่ 38

$$A^T P + PA - PBR^{-1}B^T P + Q = 0$$

$$P = \begin{bmatrix} 0.0451 & 0.0260 & 0.0100 & 0.0009 \\ 0.0260 & 0.0177 & 0.0088 & 0.0009 \\ 0.0100 & 0.0088 & 1.4137 & 0.0150 \\ 0.0009 & 0.0009 & 0.0150 & 0.0010 \end{bmatrix}$$

จะได้อัตราขยายของระบบคือ

$$K = R^{-1}B^TP$$

$$= [0.1000 \quad 0.3811 \quad 15.0000 \quad 1.0000]$$

จะได้สัญญาณควบคุมคือ

$$u(t) = -Kx = -R^{-1}B^TPx$$

$$u = [-0.1000 \quad -0.3811 \quad -15.0000 \quad -1.0000] \begin{bmatrix} x & \dot{x} & \theta_p & \dot{\theta}_p \end{bmatrix}^T$$

ดังนั้นสมการคุณลักษณะตัวควบคุมแบบแอลคิวอาร์ระบบควบคุมหุ่นยนต์ดูลยภาพคือ

$$|sI - A + BK| = s^4 + 103.2s^3 + 1617s^2 + 2506s + 55.59 = 0$$

โดยค่าโพลตัวใหม่มีค่าเท่ากับ -84.40166, -17.0680, -1.7145 และ -0.00225 ตามลำดับ ในการรักษาเสถียรภาพของหุ่นยนต์ดูลยภาพ สามารถสรุปผลการออกแบบได้ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 : ผลการออกแบบตัวควบคุม

ตัวควบคุมเสถียรภาพของหุ่นยนต์ดูลยภาพพีดี		ตัวควบคุมเสถียรภาพของหุ่นยนต์ดูลยภาพแอลคิวอาร์			
K_p	K_d	k_1	k_2	k_3	k_4
2.800	0.0270	0.1000	0.3811	15.0000	1.0000

ตัวควบคุมที่ได้ออกแบบไว้แล้วนี้ จะนำไปควบคุมหุ่นยนต์ดูลยภาพเพื่อศึกษาถึงผลของการควบคุม โดยจะศึกษาทั้งผลที่ได้จากการจำลองระบบด้วยโปรแกรมแมตแล็บและผลการทดลองที่นำไปใช้ควบคุมระบบจริง

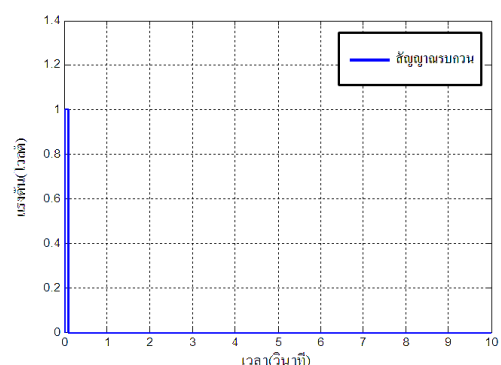
3) ผลการวิจัยและอภิปรายผล

การจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ของหุ่นยนต์ดูลยภาพ โดยแบบจำลองคณิตศาสตร์ในหัวข้อที่ 2 และกล่าวถึงการทดลองการทำงานของตัวควบคุม เพื่อใช้ในการรักษาเสถียรภาพของหุ่นยนต์ดูลยภาพที่ได้ออกแบบไว้ในหัวข้อที่ 2 ซึ่งในการทดลองนี้จะแบ่งออกเป็นหกส่วนดังนี้ ส่วนที่หนึ่ง เป็นการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ของหุ่นยนต์ดูลยภาพ ส่วนที่สอง เป็นการจำลองและการทดลองตัวควบคุมแบบพีดีที่ใช้ในการควบคุมหุ่นยนต์ดูลยภาพ ต่อมาในส่วนที่ สามและสี่ เป็นการนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาเปรียบเทียบกับผลการทดลองจากโครงสร้างจริง

โดยวัดค่ามุม และตำแหน่งในการทดลอง ส่วนที่ห้าจะนำตัวควบคุมทั้ง พีดี และแอลคิวอาร์ เพื่อหาการรักษาเสถียรภาพของหุ่นยนต์ดูลยภาพ ณ จุดสมดุลบนโดยใช้ตัวควบคุมแบบพีดีและตัวควบคุมแบบแอลคิวอาร์ ที่ได้จากการทดลองกับโครงสร้างจริงของหุ่นยนต์ดูลยภาพ โดยนำตัวควบคุมแบบพีดีและตัวควบคุมแบบแอลคิวอาร์ที่ใช้ในการรักษาเสถียรภาพของหุ่นยนต์ดูลยภาพให้อยู่ที่ตำแหน่งสมดุล และสุดท้ายเพื่อเป็นแสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมทั้งสองมีความแตกต่างกัน โดยค่าที่ได้จากทดลองจากโครงสร้างจริงกับค่าที่ได้จากแบบจำลองมาเปรียบเทียบโดยใช้อินทิเกรทเออเรอสแควร์ (ISE : integral of the square of the error) โดยทั้งหกส่วนจะถูกอธิบายให้หัวข้อถัดไป

3.1) การจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ของหุ่นยนต์ดูลยภาพ

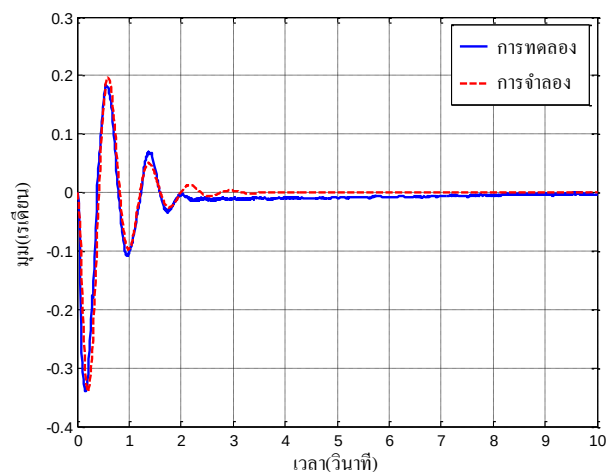
การจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ของหุ่นยนต์ดูลยภาพพิจารณา ณ ตำแหน่งจุดสมดุลล่างของระบบควบคุมหุ่นยนต์ดูลยภาพ เพื่อหาค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของอินเวอร์ทเพนดูลัม (I_p) โดยทำการปรับเปลี่ยนค่าโดยอ้างอิงแนวโน้มจากการวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์วารสารวิชาการ และเอกสารสืบเนื่องในระดับนานาชาติ [13]–[16] และใช้สัญญาณแบบพัลส์ เป็นสัญญาณรบกวนที่ใส่เข้าไปในระบบควบคุมหุ่นยนต์ดูลยภาพ โดยมีขนาดของสัญญาณดังนี้ ความสูงของสัญญาณเท่ากับ 1 โวลต์ ความกว้างของสัญญาณเท่ากับ 0.1 วินาที และเวลาที่ใช้ในการทดสอบระบบควบคุมหุ่นยนต์ดูลยภาพเท่ากับ 10 วินาที [16] เพื่อหาผลตอบสนองวงเปิดการแกว่งอินเวอร์ทเพนดูลัมที่ทดลองกับโครงสร้างจริงและแบบจำลองคณิตศาสตร์ จากนั้นนำมาเปรียบเทียบเพื่อสร้างแบบจำลองคอมพิวเตอร์ของหุ่นยนต์ดูลยภาพตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 9 และรูปที่ 10



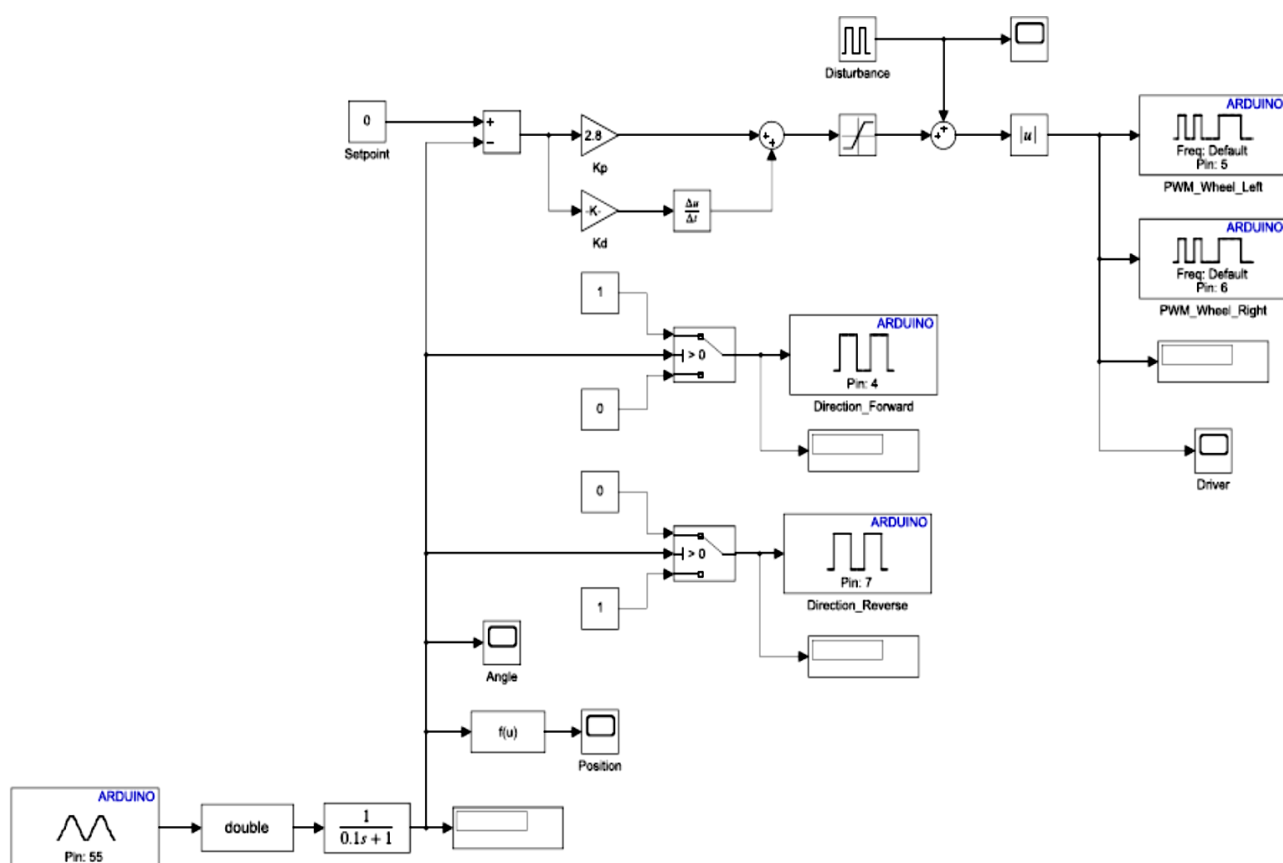
รูปที่ 9 : สัญญาณรบกวนแบบพัลส์

3.2) การจำลองและการทดลองตัวควบคุมแบบพีดีที่ใช้ในการควบคุมหุ่นยนต์ดูลายภาพ

ในหัวข้อนี้จะเป็นการจำลองการควบคุมเพื่อรักษาเสถียรภาพของหุ่นยนต์ดูลายภาพ ณ จุดสมดุลบนโดยใช้ตัวควบคุมแบบพีดีที่ได้จากการออกแบบและทดลองกับแบบจำลองคณิตศาสตร์ของหุ่นยนต์ดูลายภาพ และทดลองกับโครงสร้างจริงของหุ่นยนต์ดูลายภาพตามลำดับ การจำลองทางคอมพิวเตอร์และการควบคุมกับโครงสร้างจริงเพื่อรักษาเสถียรภาพของหุ่นยนต์ดูลายภาพนั้น ในบทนี้จะใส่สัญญาณรบกวนแบบพัลส์เข้าไปในระบบควบคุมหุ่นยนต์ดูลายภาพเพื่อให้ระบบควบคุมหุ่นยนต์ดูลายภาพไม่มีเสถียรภาพ ดังบล็อกไดอะแกรมที่แสดงในรูปที่ 11 และสัญญาณรบกวนดังแสดงในรูปที่ 10 จึงส่งผลให้ระบบควบคุมหุ่นยนต์ดูลายภาพที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีดีในการรักษาเสถียรภาพของหุ่นยนต์ดูลายภาพให้อยู่ที่ตำแหน่งสมดุลนั้น [17] แสดงในรูปที่ 10

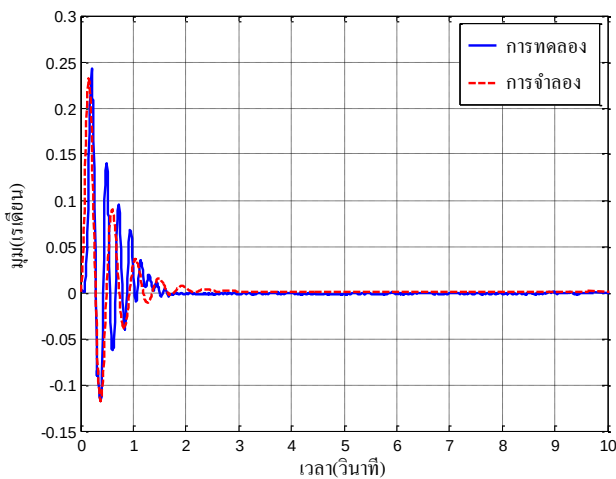


รูปที่ 10 : การเปรียบเทียบผลตอบสนองวงเปิด

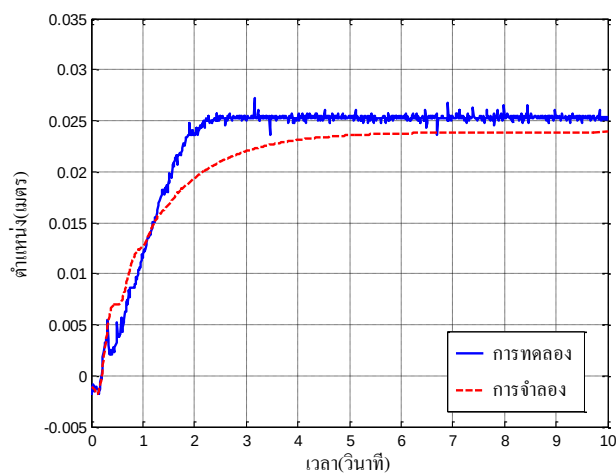


รูปที่ 11 : ระบบควบคุมแบบพีดีด้วยโปรแกรม (Simulink)

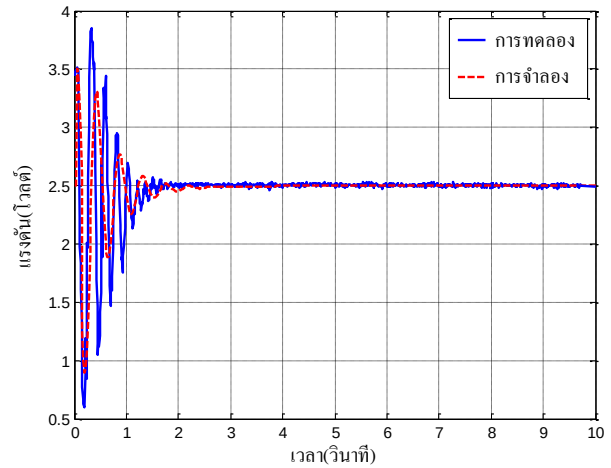
จากการจำลองและการควบคุมระบบควบคุมหุ่นยนต์ดูดยภาพในบทนี้ จะทำการเปรียบเทียบตัวควบคุมแบบพีดีที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์ของหุ่นยนต์ดูดยภาพ และตัวควบคุมแบบพีดีที่ได้จากการทดลองกับโครงสร้างจริงของหุ่นยนต์ดูดยภาพ [18] โดยเริ่มจากค่ามุมของอินเวอร์ทเพนดูลัมดังแสดงในรูปที่ 12 และตำแหน่งของหุ่นยนต์ดูดยภาพดังแสดงในรูปที่ 13 และสัญญาณควบคุมที่ใช้ในการรักษาเสถียรภาพของหุ่นยนต์ดูดยภาพดังแสดงในรูปที่ 14



รูปที่ 12 : การเปรียบเทียบมุมของตัวควบคุมแบบพีดี



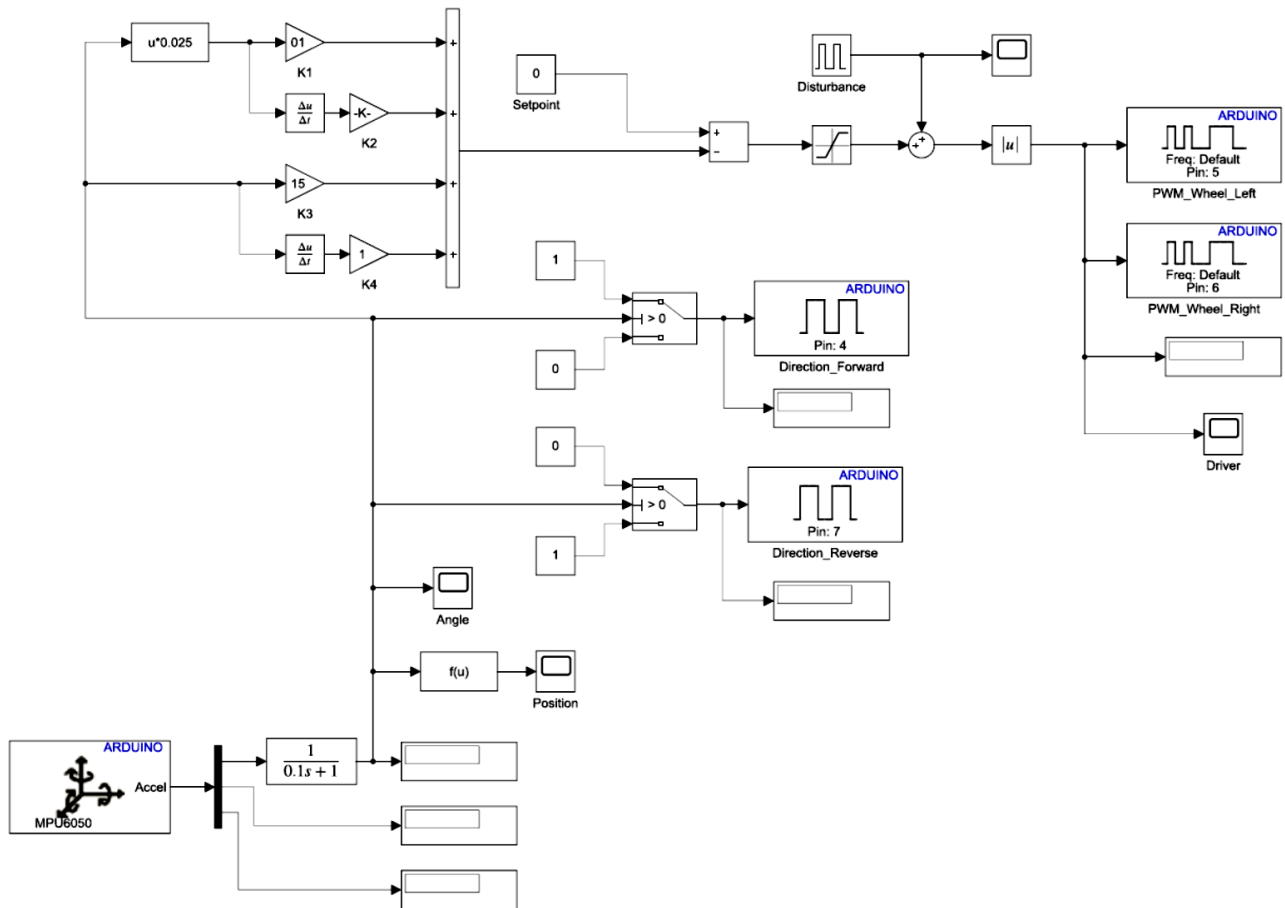
รูปที่ 13 : การเปรียบเทียบตำแหน่งของตัวควบคุมแบบพีดี



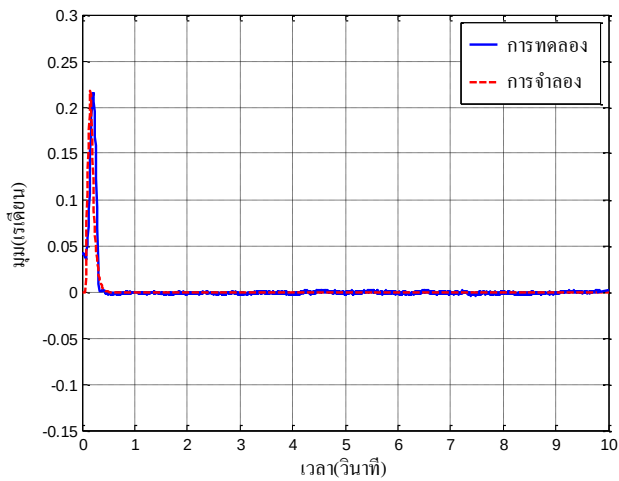
รูปที่ 14 : สัญญาณควบคุมของตัวควบคุมแบบพีดี

3.3) การจำลองและการทดลองตัวควบคุมแบบแอลคิวอาร์ที่ใช้ในการควบคุมหุ่นยนต์ดูดยภาพ

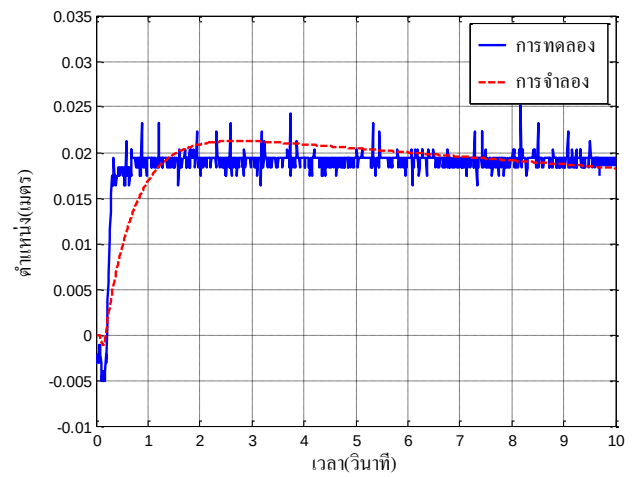
การจำลองการควบคุมเพื่อรักษาเสถียรภาพของหุ่นยนต์ดูดยภาพ ณ จุดสมดุลโดยใช้ตัวควบคุมแบบแอลคิวอาร์ที่ได้จากการออกแบบและทดลองกับแบบจำลองคณิตศาสตร์ของหุ่นยนต์ดูดยภาพ และทดลองกับโครงสร้างจริงของหุ่นยนต์ดูดยภาพตามลำดับ การจำลองทางคอมพิวเตอร์และการควบคุมกับโครงสร้างจริงเพื่อรักษาเสถียรภาพของหุ่นยนต์ดูดยภาพนั้น ในบทนี้จะใส่สัญญาณรบกวนแบบพัลส์เข้าไปในระบบควบคุมหุ่นยนต์ดูดยภาพเพื่อให้ระบบควบคุมหุ่นยนต์ดูดยภาพไม่มีเสถียรภาพ ดังบล็อกไดอะแกรมที่แสดงในรูปที่ 15 และสัญญาณรบกวนดังแสดงในรูปที่ 9 จึงส่งผลให้ระบบควบคุมหุ่นยนต์ดูดยภาพที่ใช้ตัวควบคุมแบบแอลคิวอาร์ในการรักษาเสถียรภาพของหุ่นยนต์ดูดยภาพให้อยู่ที่ตำแหน่งสมดุลนั้น เกิดการแกว่งของอินเวอร์ทเพนดูลัมและตำแหน่งของหุ่นยนต์ดูดยภาพ และสัญญาณควบคุมที่ใช้ในการรักษาเสถียรภาพของหุ่นยนต์ดูดยภาพ จากการจำลองและการควบคุมระบบควบคุมหุ่นยนต์ดูดยภาพในบทนี้ จะทำการเปรียบเทียบตัวควบคุมแบบแอลคิวอาร์ ที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์ของหุ่นยนต์ดูดยภาพ และตัวควบคุมแบบแอลคิวอาร์ ที่ได้จากการทดลองกับโครงสร้างจริงของหุ่นยนต์ดูดยภาพ โดยเริ่มจากค่ามุมของอินเวอร์ทเพนดูลัมดังแสดงในรูปที่ 16 และตำแหน่งของหุ่นยนต์ดูดยภาพดังแสดงในรูปที่ 17 และสัญญาณควบคุมที่ใช้ในการรักษาเสถียรภาพของหุ่นยนต์ดูดยภาพดังแสดงในรูปที่ 18 ตามลำดับดังนี้



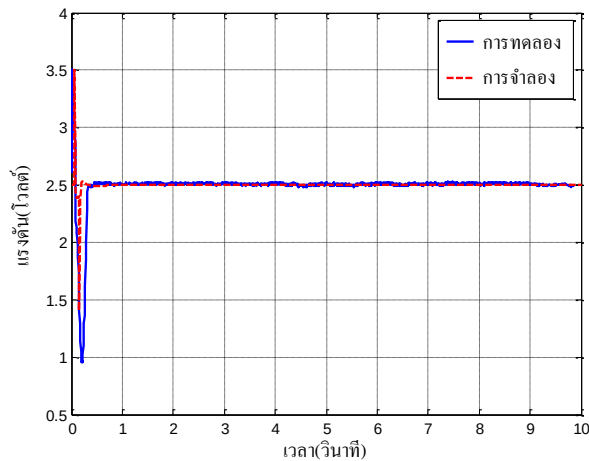
รูปที่ 15 : ระบบควบคุมแบบแอลคิวอาร์ด้วยโปรแกรม (Simulink)



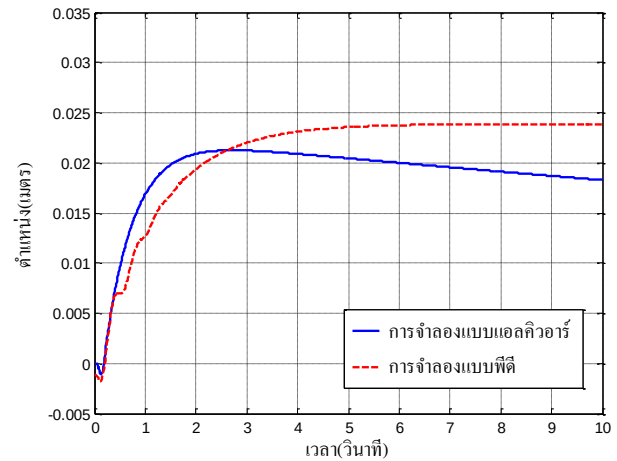
รูปที่ 16 : การเปรียบเทียบมุมของตัวควบคุมแบบแอลคิวอาร์



รูปที่ 17 : การเปรียบเทียบตำแหน่งของตัวควบคุมแบบแอลคิวอาร์



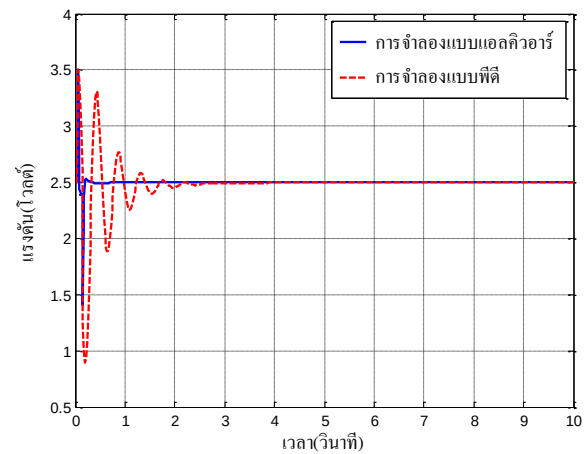
รูปที่ 18 : การเปรียบเทียบสัญญาณควบคุมของตัวควบคุมแบบแอลคิวนาร์



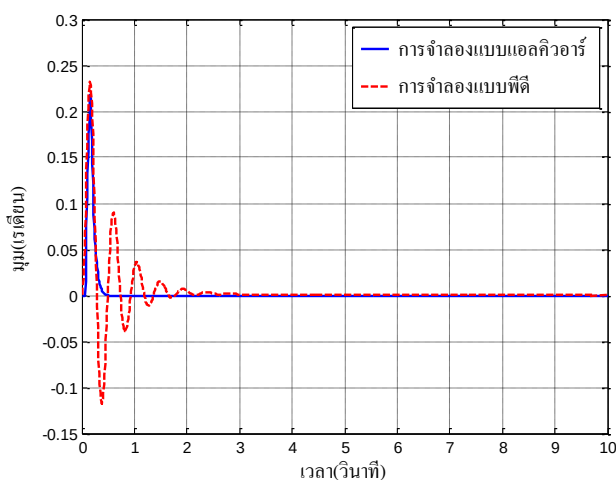
รูปที่ 20 : การเปรียบเทียบตำแหน่งของตัวควบคุมทั้งสองแบบที่ได้จากการจำลอง

3.4) การเปรียบเทียบตัวควบคุมแบบพีดีและตัวควบคุม แบบแอลคิวนาร์ที่ใช้กับการจำลองของหุ่นยนต์ดูลยภาพ

ภาพการจำลองการควบคุมเพื่อรักษาเสถียรภาพของหุ่นยนต์ดูลยภาพ ณ จุดสมดุลบนโดยใช้ตัวควบคุมแบบพีดีและตัวควบคุมแบบแอลคิวนาร์ ที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์ของหุ่นยนต์ดูลยภาพ การจำลองทางคอมพิวเตอร์ที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์ของหุ่นยนต์ดูลยภาพ โดยนำตัวควบคุมแบบพีดีและตัวควบคุมแบบแอลคิวนาร์ที่ใช้ในการรักษาเสถียรภาพของหุ่นยนต์ดูลยภาพให้อยู่ที่ตำแหน่งสมดุล มาทำการเปรียบเทียบการแกว่งของอินเวอร์ทเพนดูลัมดังแสดงในรูปที่ 19 และตำแหน่งของหุ่นยนต์ดูลยภาพดังแสดงในรูปที่ 20 และสัญญาณควบคุมที่ใช้ในการรักษาเสถียรภาพของหุ่นยนต์ดูลยภาพดังแสดงในรูปที่ 21 ตามลำดับดังนี้



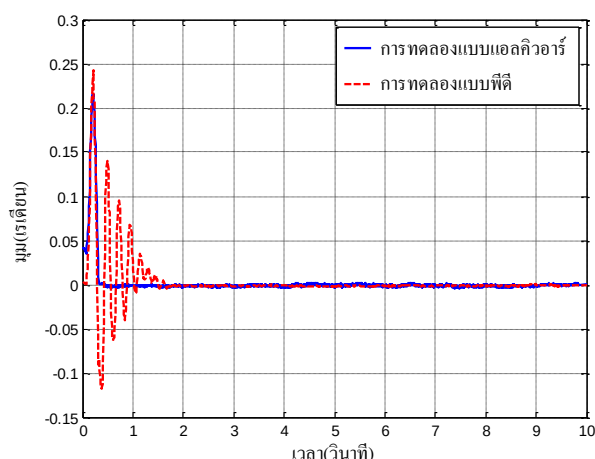
รูปที่ 21 : การเปรียบเทียบสัญญาณควบคุมของตัวควบคุมทั้งสองแบบที่ได้จากการจำลอง



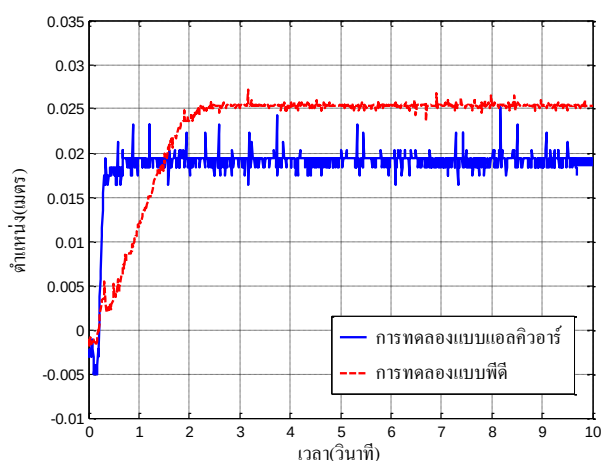
รูปที่ 19 : การเปรียบเทียบมุมของตัวควบคุมทั้งสองแบบที่ได้จากการจำลอง

3.5) การเปรียบเทียบตัวควบคุมแบบพีดีและตัวควบคุมแบบแอลคิวนาร์ที่ใช้กับการทดลองของหุ่นยนต์ดูลยภาพ

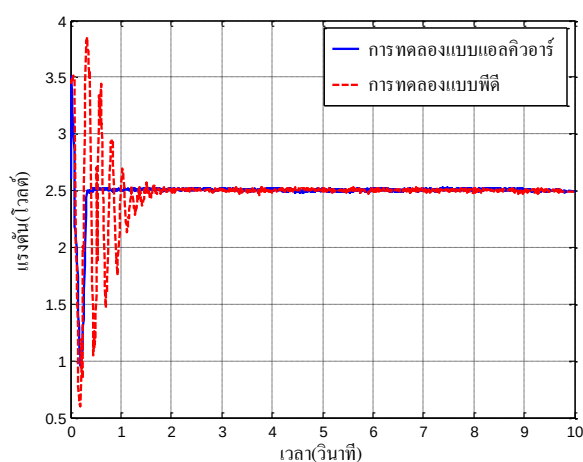
การทดลองการควบคุมเพื่อรักษาเสถียรภาพของหุ่นยนต์ดูลยภาพ ณ จุดสมดุลบนโดยใช้ตัวควบคุมแบบพีดีและตัวควบคุมแบบแอลคิวนาร์ ที่ได้จากการทดลองกับโครงสร้างจริงของหุ่นยนต์ดูลยภาพการทดลองกับโครงสร้างจริงของหุ่นยนต์ดูลยภาพ โดยนำตัวควบคุมแบบพีดีและตัวควบคุมแบบแอลคิวนาร์ที่ใช้ในการรักษาเสถียรภาพของหุ่นยนต์ดูลยภาพให้อยู่ที่ตำแหน่งสมดุล มาทำการเปรียบเทียบการแกว่งของอินเวอร์ทเพนดูลัมดังแสดงในรูปที่ 21 และตำแหน่งของหุ่นยนต์ดูลยภาพดังแสดงในรูปที่ 22 และสัญญาณควบคุมที่ใช้ในการรักษาเสถียรภาพของหุ่นยนต์ดูลยภาพดังแสดงในรูปที่ 23 ตามลำดับดังนี้



รูปที่ 22 : การเปรียบเทียบมุมของตัวควบคุมทั้งสองแบบที่ได้จากการทดลอง



รูปที่ 23 : การเปรียบเทียบตำแหน่งของตัวควบคุมทั้งสองแบบที่ได้จากการทดลอง



รูปที่ 24 : การเปรียบเทียบสัญญาณควบคุมของตัวควบคุมทั้งสองแบบที่ได้จากการทดลอง

3.6) การเปรียบเทียบค่าดัชนีสมรรถนะ

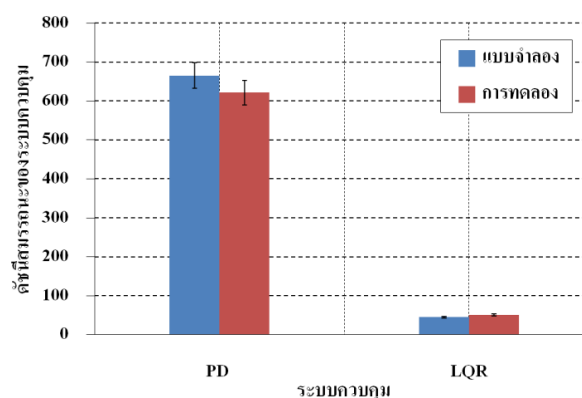
จากผลการทดลองในรูปที่ 18 ที่ได้จากการจำลองและรูปที่ 21 ที่ได้จากการทดลองจะเห็นว่า ตัวควบคุมแบบแอลคิวอาร์สามารถที่จะควบคุมหุ่นยนต์ดูดยภาพให้มีเสถียรภาพได้ตามแบบที่ต้องการและยังมีประสิทธิภาพในการเข้าสู่จุดสมดุลได้เร็วกว่าตัวควบคุมแบบพีดีการทดสอบหาค่าดัชนีสมรรถนะ (performance index) ของระบบควบคุมหุ่นยนต์ดูดยภาพในงานวิจัยฉบับนี้เลือกใช้ อินทิเกรทเออเรอสแควร์ ดังสมการที่ 43

$$ISE = \int_0^{\infty} e^2(t) dt \quad (43)$$

ในการวัดสมรรถนะของระบบควบคุมแบบพีดีและระบบควบคุมแบบแอลคิวอาร์มีค่าความละเอียดที่ใช้ในการสุ่มจำนวนห้าร้อยค่าดังนี้ สามารถสรุปค่าได้ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 : ผลการออกแบบตัวควบคุม

กรณีศึกษา	ดัชนีสมรรถนะของระบบควบคุม	
	แบบพีดี	แบบแอลคิวอาร์
การจำลอง	665.1601	45.0976
การทดลอง	621.2751	50.8856



รูปที่ 25 : ดัชนีสมรรถนะของระบบควบคุมของตัวควบคุมทั้งสองแบบที่ได้จากการทดลองและแบบจำลอง

เมื่อนำค่าที่ได้มาแสดงลงบนแผ่นภูมิแท่งดังแสดงในรูปที่ 25 เพื่อเปรียบเทียบดัชนีสมรรถนะของระบบควบคุมของตัวควบคุมทั้งสองแบบที่ได้จากการทดลองและแบบจำลอง ผู้วิจัยได้เลือกระบบความคลาดเคลื่อนที่ระดับนัยสำคัญ 0.95 นั้นทำให้เห็นว่า ผลแบบจำลองและจากการทดลองมีผลใกล้เคียงกันในระดับนัยสำคัญที่ใช้เปรียบเทียบ และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างตัวควบคุมทั้งสอง แสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมแบบพีดีจะมีค่าที่สูงใน

ทั้งแบบจำลองและการทดลอง ในทำนองเดียวกันตัวควบคุมแบบแอลคิวอาร์จะมีค่าที่ต่ำในทั้งแบบจำลองและการทดลองนั้นแสดงว่าตัวควบคุมแบบแอลคิวอาร์จะสามารถควบคุมหุ่นยนต์ดูลยภาพมีรักษาเสถียรภาพดีกว่าตัวควบคุมแบบพีดีที่ค่าสมรรถนะสูงนั่นเอง

4) สรุป

บทความฉบับนี้ได้นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมแบบพีดีกับตัวควบคุมแบบแอลคิวอาร์ โดยตัวควบคุมทั้งสองแบบนี้จะทำหน้าที่รักษาเสถียรภาพเพื่อให้หุ่นยนต์ดูลยภาพสามารถรักษาสถิตได้นั้น ในการออกแบบตัวควบคุมแบบพีดีและตัวควบคุมแบบแอลคิวอาร์จำเป็นจะต้องทราบแบบจำลองคณิตศาสตร์ของหุ่นยนต์ดูลยภาพก่อน โดยในวิจัยฉบับนี้ได้ใช้กฎของนิวตันในการออกแบบแบบจำลองคณิตศาสตร์ของหุ่นยนต์ดูลยภาพ โดยหลักที่ใช้ในการพิจารณาเพื่อออกแบบแบบจำลองคณิตศาสตร์ของหุ่นยนต์ดูลยภาพนั้นจะพิจารณาในรูปแบบของพลังงานจลน์รวมของระบบ แต่แบบจำลองคณิตศาสตร์ของหุ่นยนต์ดูลยภาพที่หาได้จากกฎของนิวตันนั้นจะเป็นระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น ดังนั้นจะต้องทำการเปลี่ยนแบบจำลองคณิตศาสตร์ของหุ่นยนต์ดูลยภาพที่ไม่เป็นเชิงเส้นให้มาอยู่ในรูปแบบเชิงเส้นก่อน แล้วจึงนำแบบจำลองคณิตศาสตร์ของหุ่นยนต์ดูลยภาพที่เป็นเชิงเส้นมาใช้ในการออกแบบตัวควบคุมต่อไป

ในการจำลองและการทดลอง ความสามารถของตัวควบคุมที่ใช้ในการควบคุมหุ่นยนต์ดูลยภาพให้มีเสถียรภาพ โดยการจำลองระบบของหุ่นยนต์ดูลยภาพที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุมที่ได้จากโครงสร้างจริงและเปรียบเทียบกับสมรรถนะมุมอินเวอร์ทเพน-ดูลัมของหุ่นยนต์ดูลยภาพกับตัวควบคุมที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์ของหุ่นยนต์ดูลยภาพ และทำการเปรียบเทียบค่าดัชนีสมรรถนะของระบบควบคุมหุ่นยนต์ดูลยภาพที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีดีกับตัวควบคุมแบบแอลคิวอาร์ โดยการควบคุมระบบหุ่นยนต์ดูลยภาพจะใช้ตัวควบคุมแบบพีดีและตัวควบคุมแบบแอลคิวอาร์ในการรักษาเสถียรภาพของหุ่นยนต์ดูลยภาพ ในการทดสอบตัวควบคุมทั้งสองตัวนี้ที่ได้มาจากการคำนวณในแบบของสมการเชิงเส้นที่ได้มาจากแบบจำลองคณิตศาสตร์ของหุ่นยนต์ดูลยภาพนั้นสามารถควบคุมและรักษาเสถียรภาพของหุ่นยนต์ดูลยภาพให้สามารถรักษาสถิตไว้

5) ข้อเสนอแนะ

จากผลการทดสอบและสรุปผลการทดลอง แสดงให้เห็นข้อจำกัดในรักษาคุณภาพจากค่าดัชนีสมรรถนะของระบบควบคุมในการตอบสนองเมื่อทำการทดสอบจริงกับการจำลอง โดยผลต่างของดัชนีสมรรถนะของระบบควบคุมของตัวควบคุมแบบพีดีประมาณ 44 และ ตัวควบคุมแบบแอลคิวอาร์ประมาณ 5 ทางคณะผู้วิจัยถ้าหากสามารถหาค่าคงที่ของพารามิเตอร์ที่เหมาะสมจะให้ค่าดัชนีสมรรถนะของระบบควบคุมผลต่างลดน้อยลงได้ หรือ อาจจะใช้ตัวควบคุมอื่น เช่น Slide mode control หรือ Fuzzy control เนื่องจากมีการตั้งกฎควบคุมนั้นยืดหยุ่นกว่าซึ่งจะทำให้การตอบสนอง และดัชนีสมรรถนะของระบบควบคุมดีขึ้นต่อไป

REFERENCES

- [1] F. Grasser, A. D'Arrigo, S. Colombi, and A. C. Rufer, "JOE: A mobile, inverted pendulum," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 49, no. 1, pp. 107–114, Feb. 2002, doi: 10.1109/41.982254.
- [2] S. W. Nawawi, M. N. Ahmad, and J. H. S. Osman, "Development of a two-wheeled inverted pendulum mobile robot," in *Proc. 5th Student Conf. Res. and Develop.*, Selangor, Malaysia, Dec. 2007, pp. 1–5, doi: 10.1109/SCORED.2007.4451379.
- [3] T. Nomura, Y. Kitsuka, H. Suemitsu, and T. Matsuo, "Adaptive backstepping control for a two-wheeled autonomous robot," in *Proc. ICROS-SICE Int. Joint Conf.*, Fukuoka, Japan, Aug. 2009, pp. 4687–4692.
- [4] R. M. Brisilla and V. Sankaranarayanan, "Nonlinear control of mobile inverted pendulum," *Robot. Auton. Syst.*, vol. 70, pp. 145–155, Aug. 2015.
- [5] W. An and Y. Li, "Simulation and control of a two-wheeled self-balancing robot," in *Proc. IEEE Int. Conf. Robot. and Biomimetics (ROBIO)*, Shenzhen, China, Dec. 2013, pp. 456–461.
- [6] Y. Takahashi, S. Ogawa, and S. Machida, "Experiments on step climbing and simulations on inverse pendulum control using robotic wheelchair with inverse pendulum control," *Trans. Inst. Meas. Control*, vol. 30, no. 1, pp. 47–61, 2008, doi: 10.1177/0142331206075538.
- [7] O. Jamil, M. Jamil, Y. Ayaz, and K. Ahmad, "Modeling, control of a two-wheeled self-balancing robot," in *Proc. Int. Conf. Robot. and Emerging Allied Technol. Eng. (iCREATE)*, Islamabad, Pakistan, Apr. 2014, pp. 191–199.



- [8] M. Ahmad and H. Osman, "Real-time control system for a two-wheeled inverted pendulum mobile robot," in *Advanced Knowledge Application in Practice*. London, U.K.: IntechOpen, 2010, doi: 10.5772/10362.
- [9] G. Sziebig, B. Takarics, and P. Korondi, "Control of an embedded system via internet," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 57, no. 10, pp. 3324–3333, Oct. 2010, doi: 10.1109/TIE.2010.2041132.
- [10] C. U. Maheswararao, Y. S. K. Babu, and K. Amaresh, "Sliding mode speed control of a DC motor," in *Proc. Int. Conf. Commun. Syst. Netw. Technol.*, Katra, India, Jun. 2011, pp. 387–391.
- [11] H. Maghfiroh, O. Wahyunggoro, A. I. Cahyadi, and S. Praptodiyono, "PID-hybrid tuning to improve control performance in speed control f DC motor base on PLC," in *Proc. 3rd Int. Conf. Instrum. Control and Automat. (ICA)*, Ungasan, Indonesia, Aug. 2013, pp. 233–238.
- [12] K. -K. D. Young, "Controller Design for a Manipulator Using Theory of Variable Structure Systems," *IEEE Trans. Syst. Man Cybern.*, vol. 8, no. 2, pp. 101–109, Feb. 1978, doi: 10.1109/TSMC.1978.4309907.
- [13] M. A. Imtiaz, M. Naveed, N. Bibi, S. Aziz, and S. Z. H. Naqvi, "Control system design, analysis & implementation of two wheeled self balancing robot (TWSBR)," *IEEE 9th Annu. Inf. Technol., Electron. and Mobile Commun. Conf. (IEMCON)*, Vancouver, Canada, Nov. 2018, pp. 431–437.
- [14] A. Y. Zimit, H. J. Yap, M. F. Hamza, I. Siradjuddin, B. Hendrik, and T. Herawan, "Modelling and experimental analysis two-wheeled self balance robot using PID controller," in *Proc. 18th Int. Con. Comput. Sci. and Its Appl.*, Melbourne, Australia, Jul. 2018, pp. 683–698.
- [15] J. Fang, "The LQR controller design of two-wheeled self-balancing robot based on the particle swarm optimization algorithm," *Math. Probl. Eng.*, vol. 2014, Jun. 2014, Art. No. 729095.
- [16] S. I. Han and J. M. Lee, "Balancing and velocity control of a unicycle robot based on the dynamic model," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 62, no. 1, pp. 405–413, Jan. 2015, doi: 10.1109/TIE.2014.2327562.
- [17] H. Jin, J. Hwang, and J. Lee, "A balancing control strategy for a one-wheel pendulum robot based on dynamic model decomposition: Simulations and experiments," *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, vol. 16, no. 4, pp. 763–768, Aug. 2011, doi: 10.1109/TMECH.2010.2054102.
- [18] D. Bucciari, D. Perritaz, P. Mullhaupt, Z. -P. Jiang, and D. Bonvin, "Velocity-scheduling control for a unicycle mobile robot: Theory and experiments," *IEEE Trans. Robot.*, vol. 25, no. 2, pp. 451–458, Apr. 2009, doi: 10.1109/TRO.2009.2014494.

การพัฒนากระบวนการสกัดข้อมูลศาสตร์จากข้อความทวิตเตอร์ด้วยแบบจำลอง คอนดิชันนอลแรนดอมฟิลด์

ฐวชิต แฉล้มเขตต์^{1*} ชนินทร์ ทินนโชติ² อรรถพล อารังรัตนฤทธิ์³

^{1,2}ภาควิชาวิศวกรรมสำรวจ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพมหานคร, ประเทศไทย

³ภาควิชาภาษาศาสตร์ คณะอักษรศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพมหานคร, ประเทศไทย

*ผู้ประพันธ์บรรณกิจ อีเมล : tuvachitchalamkate@gmail.com

รับต้นฉบับ: 18 พฤษภาคม 2565; รับบทความฉบับแก้ไข: 27 กรกฎาคม 2565; ตอบรับบทความ: 19 กันยายน 2565;

เผยแพร่ออนไลน์: 22 ธันวาคม 2565

บทคัดย่อ

ระบบนำทางแผนที่ออนไลน์ทั้งบนเว็บเบราว์เซอร์ โทรศัพท์เคลื่อนที่ และแพลตฟอร์มอื่น ๆ ปัจจุบันมีความสำคัญขึ้นอย่างมาก เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของผู้ใช้งาน ผู้ให้บริการ โดยชื่อสถานที่หรือชื่อภูมิศาสตร์คือแหล่งข้อมูลสำคัญที่ผู้ใช้งานมักจะใช้เป็นคำสำคัญ ในการค้นหา รวมทั้งการจัดเก็บข้อมูลเหล่านี้ให้อยู่เป็นหมวดหมู่ต่าง ๆ ด้วย ซึ่งงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างแบบจำลองที่สามารถ สกัดเอาชื่อภูมิศาสตร์พร้อมทั้งจัดหมวดหมู่แบบอัตโนมัติโดยมีแหล่งข้อมูลสำคัญคือสื่อสังคมออนไลน์จากทวิตเตอร์ซึ่งเป็นแพลตฟอร์ม ที่ได้รับความนิยมในประเทศไทยแพลตฟอร์มหนึ่ง เป็นแหล่งข้อมูลข่าวสารที่มีความรวดเร็วและมีการอัปเดตข้อมูลตลอดเวลาทำให้มี โอกาสพบกับชื่อภูมิศาสตร์ที่เป็นสถานที่ใหม่ ๆ ซึ่งเป็นประโยชน์กับการรวบรวมข้อมูลภูมิสารสนเทศโดยไม่จำเป็นต้องออกไปสำรวจ ข้อมูลภาคสนามเพียงอย่างเดียว ซึ่งเครื่องมือทางการรู้จำชื่อเฉพาะในภาษาไทยนั้นไม่สามารถนำมาใช้ได้โดยตรงเนื่องจากมีการ แบ่งประเภทของชื่อเฉพาะที่ไม่ได้จำแนกหมวดหมู่ของชื่อภูมิศาสตร์ไว้ โดยในส่วนของงานวิจัยนี้นำเอาอัลกอริทึมคอนดิชันนอล แรนดอมฟิลด์มาประยุกต์ใช้ร่วมกับคุณลักษณะทางภาษา เช่น คำบุพบทที่แสดงถึงสถานที่ (ใกล้ ใกล้ ถัดจาก ถัดไป ฯลฯ) คำนำหน้า เช่น โรงเรียน ตลาด วัด หมู่บ้าน ฯลฯ ซึ่งในงานวิจัยนี้มีการสร้างคลังข้อมูลภาษา (corpus) ขึ้นมาจากข้อความทวิตเตอร์ จำนวน 28,082 ข้อความ แบ่งเป็นข้อมูลสำหรับฝึกสอน 22,445 ข้อความ คิดเป็นร้อยละ 80 และข้อมูลสำหรับทดสอบจำนวน 5,617 ข้อความ คิดเป็นร้อยละ 20 โดยออกแบบการทดลองออกเป็น 2 กลุ่มหลัก ตามอัลกอริทึมที่ใช้ในการตัดคำ ซึ่งผลการศึกษาแบบจำลองที่ให้ค่า ความถูกต้องโดยรวม (F1) สูงที่สุดคือ 0.946 ซึ่งให้ความถูกต้องโดยรวมเพียงพอสำหรับการนำไปใช้งานในส่วนที่เกี่ยวข้องต่อไป

คำสำคัญ: ภูมิสารสนเทศ การเรียนรู้ของเครื่องจักร การประมวลผลภาษาธรรมชาติ

The Development of Geo-Names Extraction from Twitter Texts Data by Conditional Random Fields

Tuvachit Chalamkate^{1*} Chanin Thinnachote² Attapol Thamrongrattanarit²

^{1,2}*Department of Survey Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand*

³*Department of Linguistics, Faculty of Arts, Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand*

*Corresponding Author. E-mail address: tuvachitchalamkate@gmail.com

Received: 18 May 2022; Revised: 27 July 2022; Accepted: 19 September 2022;

Published online: 22 December 2022

Abstract

Navigation systems and online maps, Mobile application, and other platforms, are becoming increasingly important due to increasing users and providers. Place names or geonames (geographic names) are essential sources of information that users tend to use as keywords in their searches. Including storing these data in different categories. This research aims to create a model capable of extracting geonames and automatically categorizing them from the social media source of Twitter, one of the popular platforms in Thailand. It is a fast and always up-to-date information source, providing the opportunity to discover new geographic locations and helpful in gathering geospatial information without needing a field survey. Named-entity recognition standard tool cannot be used directly because of the classification of name entities that are not categorized by geographic names. As for the model, the conditional random field algorithm is applied to linguistic features such as place prepositions (near, far, next, next to, etc.) and prefixes, for instance, school, market, temples, villages, etc. This study, the Corpus was created from 28,082 Twitter messages, representing 80 percent of the 22,445 training set and 20 percent of the test set of 5,617 messages. According to the algorithm used to word tokenize, the experiment was designed into two main groups. The study result of the model with the highest overall accuracy (F1) was 0.946, which provided sufficient overall accuracy for relevant applications both on the web browser.

Keywords: Geoinformatics, Machine learning, Natural language processing

1) บทนำ

ข้อมูลจากสื่อสังคมออนไลน์มีการเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในแต่ละปี โดยมีทั้งข้อมูลที่เป็นข่าวสาร กระดานข่าว ข้อมูลที่เป็น การโต้ตอบระหว่างผู้ใช้งาน ประกาศ ฯลฯ ซึ่งประเทศไทยมีผู้รับ ข่าวสารจากสื่อสังคมออนไลน์เป็นจำนวนถึงร้อยละ 78 จาก ประชากรทั้งหมด เป็นสัดส่วนที่มากที่สุดในโลก โดยทวิตเตอร์มี ผู้ใช้งานในประเทศไทยอยู่อันดับที่ 10 ของโลกและเป็นแพลตฟอร์ม ที่ได้รับความนิยมในการรับรู้ข่าวสารรองจาก Facebook [1] ดังนั้นจึงเป็นไปได้ว่ามีข้อมูลอีกมากมายที่เราสามารถนำมาใช้ ประโยชน์ได้ในหลากหลายวัตถุประสงค์ โดยพบว่าข้อมูลดิจิทัล เหล่านี้ทั้ง สื่อสังคมออนไลน์ เว็บบล็อก ฯลฯ กว่าร้อยละ 60 มีการอ้างอิงเชิงตำแหน่ง [2] การสกัดเอาข้อมูลที่มีการกล่าวถึง หรืออ้างอิงในเชิงตำแหน่ง เช่น ชื่อสถานที่ หรือบริบทที่ทำให้ เข้าใจได้ว่าเป็นการสื่อถึงสถานที่ใดสถานที่หนึ่ง ในปัจจุบันมีการ ศึกษาวิจัยในภาษาต่าง ๆ โดยเฉพาะภาษาอังกฤษ ซึ่งเรียก กระบวนการนี้ว่า การสกัดข้อมูลทางภูมิศาสตร์ (Geographic Information Retrieval : GIR) ประกอบไปด้วย 2 ขั้นตอนที่สำคัญ คือ 1) การรู้จำภูมินาม (toponym recognition, toponym extraction, geotagging) และ 2) การเข้ารหัสทางภูมิศาสตร์ (Geocoding, Toponym resolution, Toponym ambiguity) สำหรับงานวิจัยนี้จะพัฒนาแบบจำลองในส่วนแรกซึ่งเป็นขั้นตอน ที่ใช้ในการสกัดข้อมูลชื่อเฉพาะที่เป็นข้อมูลชื่อสถานที่ หรือชื่อ ทางภูมิศาสตร์ออกมาจากข้อความ [3]

จากเนื้อความข้างต้นเครื่องมือสำคัญในการสกัดชื่อเฉพาะ หรือ Named Entities Recognition : NER เป็นหนึ่งในเครื่องมือ ที่นักภูมิสารสนเทศนำมาใช้เมื่อต้องประมวลผลข้อมูลจำนวนมาก ที่อยู่ในรูปของข้อความ เพื่อสกัดเอาชื่อเฉพาะ เช่น ชื่อบุคคล สถานที่ องค์กร วันและเวลา ชื่อยา หรือ คำเฉพาะที่เราสนใจ ฯลฯ โดยความท้าทายของการสกัดชื่อภูมิศาสตร์ออกจากข้อความ คือ ความกำกวมที่อยู่ภายในประโยค เช่น ในตัวอย่างประโยค “Paris Hilton is in Paris” จากตัวอย่างข้างต้น Paris ที่เป็น ชื่อคน และ Paris ที่เป็นชื่อเมืองเขียนนำด้วยอักษรตัวใหญ่ เช่นเดียวกันทำให้ต้องพิจารณาถึงบริบทของคำในประโยค ซึ่งใน ที่นี้มีบุพบทที่ใช้คือ คำว่า “in” ทำให้สามารถแยกหน้าที่ของคำ ว่า “Paris” ที่เป็นชื่อบุคคลและชื่อสถานที่ได้ สำหรับภาษาไทย นั้นยังไม่พบว่ามีผู้พัฒนาเครื่องมือในการทำ NER เพื่อสกัดข้อมูล ที่เป็นชื่อสถานที่โดยเฉพาะหรือ จำแนกสถานที่ออกมาจากข้อความ

เครื่องมือในการทำ NER ภาษาไทยที่ใช้กันแพร่หลายปัจจุบัน คือ PyThaiNLP [4] แต่จำแนกประเภทของชื่อเฉพาะในกลุ่มหลัก ที่สำคัญ คือ ชื่อบุคคล ชื่อองค์กร ชื่อสถานที่ วัน เวลา URLs ฯลฯ ซึ่งจะพบว่าชื่อสถานที่นั้นไม่ได้แยกประเภทออกมาเป็นหมวดหมู่ ทำให้การสกัดข้อมูลเพื่อที่จะเก็บรวบรวมข้อมูลชื่อสถานที่สำคัญ หรือนำไปวิเคราะห์เชิงพื้นที่ (spatial analysis) อาทิเช่น หาก ต้องการนำไปใช้ในการเก็บข้อมูลชื่อสถานที่เพื่อทำฐานข้อมูล สำหรับระบบนำทาง พบว่ามักจะมีการแบ่งประเภทหมวดหมู่ใน การให้บริการ หรือหากนำไปวิเคราะห์เชิงพื้นที่ การจำแนกข้อมูล ที่เป็นขอบเขตการปกครอง ซึ่งเป็นข้อมูลแบบพื้นที่รูปปิด (polygon) หากแสดงในระบบภูมิสารสนเทศ และข้อมูลตำแหน่ง โรงเรียน วัด อาคารสูง ร้านค้า ฯลฯ ซึ่งเป็นข้อมูลรูปแบบจุด (point) โดย ในกรณีหากข้อมูลชื่อเฉพาะมีความน่าจะเป็นชื่อสถานที่เหล่านั้น ไม่สามารถหาค่าพิกัดอ้างอิงได้ การคาดคะเนโดยใช้ขอบเขตการ ปกครองมาช่วยจึงสามารถกำหนดขอบเขตของสถานที่เหล่านั้น ได้แคลง [5], [6]

เนื่องจากข้อมูลทวิตเตอร์มีปริมาณและความถี่ของข้อมูลที่เกิดขึ้นสูงมากในแต่ละวันทำให้มีโอกาสที่จะได้รับข้อมูล ข่าวสาร ใหม่ ๆ อยู่ตลอด [7] ดังนั้นสำหรับงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ที่จะพัฒนาระบบการสร้างเครื่องมือเพื่อสกัดข้อมูลชื่อภูมิศาสตร์ จากสื่อสังคมออนไลน์คือ ทวิตเตอร์รวมทั้งจำแนกชนิดของชื่อ เฉพาะเหล่านี้เพื่อให้สามารถนำข้อมูลไปใช้เป็นฐานข้อมูลอ้างอิง ในการสำรวจภาคสนามต่าง ๆ รวมทั้งยังเป็นขั้นตอนแรกของการ พัฒนาระบบแปลความหมายทางภูมิศาสตร์ให้มีความถูกต้องและ ใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2) ทบทวนวรรณกรรม

สำหรับงานวิจัยทางด้านการสกัดชื่อเฉพาะทางภูมิศาสตร์นั้น ปัจจุบันยังอยู่ในวงที่จำกัดเนื่องจากเป็นการนำข้อมูลที่ได้ไปใช้ใน งานทางด้านภูมิสารสนเทศซึ่งเป็นงานเฉพาะทางเป็นส่วนใหญ่ โดยเฉพาะสำหรับภาษาไทย ซึ่งวิธีการที่ใช้จะเป็นการนำเอาแนวทางการแก้ปัญหาทางด้านการรู้จำชื่อเฉพาะหรือ Named-Entity Recognition : NER มาประยุกต์ใช้งาน ซึ่งเนื้อหาในส่วนนี้จะ นำเสนอใน 2 หัวข้อสำคัญ คือ 2.1) งานวิจัยทางด้านการรู้จำ ภูมินาม และ 2.2) งานวิจัยทางด้านการรู้จำชื่อเฉพาะซึ่งเป็น ภาษาไทย

2.1) งานวิจัยทางการรู้จำภูมินาม

ปัจจุบันมีการศึกษาวิจัยในด้านนี้ค่อนข้างจำกัดโดยหัวข้อที่สำคัญในแนวทางวิจัยนี้คือ แก้ไขปัญหาในเรื่องการรู้จำชื่อที่มีความกำกวม และชื่อที่ไม่ได้ถูกรับรองอยู่ในอักขรानุกรมทางภูมิศาสตร์ การนำคลังคำสั่ง Stanford-NER มาปรับใช้เพื่อสร้างคุณสมบัติในการหาคำที่เป็นคำนามเฉพาะหรือ proper-nouns เนื่องจากชื่อทางภูมิศาสตร์นั้นก็จัดเป็นชื่อเฉพาะประเภทหนึ่งพร้อมทั้งใช้พจนานุกรมเอนทิตีซึ่งเป็นพจนานุกรมที่เก็บข้อมูลคุณสมบัติของชื่อเฉพาะต่าง ๆ เช่น ตำแหน่งที่ตั้ง (หากเป็นสถานที่) สี ฤดูกาล [8], [9] การนำอัลกอริทึม Conditional Random Fields : CRFs มาใช้ร่วมกับการกำหนดคุณลักษณะจาก หน้าที่ของคำ (POS-tags) บริบทของคำในประโยคได้แก่ คำอุปสรรค (prefix) และ คำปัจจัย (suffix) เพื่อนำมาสร้างแบบจำลองสกัดชื่อเฉพาะที่เป็นโบราณสถาน โดยเปรียบเทียบกับอีก 2 วิธีคือ SVM และ HMM โดยเปรียบเทียบความถูกต้องจาก google geocoding API ซึ่งพบว่า CRF ให้ผลลัพธ์เป็นอัตราการเชื่อมโยงข้อมูลระหว่างชื่อภูมิศาสตร์ที่สกัดออกด้วยแบบจำลองกับฐานข้อมูลอย่าง google geocoding API ได้จำนวนมากที่สุด [10] นอกจากนี้ยังมีการสร้างคุณลักษณะจากการสร้างกฎ (rule-based) ขึ้นมา เช่น คำว่า “street” หากเจอวลี “tree” แล้วพบตัวอักษรข้างหน้าเป็น [s, S] ให้ติดแท็กคำนั้นเป็น location [11]

2.2) งานวิจัยทางการรู้จำชื่อเฉพาะภาษาไทย (Thai NER)

งานวิจัยทางการรู้จำชื่อเฉพาะภาษาไทยยังมีอยู่จำกัด หากเทียบกับภาษาที่มีความนิยม เช่น ภาษาอังกฤษ ฝรั่งเศส หรือ จีน ในเริ่มแรกของงานด้านนี้มีการใช้วิธีการทางสถิติ ร่วมกับแบบจำลองฮิรอสติก โดยสร้างกฎขึ้นมาจากบริบทของชื่อเฉพาะ เช่น คำสำคัญหรือคำที่อยู่ใกล้กับชื่อเฉพาะ ซึ่งผลที่ได้พบว่าใช้ได้ดีกับงานเขียนประเภทนิตยสารแต่หากเป็นหนังสือพิมพ์จะให้ผลที่ไม่ดีเท่าที่ควรเนื่องจากหนังสือพิมพ์จะมีการใช้สำนวนที่เป็นทางการน้อยกว่านิตยสาร [12] หลังจากนั้นมีการนำแบบจำลอง maximum entropy มาใช้ร่วมกับแบบจำลองฮิรอสติกและพจนานุกรมศัพท์เฉพาะซึ่งผ่านการตัดคำมาแล้ว โดยผลที่ได้พบว่าให้ผลดีกับชื่อบุคคล รองลงมาคือชื่อองค์กร แต่สำหรับชื่อสถานที่นั้นมีความถูกต้องน้อยที่สุดเนื่องจากมีความคลุมเครือมากกว่าชื่อประเภทอื่น [13] ในปี 2009 มีการนำเอาแบบจำลอง CRF มาใช้เพื่อสร้าง NER ภาษาไทย โดยใช้คลังข้อมูล “BEST 2009” ของ NECTEC จำนวน 90,000 คำ ในงานวิจัยนี้แบ่ง

ข้อมูลออกเป็น 2 ส่วนคือ 1) ตัดคำ และ 2) ตัดพยางค์ (syllable segmentation) ซึ่งพบว่าให้ค่าความถูกต้องโดยรวมใกล้เคียงกันคือ 0.8039 และ 0.808 ตามลำดับ หากพิจารณาเฉพาะส่วนของชื่อสถานที่พบว่า ค่าความถูกต้องโดยรวมเป็น 0.7372 และ 0.7692 ตามลำดับ [14] สำหรับในปัจจุบันมีการนำโครงข่ายประสาทเทียมแบบวกกลับ คือ Bi-Directional Long Short Term Memory : Bi-LSTM ร่วมกับ CRF จำแนกเป็น 13 ชั้นข้อมูล โดยชื่อสถานที่ก็เป็นหนึ่งในจำนวนนั้น ซึ่งสำหรับชื่อสถานที่ที่มีค่าความถูกต้องโดยรวมอยู่ที่ 0.8773 ซึ่งเป็นงานวิจัยที่ให้ค่าความถูกต้องสูงที่สุดในปัจจุบัน [15]

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าการสร้างแบบจำลองเพื่อสกัดข้อมูลชื่อเฉพาะนั้นมีหลายงานวิจัยที่นำคุณลักษณะทางด้านภาษาและการใช้อักขรานุกรมหรือพจนานุกรมศัพท์เฉพาะมาใช้งาน แม้ในปัจจุบันจะมีการนำโครงข่ายประสาทเทียมมาประยุกต์ใช้งานแต่หากมีการสร้างคุณลักษณะเพิ่มไปด้วยก็จะมีแนวโน้มจะส่งผลให้แบบจำลองสามารถทำงานได้ดียิ่งขึ้นซึ่ง CRF มีข้อได้เปรียบแบบจำลองที่สร้างมาจากโครงข่ายประสาทเทียมในแง่ของเวลา (ทรัพยากร) ในการประมวลผล

3) แบบจำลอง Conditional Random Fields : CRFs

แบบจำลอง Conditional Random Fields (CRFs) เป็นแบบจำลองความน่าจะเป็นแบบหนึ่งที่นิยมใช้กับข้อมูลที่เป็นลำดับ (sequence) เช่น การประยุกต์ใช้กับการประมวลผลธรรมชาติ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง การทำ Named Entity Recognition (NER) ซึ่งแบบจำลองนี้พิสูจน์แล้วว่าให้ผลที่ดีกับการตัดคำ (segmentation) หรือติดป้าย (labelling) ให้กับข้อมูลที่เป็นลำดับ แบบจำลองนี้พัฒนามาจาก maximum entropy Markov models (MEMMs) โดย CRF สามารถลดข้อจำกัดของ MEMMs ลงได้ ซึ่งแบบจำลอง CRF เป็นแบบห่วงโซ่ตรงหรือ linear-chain CRF แสดงความสัมพันธ์ตามสมการที่ (1) และ (2) [16]

$$p(y|x) = \frac{1}{Z(x)} \prod_{t=1}^T \exp \left(\sum_{k=1}^K \theta_k f_k(y_t, y_{t-1}, x_t) \right) \quad (1)$$

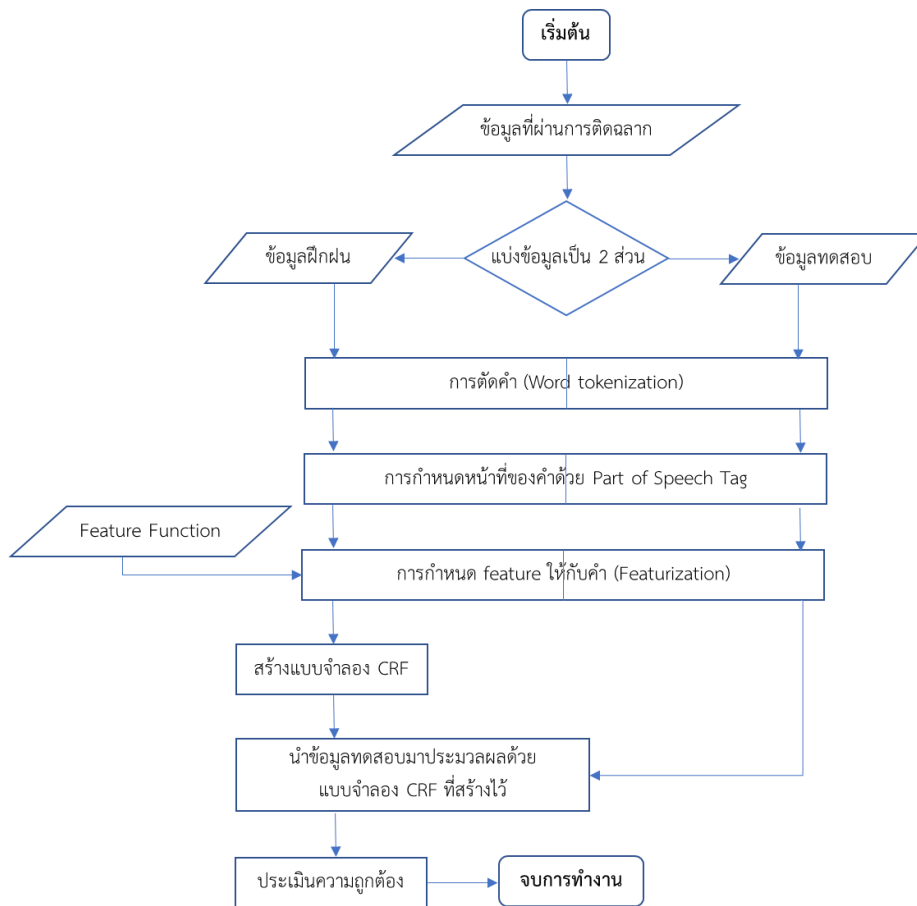
เมื่อ $f_k(y_t, y_{t-1}, x_t)$ คือฟังก์ชันคุณลักษณะ; x คือลำดับผลลัพธ์ คำสั่งเกต; y คือลำดับผลลัพธ์คำที่ทำนาย; θ_k คือค่าน้ำหนักของฟังก์ชันคุณลักษณะ; T, t คือลำดับของเหตุการณ์ที่ต่อเนื่อง; K, k คือจำนวนของฟังก์ชันคุณลักษณะ; $Z(x)$ คือการปรับข้อมูล (normalization) ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (2)

$$Z(x) = \sum_y \prod_{t=1}^T \exp \left(\sum_{k=1}^K \theta_k f_k(y_t, y_{t-1}, x_t) \right) \quad (2)$$

4) วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในงานวิจัยชิ้นนี้มีการเก็บรวบรวมข้อมูลจากแหล่งข้อมูลทวิตเตอร์ จำนวน 28,082 ข้อความ ซึ่งใช้ twitter API เป็นเครื่องมือหลักในการดึงข้อมูลผ่านการโปรแกรมด้วยภาษา

python จากสมมติฐานของงานวิจัยนี้ตัวแปรอิสระประกอบไปด้วยส่วนการดำเนินงาน ส่วนสำคัญในหัวข้อที่ 4.1) – 4.6) แสดงสรุปขั้นตอนตามรูปที่ 1



รูปที่ 1 : แสดงขั้นตอนการดำเนินงานสร้างแบบจำลองด้วย CRF

4.1) การออกแบบการทดลอง

งานวิจัยนี้มีสมมติฐานคือ CRF และฟังก์ชันคุณสมบัติที่นำมาใช้จะสามารถทำให้ได้แบบจำลองในการสกัดข้อมูลชื่อภูมิศาสตร์ที่มีประสิทธิภาพ (วัดประสิทธิภาพจาก F1-score) โดยตัวแปรอิสระของงานวิจัยนี้คือ ฟังก์ชันคุณสมบัติที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของแบบจำลอง โดยฟังก์ชันคุณสมบัติต่าง ๆ ที่ใช้แสดงในหัวข้อที่ 4.6 เช่น แบบจำลอง CRF ที่มีฟังก์ชันคุณสมบัติ POS-tags + บุพพท์ที่บ่งบอกถึงสถานที่ ให้ค่า F1-score ที่น้อยกว่า POS-tags + บุพพท์ที่บ่งบอกถึงสถานที่ + คำอุปสรรค (prefix) เป็นต้น ซึ่งทั้งนี้ไม่แน่ว่าการมีฟังก์ชันคุณสมบัติที่มากกว่าจะให้ค่า F1-score ได้มากกว่า จึงจำเป็นที่จะต้องมีการทดลองและสรุปผลว่าฟังก์ชันคุณสมบัติใดที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของแบบจำลอง

4.2) ส่วนการรวบรวมและประมวลผลข้อมูลเบื้องต้น

การรวบรวมข้อมูลจะใช้เครื่องมือ ค้นหาออกเป็น 2 ส่วนหลัก คือ 1. ค้นหาจากคำสำคัญ หรือ hashtag ที่มักจะมีค่าสำคัญเกี่ยวกับสถานที่ เช่น อร่อยบอกต่อ js100radio รีวิวไทยแลนด์ กรุงเทพมหานคร นนทบุรี สมุทรปราการ ฯลฯ โดยจำกัดข้อมูลที่มาจากกรุงเทพและปริมณฑลเป็นหลัก และ 2. ค้นหาจาก bounding box กำหนดขอบเขตให้ครอบคลุมกรุงเทพ และปริมณฑล หลังจากนั้นจึงประมวลผลข้อมูลเบื้องต้นด้วยการตัดข้อความที่สั้นเกินไป หรือ ข้อความที่ซ้ำ รวมทั้งคำที่มีการซ้ำของตัวอักษรมาก ๆ เช่น “ยากกกกกกกก” “มากมายก่ายกองงงงงงง” ได้ข้อความจำนวนทั้งหมด 28,082 ข้อความ แบ่งเป็น

ข้อมูลสำหรับฝึกสอน 22,445 ข้อความ คิดเป็นร้อยละ 80 และ ข้อมูลสำหรับทดสอบจำนวน 5,617 ข้อความ คิดเป็นร้อยละ 20

4.3) การทำฉลากให้กับข้อมูลเพื่อสร้างคลังข้อมูลทางภาษา (Corpus)

ในงานวิจัยนี้แบ่งประเภทของชื่อภูมิศาสตร์ออกเป็น 18 ชนิด โดยใน 18 ชนิดนั้นจัดอยู่ใน 5 หมวดสำคัญ ได้แก่ 1. สถานที่ธรรมชาติ 2. สิ่งปลูกสร้าง 3. ขอบเขตการปกครอง 4. สถานที่ที่ไม่อยู่ในอาณาเขตของประเทศไทย 5. สถานที่อื่น ๆ ใช้วิธีติดฉลากของข้อมูลด้วยมนุษย์ (human annotation) ซึ่งมีการสร้างคู่มือเพื่อเป็นแนวทางในการตัดสินใจเลือกฉลากที่เหมาะสมกับชื่อภูมิศาสตร์ในแต่ละประเภท แสดงตัวอย่างรูปแบบของฉลากที่ใช้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 : ตัวอย่างข้อความและลักษณะการติดฉลาก

ลำดับ	ข้อความ
1.	@Ordinary_Champ วิว<NAT>แม่น้ำโขงนครพนม</NAT>สวยสุดละ นี่ชอบมากกกกกก
2.	141062 @7.57 ฝนตกหนักเลย <ROAD>แจ้งวัฒนะ</ROAD> น่าจะตกก่อนออกจากบ้าน อุตสาหัสจะไปเดินออกกำลังกาย<RCT>สวนจตุจักร</RCT> ท่าจะไม่รอด☹️
...	
3.	ตกบาตรเข้าสารแห่ง... เราก็อ่านนะ 🙏😊😊 — ที่<MKT>ตลาดน้ำขวัญเรียม</MKT> / <RP>วัดบางเพ็งใต้+วัดบำเพ็ญเหนือ กรุงเทพมหานคร</RP>

4.4) การตัดคำจากประโยคภาษาไทยเพื่อนำไปใช้ในการประมวลผล (Thai Tokenization)

การตัดคำถือเป็นขั้นตอนแรกในการดำเนินการเพื่อสร้างแบบจำลองการสกัดชื่อภูมิศาสตร์ออกมาจากข้อความ เนื่องจากข้อความที่ไม่ว่าจะเป็นประโยค หรือวลีต่างก็ประกอบไปด้วยคำที่มากกว่า 1 คำเรียงร้อยกัน โดยการตัดคำภาษาไทยในปัจจุบันมีผู้ศึกษาและมีการพัฒนาคลังคำสั่งในภาษา python ออกมาให้ใช้งาน ในงานวิจัยนี้เลือกเครื่องมือในการตัดคำจาก PyThaiNLP 2 แบบคือ newmm ซึ่งเป็นการใช้อัลกอริทึม maximal matching กับพจนานุกรมคำศัพท์ภาษาไทยเป็นพื้นฐาน และอีกวิธีหนึ่งคือ Attacut ซึ่งเป็นการนำเทคนิคการเรียนรู้เชิงลึก (deep learning) มาใช้งาน โดยมีการนำบริบททางความหมายของคำและประโยคมาประกอบทำให้ได้ผลที่ดีกว่าการตัดคำโดยใช้อัลกอริทึม maximal matching มาก [17] สำหรับในงานวิจัยนี้จะนำทั้ง

สองวิธีนี้มาใช้ร่วมกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อย่าง CRF เพื่อเป็นการทดสอบอีกทางหนึ่งว่าเครื่องมือที่ใช้ในการตัดคำมีผลต่อแบบจำลองในทางใดทางหนึ่ง

4.5) การเปลี่ยนรูปแบบฉลากข้อมูลให้เป็นรูปแบบลำดับ (Sequence Tagging) แบบ IOB tags

การสร้าง tag แบบ IOB tags ซึ่งเป็นรูปแบบการสร้างฉลากให้กับข้อมูลแบบเป็นลำดับ (sequence tagging) โดย B คือหน่วยแรกของชื่อเฉพาะ (beginning nouns phrase) I คือส่วนประกอบของชื่อเฉพาะซึ่งต่อเนื่องมาจากหน่วยแรก (inside current noun phrase) และสุดท้าย O คือ คำอื่นหรือ token อื่นที่เราไม่ได้จะสกัดเอาชื่อเฉพาะออกมา [18] ซึ่งเราจะดำเนินการต่อเนื่องมาจากขั้นตอนการตัดคำเนื่องจากตัวตัดคำที่ไม่เหมือนกันจะทำให้หน่วยย่อยของคำแตกต่างกัน เช่น ตัวอย่างข้อความที่ 1 ในตารางที่ 1

“@Ordinary_Champ วิว<NAT>แม่น้ำโขงนครพนม</NAT>สวยสุดละ นี่ชอบมากกกกกก”
(@Ordinary_Champ, O), (วิว, O), (แม่น้ำ, B-NAT), (โขง, I-NAT), (นครพนม, I-NAT), (สวย, O), (สุด, O), (ละ, O), (นี่, O), (ชอบมากกกกกก, O) จากตัวอย่างข้างต้นนี้จะพบว่า คำว่า “แม่น้ำโขงนครพนม” คือคำที่เราต้องการสกัดออกมาจากประโยคที่ 1 ซึ่งประกอบไปด้วยหน่วยย่อย 3 ส่วน คือ แม่น้ำ, โขง, นครพนม โดย แม่น้ำ คือหน่วยแรกของชื่อ และ โขงกับนครพนม คือส่วนประกอบของชื่อตามลำดับ และคำที่เหลือมีฉลากเป็น O ซึ่งเราไม่ต้องการสกัดออกมา

4.6) การกำหนดคุณลักษณะเพื่อสร้างแบบจำลอง (Featurization)

ในการกำหนดคุณลักษณะเป็นการคัดเลือกเอาคุณลักษณะเด่นของชื่อแต่ละประเภทที่เราต้องการจำแนกออกจากกัน เช่น หากมีคำบุพบทหน้า “อยู่ที่” “ที่” “ถัดจาก” ฯลฯ มักจะเป็นคำที่บ่งบอกถึงสถานที่ หรือ การติด tag หน้าที่ของคำในประโยค หรือ Part of speech tagging (POS-tagss) โดยชื่อเฉพาะนั้น มักจะทำหน้าที่เป็นคำนามเป็นหลักในประโยค โดยแบ่งคุณลักษณะสำคัญดังนี้

4.6.1) หน้าที่ของคำในประโยค (Part of Speech Tagging: POS-tagss) โดยส่วนมากชื่อเฉพาะมักจะทำหน้าที่เป็นคำนามในประโยค การนำ POS-tagss มาใช้จะสามารถระบุชื่อเฉพาะได้ดีขึ้น

4.6.2) บุพพทที่แสดงถึงการระบุสถานที่ หากมีคำบุพพท นำหน้าชื่อเฉพาะเหล่านี้ก็อาจมีแนวโน้มที่จะเป็นชื่อภูมิศาสตร์ได้ เนื่องจากมีความเป็นไปได้ที่จะอ้างอิงเชิงตำแหน่ง เช่น “อยู่” “อยู่ที่” “ที่” “ถึง” “ไปถึง” ฯลฯ

4.6.3) คำอุปสรรค (Prefix) เป็นคำนำหน้าชื่อเฉพาะ เช่น มีคำว่า “โรงเรียน” “มหาวิทยาลัย” ก็มีแนวโน้มว่ามีโอกาสเป็นชื่อภูมิศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับสถานศึกษา

4.6.4) คำท้าย (Suffix) เป็นคำที่อยู่ท้ายชื่อซึ่งสื่อถึงประเภทของชื่อเฉพาะนั้น ๆ ได้ เช่น “วิทยาลัย” มีแนวโน้มที่จะเป็นชื่อภูมิศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับสถานศึกษา หรือ “ดีพาร์ทเมนต์สโตร์” ที่มีแนวโน้มจะเป็นห้างสรรพสินค้า

4.6.5) การสร้างอักษรานุกรมเพื่อนำมาเป็นหนึ่งในคุณลักษณะสำคัญของแบบจำลอง (Gazetteer) การสร้างอักษรานุกรมนำข้อมูลชื่อภูมิศาสตร์ของกรมแผนที่ทหารมาเป็นส่วนหนึ่งในการสร้างอักษรานุกรม อีกทั้งมีการใช้เทคนิคการขุดเว็บ (web scraping) จากแหล่งข้อมูลที่มีชื่อสถานที่หลากหลาย เช่น wongnai retty รวมทั้งข้อมูล open data จาก <https://data.go.th/> ซึ่งเป็นข้อมูลที่เข้าใช้งานได้แบบไม่มีค่าใช้จ่ายโดยผ่านการจัดทำจากหน่วยงานภาครัฐที่เป็นเจ้าของข้อมูล ตัวอย่างการใช้งานอักษรานุกรมชื่อภูมิศาสตร์ เช่น เรา สามารถรวบรวมรายชื่อเกี่ยวกับสถานศึกษา มาได้ดังนี้ [‘โรงเรียนกรุงเทพคริสเตียนวิทยาลัย’, ‘โรงเรียนสวนกุหลาบวิทยาลัย’, ‘โรงเรียนสตรีวิทยา’] ซึ่งมีการเก็บข้อมูลเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มของชื่อที่ไม่มีการตัดคำ และ กลุ่มที่มีการตัดคำ ตัวอย่างจากลิสต์ของชื่อสถานศึกษาข้างต้น เมื่อมีการตัดคำเก็บข้อมูลได้เป็น [[‘โรงเรียน’, ‘กรุงเทพ’, ‘คริสเตียน’, ‘วิทยาลัย’], [‘โรงเรียน’, ‘สวนกุหลาบ’, ‘วิทยาลัย’], [‘โรงเรียน’, ‘สตรี’, ‘วิทยา’]] โดยจะกล่าวถึงส่วนของการนำคุณลักษณะมาใช้สำหรับการสร้างแบบจำลองในส่วนถัดไป

4.6.6) คำข้างเคียงที่อยู่ติดกัน (n-gram) สำหรับนิยามของ n-gram คือของที่อยู่ติดกันเป็น n ลำดับ เช่น bi-gram หมายถึง คำสองคำที่อยู่ติดกัน ดังตัวอย่าง [‘โรงเรียน’, ‘กรุงเทพ’, ‘คริสเตียน’, ‘วิทยาลัย’] หากกำหนดให้คำว่า ‘คริสเตียน’ เป็นตำแหน่งที่ n คำว่า ‘กรุงเทพ’ ที่อยู่ก่อนหน้าจะเป็น n-1 และ ‘วิทยาลัย’ ซึ่งเป็นคำถัดไปจะอยู่ในตำแหน่งที่ n+1 ซึ่งสำหรับงานวิจัยนี้จะมีการใช้ quadigram หรือคำที่อยู่ก่อนหน้า ถัดไปมากที่สุด 4 คำ โดยจากม้งานวิจัยที่อธิบายเหตุผลหลักพบว่าในภาษาไทยหากคำอยู่ห่างกันมากกว่า 4 คำขึ้นไปจะมีความสัมพันธ์

กันน้อยมาก ดังนั้นใช้เพียง quadigram ก็เพียงพอแล้วสำหรับภาษาไทย [19]

4.6.7) คุณสมบัติอื่น ๆ นอกเหนือจากคุณสมบัติที่กล่าวถึงมาในข้างต้นแล้วยังมีคุณสมบัติอื่น ๆ ที่นำมาใช้เพิ่มเติมได้แก่ ความยาวของของคำ (word length) รูปแบบของคำ (word shape) เช่น มีตัวเลขประกอบในคำ มีการเว้นช่องว่างระหว่างคำ มีสัญลักษณ์เชื่อมคำ มีภาษาไทยผสมกับภาษาอังกฤษ การมีอักขระพิเศษ รวมทั้ง อีโมติคอนต่าง ๆ ประกอบอยู่ในคำด้วย แสดงตัวอย่างฟังก์ชันคุณสมบัติตามตารางที่ 2

ตารางที่ 2 : สรุปตัวอย่างฟังก์ชันคุณสมบัติที่ใช้ในงานวิจัย

Feature Function	Return of function
POS-tags	<NCMN>, ... , etc.
Preposition	word, False
Prefix	word, False
Suffix	word, False
gazetteer	word, False
N-gram	word, False
Space	True, False
Word length	28
Word shape	Eeedd_TTTTTT

จากตารางที่ 2 แสดงตัวอย่างของฟังก์ชันคุณสมบัติและตัวอย่างคำที่ฟังก์ชันคืนมา โดยสำหรับ POS-tagss จะใช้คลังคำสั่งจาก PyThaiNLP ซึ่งคืนค่า POS-tagss ของคำในรูปแบบ Orchid corpus, ฟังก์ชันบุพพทเชิงตำแหน่ง จนถึง N-gram ฟังก์ชันจะคืนค่ามาเป็นคำที่พบ แต่หากไม่เข้าเงื่อนไขกำหนดให้คืนค่าเป็น False เช่น หากมีคำที่อยู่ใน set ของคำดังต่อไปนี้ set([‘อยู่’, ‘อยู่ที่’, ‘ถึง’, ‘ไปถึง’, ‘มาถึง’, ‘มุ่งหน้า’, ‘เข้าสู่’, ‘เส้น’, ‘เยื้อง’, ‘ถัดไป’, ‘ถัดจาก’, ‘ตรงข้าม’, ‘ตรงกับ’, ‘ตรงข้ามกับ’, ‘.....’, ‘ติด’, ‘ติดกับ’, ‘ข้าง’, ‘ข้างหน้า’]) ให้คืนค่ากลับมาเป็นคำที่พบใน set ข้างต้น และสุดท้ายคือฟังก์ชันคุณสมบัติอื่น ๆ ได้แก่ ภายในคำมีช่องว่างหรือไม่, ความยาวของคำ เช่น คำว่า “สยามวัน” จะคืนค่ามาเป็นตัวเลขแทนด้วยจำนวนตัวอักษรของคำคือ 7 และรูปร่างของคำ ซึ่งในที่นี้คือ ประกอบไปด้วยตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวใหญ่หรือตัวเล็ก, ตัวอักษรภาษาไทย, ตัวเลข มีช่องว่างระหว่างตัวอักษรหรือไม่ เช่น คำว่า “ร้าน Coffeebeans สยามพารากอน” เมื่อผ่านฟังก์ชันรูปร่างของคำจะคืนค่าเป็น “TTTTEEEEEEEEEE_TTTTTTTTTT” เป็นต้น

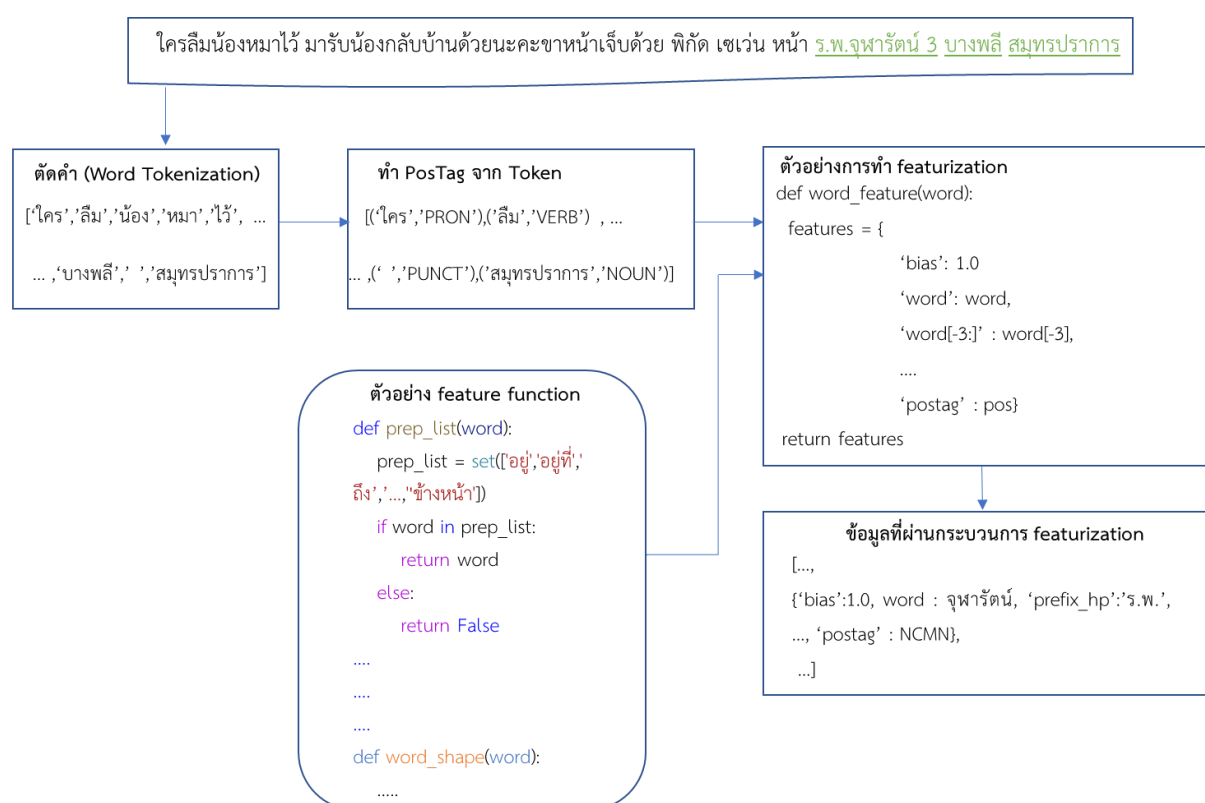
4.7) เครื่องมือที่ใช้ในการประมวลผล

ในหัวข้อนี้จะกล่าวโดยสรุปในส่วนของการโปรแกรม คำสั่งที่ใช้ รวมถึงทรัพยากรในการประมวลผล

4.7.1) ภาษาโปรแกรมและคำสั่งที่ใช้ในการทดลอง ในงานวิจัยนี้ใช้ภาษาไพธอนเป็นภาษาหลัก โดยมีการใช้คำสั่งจาก scikit-learn และ sklearn-crfsuite เพื่อสร้างแบบจำลอง

CRF รวมถึงคำสั่งจาก pythnlp เพื่อประมวลผลข้อความเบื้องต้นและตัดคำ (tokenization)

4.7.2) เครื่องมือที่ใช้ในการประมวลผล เป็น gaming laptop dell inspiron 7559; ram 16 gb; gpu nvidia geforce gtx 960m; เวลาที่ใช้ในการฝึกฝนแบบจำลอง 3 ชม. 30 นาที



รูปที่ 2 : แสดงตัวอย่างการสร้างฟังก์ชันคุณลักษณะ (featurization)

จากรูปที่ 2 แสดงตัวอย่างขั้นตอนการเตรียมข้อมูลและการทำ featurization ได้เรียงจากการตัดคำในแต่ละประโยคด้วย newmm หรือ arttcut จาก PyThaiNLP หลังจากนั้นจึงติด POS-tags ด้วยรูปแบบของ Orchid corpus และติดฉลากตามรูปแบบของ IOB tags พร้อมทั้งจัดรูปแบบของข้อมูลที่ใช้ในการฝึกฝนและทดสอบแบบจำลองในรูปแบบ Conll2003 หลังจากนั้นจึงจะนำข้อมูลผ่านฟังก์ชันคุณลักษณะที่สร้างเตรียมไว้ โดยผลลัพธ์จากขั้นตอนนี้เมื่อทำ featurization จะออกมาเป็นข้อมูลแบบ dictionary ซึ่งเก็บ key เป็นชื่อฟังก์ชันที่ใช้ และ value เป็นส่วนที่ฟังก์ชันได้คืนค่ากลับมาดังแสดงตัวอย่างไว้ในหัวข้อย่อยที่ 4.6.7

5) ผลการวิจัยและอภิปรายผล

การจำแนกข้อมูลชื่อภูมิศาสตร์ออกจากข้อความโดยใช้แบบจำลองคอนดิชันนอลแรนดอมฟิลด์แบ่งผลลัพธ์ในการจำแนกออกเป็นกลุ่มตามคุณลักษณะที่มีแนวโน้มจะส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของแบบจำลอง

5.1) การประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลอง

ในงานวิจัยนี้เลือกใช้เมตริกซ์ 3 ตัว คือ ความแม่นยำ (precision), ความครบถ้วน (recall) และ ความถูกต้องโดยรวม (F1) ซึ่งในการประเมินจะประเมินจากความถูกต้องในระดับคำ (phrase level) พร้อมทั้งมีความถูกต้องในระดับ token แสดงไว้ควบคู่กัน แต่ประสิทธิภาพจะยึดตามความถูกต้องในระดับคำเป็นหลัก

$$\text{Precision} = \frac{TP}{TP+FP} \quad (1)$$

$$\text{Recall} = \frac{TP}{TP+FN} \quad (2)$$

$$\text{F1-Score} = 2 * \frac{\text{Precision} * \text{Recall}}{\text{Precision} + \text{Recall}} \quad (3)$$

โดย TP คือ จำนวนข้อมูลที่แบบจำลองสกัดออกมาได้ตรงกับข้อมูลกำกับ

FP คือ จำนวนข้อมูลที่ไม่ได้มีการกำกับไว้แต่แบบจำลองสกัดออกมา

FN คือ จำนวนข้อมูลที่มีการกำกับไว้แต่แบบจำลองไม่สามารถสกัดออกมาได้

สำหรับการประเมินประสิทธิภาพด้วย F1-Token เพียงอย่างเดียวยังไม่ถูกต้องครบถ้วนนักเนื่องจากการสร้างแบบจำลองเราต้องการที่จะสกัดชื่อภูมิศาสตร์ทั้งชื่อออกมาจากข้อความไม่ใช่เพียงแค่ส่วนใดส่วนหนึ่งของชื่อ ตัวอย่างเช่น การหาค่า F1-Token ประโยคว่า “วิวแม่น้ำโขงนครพนมสวยสุดละ นี่ชอบมาก” แสดงตัวอย่างตามรูปที่ 3

หน่วยของคำ	คำที่กำกับ	คำที่ทำนาย	
วิว	○	B-NAT	FP
แม่น้ำ	B-NAT	B-NAT	TP
โขง	I-NAT	○	FN
นครพนม	B-ADMIN	B-ADMIN	TP
สวย	○	○	
สุดละ	○	○	
นี่	○	○	
ชอบมาก	○	○	

รูปที่ 3 : แสดงตัวอย่างการหาค่า F1-Token

จากรูปที่ 3 คำนวณ F1-Token ได้ดังนี้ TP = 2, FP = 1, FN = 1 Precision = 2/(2+1), Recall = 2/(2+1), F1 = 2*[(0.67*0.67)/(0.67+0.67)] = 0.34 และสำหรับ F1-Phrase ข้อมูลกำกับที่มี 2 token นั้นจะถูกรวมเป็น tag เดียว ซึ่งถ้ามีส่วนใดส่วนใดของ token ผิดไปให้ถือว่าคำตอบที่ได้จากแบบจำลองผิด เช่น (แม่น้ำ, B-NAT), (โขง, I-NAT), (นครพนม, B-ADMIN) จะรวม token และ tag เป็น แม่น้ำโขง, NAT และ นครพนม,

ADMIN ซึ่งจากรูปที่ 3 สำหรับคำว่าแม่น้ำโขง แบบจำลองให้คำตอบ token สุดท้ายผิดจึงถือว่าแบบจำลองให้คำตอบที่ผิดในกรณีนี้ จากตัวอย่างค่าที่คำนวณ F1-Phrase ได้จาก TP = 1, FP = 1, FN = 1, Precision = 1/(1+1), Recall = 1/(1+1), F1 = 2*[(0.5*0.5)/(0.5+0.5)] = 0.25 จากตัวอย่างข้างต้นจะพบว่าควรพิจารณาที่ระดับ F1-Phrase มากกว่า เนื่องจากผลลัพธ์สุดท้ายของแบบจำลองชื่อภูมิศาสตร์ที่ครบสมบูรณ์

5.2) ประสิทธิภาพของแบบจำลองสกัดชื่อภูมิศาสตร์จากข้อความ

โดยแสดงผลพร้อมตารางที่ 2 ซึ่งทุกกลุ่มนั้นจะมีพื้นฐานอยู่บนแบบจำลอง CRF มีฟังก์ชัน optimizer คือ LBFGS มีการใช้ฟังก์ชันคุณลักษณะค่านำหน้า คำตามหลัง รูปร่างของคำ และหน้าที่ของคำ (POS-tags) โดยผลจากการจำแนกในงานวิจัยแบ่งออกเป็นกลุ่มตามฟังก์ชันคุณลักษณะดังนี้

ตารางที่ 3 : แสดงการเปรียบเทียบค่าความถูกต้องโดยรวมระหว่างฟังก์ชันคุณลักษณะในแบบจำลอง CRF

Tokenize Library	Gram	Gazetteer	F1-Token	F1-Phrase
newmm	3	-	0.909	0.881
newmm	3	✓	0.91	0.882
newmm	4	-	0.908	0.885
newmm	4	✓	0.908	0.885
attacut	3	-	0.95	0.938
attacut	3	✓	0.956	0.946
attacut	4	-	0.951	0.941
attacut	4	✓	0.956	0.946

จากตารางที่ 3 กลุ่มของแบบจำลองจะแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มจากอัลกอริทึมที่ใช้ตัดคำ คือ newmm และ attacut โดยพบว่าแบบจำลองที่ใช้ attacut เป็นตัวตัดคำให้ค่าความถูกต้องโดยรวมในระดับค่าสูงกว่า newmm คือ 0.946 ส่วน newmm คือ 0.885 โดยแบบจำลองที่ใช้ตัวตัดคำ newmm นั้นพบว่า แบบจำลองที่ใช้ 4 gram จะใช้ gazetteer เป็นคุณลักษณะหรือไม่ ก็ให้ค่า F1-Phrase เท่ากันทั้ง 2 แบบ คือ 0.885 และสำหรับกลุ่มที่ใช้ตัวตัดคำเป็น attacut พบว่า 3 gram หรือ 4 gram และจากแบบจำลองที่ให้ค่าความถูกต้องโดยรวมสูงที่สุด แสดงผลความถูกต้องของการจำแนกแยกตามประเภทของชื่อภูมิศาสตร์ ตามตารางที่ 4

ตารางที่ 4 : แสดงรายละเอียดการจำแนกชื่อภูมิศาสตร์ตามชนิดของสถานที่

TAG	ความหมาย	Precision	Recall	F1
ACP	สถานศึกษา	0.946	0.946	0.946
ADMIN	ขอบเขตการปกครอง	0.964	0.951	0.958
BSN	อาคารสำนักงาน	0.913	0.808	0.857
DEP	ห้างสรรพสินค้า-ขนาดใหญ่	0.949	0.903	0.925
FPLACE	สถานที่ที่อยู่นอกประเทศไทย	0.956	0.869	0.91
GOV	สำนักงาน สถานที่ราชการ	1.0	0.84	0.913
HP	สถานพยาบาล	1.0	0.958	0.979
MKT	ตลาด	1.0	1.0	1.0
MON	อนุสาวรีย์ วงเวียน	1.0	1.0	1.0
NAT	สถานที่ตามธรรมชาติ	0.909	0.909	0.909
RCT	สวนสาธารณะ สวนสนุก สนามกีฬา สถานที่สันทนาการต่าง ๆ	0.87	0.909	0.889
RES	สถานที่พักอาศัย	0.964	0.9	0.931
ROAD	ถนน ซอย	0.979	0.903	0.94
RP	สถานที่สำคัญทางศาสนา	0.962	0.98	0.971
RT	ร้านอาหาร	0.946	0.953	0.95
STORE	ร้านค้าขนาดย่อม	1.0	0.917	0.957
TRAN	สถานีขนส่งมวลชน ท่ารถ สถานีรถไฟ รถไฟฟ้า ท่าเรือ	0.925	0.949	0.937
OTHER	สถานที่อื่น ๆ	1.0	1.0	1.0

จากตารางที่ 4 ความถูกต้องโดยรวมซึ่งสำหรับตารางนี้จะกล่าวถึง F1-Phrase เพียงอย่างเดียว เนื่องจากการสกัดคำที่ครบถ้วนแล้วออกมาจากประโยค ของชื่อภูมิศาสตร์ที่เป็น ตลาด อนุสาวรีย์ หรือสถานที่อื่น ๆ มีความถูกต้องโดยรวมที่สูงมากกว่าขั้นข้อมูลอื่น F1 คือ 1.0 ทั้งนี้เนื่องจาก ตลาดมักมีคำหน้าขึ้นต้นด้วย “ตลาด” เป็นคุณลักษณะที่เด่นชัดจึงแยกออกจากข้อมูลอื่นได้ง่าย ส่วนชนิดของสถานที่ที่ค่า F1 น้อยที่สุด คืออาคารสำนักงาน (BSN) คือ 0.857 ทั้งนี้เนื่องจากเป็นชื่อที่ค่อนข้างมีความหลากหลายและกำกวมระหว่างชื่อบุคคล รวมถึงชื่อหน่วยงาน องค์กรต่าง ๆ อย่างทวีตเตอร์

5.3) Transition Score and Feature Learns

ซึ่งในหัวข้อนี้จะเป็นการสรุปภาพรวมของความน่าจะเป็นของแบบจำลองในการทำนาย tag ของชื่อภูมิศาสตร์ ว่าหากมี tag ไหนที่มีค่า transition สูงจะแสดงว่าแบบจำลองมีโอกาสที่จะคล้อยตามในแต่ละ tag นั้นและส่วนของ feature learns จะเป็นการแสดงผลของคุณลักษณะที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของแบบจำลอง โดยในหัวข้อนี้จะแสดงใน 30 ลำดับแรกของคุณลักษณะที่แบบจำลองเรียนรู้แสดงตามตารางที่ 5 6 และ 7

โดยจากตารางที่ 5 tag ที่ให้ค่า likely transition สูงที่สุด I-MKT -> I-MKT ซึ่งเป็น tag ที่เป็นส่วนย่อยของความถึงชื่อตลาด พบว่าสอดคล้องกับ MKT ที่ให้ค่า F1 = 1.0 หรือ 100% และลำดับที่ 2 กับ 3 คือ B-TRAN -> I-TRAN และ B-RES -> I-RES โดย TRAN และ RES ให้ค่า F1 เป็น 0.937 และ 0.931 ตามลำดับ

จากตารางที่ 7 ซึ่งเป็นส่วนของคุณลักษณะที่แบบจำลองเรียนรู้ได้ พบว่าใน 30 อันดับแรกซึ่งเป็นผลบวกกับแบบจำลองมักจะเป็นคุณลักษณะที่เป็น n-gram และคำนั้น ๆ โดยพบว่าเป็นคำก่อนหน้า 3 คำ (word[-3]) มากที่สุด รองลงมาคือคำก่อนหน้า 2 คำ (word[-2]) เมื่อสรุปจาก ตาราง feature learns จึงพบว่า n-gram แบบ quadigram ให้ผลบวกกับค่าความน่าจะเป็นของแบบจำลองสูงที่สุด และอีกคุณลักษณะหนึ่งที่น่าสนใจคือ รูปร่างของคำ หรือ ฟังก์ชัน shape_word พบว่าให้ผลที่ดีกับ tag ที่เป็น B-ADMIN และ B-ROAD ซึ่งสันนิษฐานได้ว่า ชื่อขอบเขตการปกครอง เช่น จังหวัด อำเภอ หรือตำบล มักจะมีอักษรย่อหน้าหน้าแล้วตามด้วยจุด เช่น ‘อ.พ.พ.ระ’ เมื่อผ่านฟังก์ชันนี้จะให้ค่าเป็น T.TTTTTT เมื่อแบบจำลองเจอคุณลักษณะนี้จึงเข้าใจได้ง่ายขึ้นว่าเป็น ADMIN รวมทั้ง tag ที่เป็นถนนซึ่ง มักจะมีตัวเลข

ต่อท้ายหรือเป็นส่วนประกอบอยู่ภายในคำ เช่น ‘ซอยลาดพร้าว 60’
เมื่อผ่านฟังก์ชันรูปร่างของคำจะคืนค่าเป็น TTT.TTTTTT_dd
เป็นต้น

ตารางที่ 5 : แสดงรายละเอียดของคำ transition ที่คล้ายตามกัน

Tag	Target tag	ค่า transition
I-MKT	I-MKT	7.166
B-TRAN	I-TRAN	6.979
B-RES	I-RES	6.927
I-NAT	I-NAT	6.713
B-GOV	I-GOV	6.633
I-ACP	I-ACP	6.603
B-MKT	I-MKT	6.599
I-ADMIN	I-ADMIN	6.516
B-DEP	I-DEP	6.491
I-OTHER	I-OTHER	6.478
I-GOV	I-GOV	6.472
B-HP	I-HP	6.391
I-TRAN	I-TRAN	6.379
B-ACP	I-ACP	6.321
B-RT	I-RT	6.316
I-RCT	I-RCT	6.304
I-RP	I-RP	6.291
I-RES	I-RES	6.278
I-STORE	I-STORE	6.239

ตารางที่ 6 : แสดงรายละเอียดของคำ transition ที่ไม่คล้ายตามกัน

Tag	Target tag	ค่า transition
I-BSN	I-RT	-1.809
I-ROAD	B-ROAD	-2.241
O	I-MON	-3.078
O	I-OTHER	-3.975
O	I-MKT	-4.825
O	I-NAT	-4.919
O	I-ADMIN	-5.694
O	I-TRAN	-5.789
O	I-GOV	-5.989
O	I-ACP	-6.024
O	I-FPLACE	-6.125
O	I-RES	-6.165
O	I-RCT	-6.272
O	I-HP	-6.385

ตารางที่ 6 : แสดงรายละเอียดของคำ transition ที่ไม่คล้ายตามกัน (ต่อ)

Tag	Target tag	ค่า transition
O	I-STORE	-6.451
O	I-DEP	-6.699
O	I-RP	-6.713
O	I-BSN	-6.822
O	I-ROAD	-6.985
O	I-RT	-8.325

ตารางที่ 7 : แสดงรายละเอียดคุณลักษณะที่แบบจำลองเรียนรู้

Tag	Feature	Feature score
B-RCT	word:ราชมัง	4.449
B-ROAD	-1:word:โครตไฮลาดพร้าว	3.342
O	word[-3:]:	3.329
O	BOS	3.284
B-RP	word[-3:]:หาร	3.254
B-RCT	word[-3:]:มั่ง	3.202
B-TRAN	word:สนามบินดอนเมือง	3.058
O	word:	3.015
O	word.shape_word():	3.015
B-DEP	word[-3:]:gna	2.911
B-ADMIN	word:กทม	2.789
B-ADMIN	word.shape_word():T.TTTTTTTT	2.750
B-RT	word:บ้านหิรัญกุล	2.733
B-ACP	word[-3:]:ตร์	2.642
B-DEP	word[-3:]:กอน	2.634
B-DEP	word[-2:]:bk	2.632
B-DEP	word:เอ็มควา5555	2.619
B-DEP	-2:word:พิกิต	2.600
B-ROAD	word.shape_word():TTTTTdd	2.589
O	word[-2:]:55	2.578
B-ADMIN	word[-3:]:uri	2.562
B-ADMIN	word.shape_word():T.TTTTTTT	2.542
O	word:มุงหน้า	2.536
O	word.prep_list():มุงหน้า	2.536
B-ACP	word[-3:]:ชตร	2.529
B-ROAD	word[-3:]:ลิม	2.518
B-DEP	-1:word:สยามสแควร์	2.504
O	word.shape_word():TTTT.....T	2.492
B-FPLACE	word[-3:]:ซาน	2.479
B-RCT	word:สวนจตุจักร	2.473

5.4) การเปรียบเทียบกับแบบจำลองอื่น

เนื่องจากแบบจำลองอื่นหรือเครื่องมือที่เป็นมาตรฐานทางด้านการรู้จำชื่อเฉพาะ (standard ner tools) ไม่ได้มีการแบ่งประเภทของชื่อภูมิศาสตร์ไว้ดังเช่นงานวิจัยนี้จึงไม่สามารถนำมาใช้ได้ทันที ดังนั้นผู้วิจัยจึงนำเอาคุณลักษณะที่แบบจำลองนั้นใช้หากเป็นแบบจำลอง CRF เหมือนกัน และนำสถาปัตยกรรมพร้อมทั้งพารามิเตอร์มาใช้หากเป็นโครงข่ายประสาทเทียม โดยนำมาจาก thai-ner CRF ของ PyThaiNLP , Bi-LSTM และ Bi-LSTM-CRF [15] แสดงตัวอย่างตามตารางที่ 8

ตารางที่ 8 : แสดงรายการเปรียบเทียบค่าความถูกต้องโดยรวมของแบบจำลอง CRF+attacut+4 gram กับแบบจำลองอื่น

Model	Detail	F1-Token	F1-Phrase
1	CRF+attacut+4 gram	0.956	0.946
2	CRF (PyThaiNLP)	0.894	0.80
3	Bi-LSTM	0.91	0.827
4	Bi-LSTM-CRF [15]	0.92	0.87

จากตารางที่ 8 มีการเปรียบเทียบค่าความถูกต้องโดยรวมหรือ F1 กับอีก 3 แบบจำลอง โดยมีแบบจำลอง CRF ของ PyThaiNLP, แบบจำลอง Bi-LSTM และ Bi-LSTM-CRF [15] ซึ่งสำหรับแบบจำลองที่ 2 CRF ของ PyThaiNLP นั้นใช้ฟังก์ชันคุณลักษณะดังนี้คือ คุณลักษณะของ n-gram ใช้เป็น bi-gram ตรวจสอบว่าเป็นคำภาษาไทยทั้งหมดหรือไม่, คำพุ่มเพื่อย, ช่องว่างภายในคำ, เป็นตัวเลขหรือไม่ และสุดท้ายคือ POS-tags ให้ค่า F1-phrase อยู่ที่ 0.8 สำหรับแบบจำลองที่ 3 ซึ่งเป็น Bi-LSTM นั้นใช้ word embeddings จาก Thai2vec [4] มีพารามิเตอร์ดังนี้ จำนวน neuron 256 neuron, drop out 0.3, adam optimize, จำนวนในการฝึกฝนแบบจำลอง 50 epochs ให้ค่า F1-phrase อยู่ที่ 0.827 และสุดท้ายแบบจำลองที่ 4 Bi-LSTM-CRF ซึ่งอ้างอิงสถาปัตยกรรมจาก [15] โดยเป็นการใช้ word embeddings จาก Thai2vec ร่วมกับการทำ character embeddings มีพารามิเตอร์ดังนี้ จำนวน neuron 256 neuron, drop out 0.5, adam optimize, จำนวนในการฝึกฝนแบบจำลอง 50 epochs ให้ค่า F1-phrase อยู่ที่ 0.87

6) สรุปผล

ในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นในการสร้างแบบจำลองเพื่อสกัดข้อมูลชื่อภูมิศาสตร์จากข้อความภาษาไทยที่อยู่บนสื่อสังคมออนไลน์อย่าง

ทวิตเตอร์ โดยจากการนำอัลกอริทึม CRF มาใช้งานพบว่าให้ความถูกต้องในการสกัดเอาชื่อทางภูมิศาสตร์ออกมาได้มีความถูกต้องซึ่งสามารถนำไปใช้งานได้ และการจำแนกชนิดของชื่อสถานที่ก็ทำได้มีความถูกต้องสูงในหลายชั้นข้อมูล (>0.9) ซึ่งชั้นข้อมูลที่มีปัญหามากกว่าชั้นข้อมูลอื่นคือ BSN หรืออาคารสำนักงาน เนื่องจากลักษณะการตั้งชื่อของภาษาไทยไม่ได้มีกฎตายตัว รวมทั้งอาจมีความกำกวมกับชื่อเฉพาะแบบอื่น ทั้งชื่อองค์กร หรือบุคคล เช่น “เล่า เป้ง จ้วน” หากไม่มี gazetteer เป็นตัวช่วยในการกำหนดคุณลักษณะอาจจะไม่สามารถสกัดชื่ออาคารออกมาจากข้อความได้ แต่หากเขียนเป็น “อาคารเล่าเป้งจ้วน” จะสามารถสกัดข้อมูลออกมาได้เนื่องจากมีคำอุปสรรคว่า “อาคาร” เป็นคุณลักษณะที่กำกับอยู่ ซึ่งงานวิจัยนี้มีการสร้างคุณลักษณะที่มีสมมติฐานว่ามีความเหมาะสมกับข้อมูลชื่อภูมิศาสตร์ โดยจากการวิเคราะห์สิ่งที่แบบจำลองเรียนรู้พบว่าฟังก์ชันที่เป็นบัพทที่ใช้ระบุตำแหน่งให้ผลเชิงบวกกับค่าความน่าจะเป็นของแบบจำลอง CRF ที่ให้ค่าความถูกต้องโดยรวมดีที่สุดในงานวิจัยนี้ รวมทั้งฟังก์ชันรูปร่างของคำ

จากการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลอง CRF ที่ให้ค่า F1 ดีที่สุดในงานวิจัยนี้กับแบบจำลองอื่นทั้ง CRF ของ PyThaiNLP กับ CRF ในงานวิจัยนี้ที่มีการสร้างคุณลักษณะต่างกัน โดยในงานวิจัยนี้มีการสร้างคุณลักษณะโดยเน้นที่ข้อมูลเชิงภูมิศาสตร์แบบจำเพาะจึงเป็นเหตุผลที่ทำให้สามารถปรับใช้กับข้อมูลชนิดนี้ได้ดีกว่าขณะที่แบบจำลองอื่นสร้างขึ้นเพื่อการใช้งาน NER โดยทั่วไป และอีกประการหนึ่งคลังข้อมูลในงานวิจัยนี้มีขนาดไม่ใหญ่มากทำให้การใช้แบบจำลอง CRF ให้ผลที่ดีกว่าหรือใกล้เคียงกันกับโครงข่ายประสาทเทียมซึ่งในอนาคตหากมีการเก็บรวบรวมข้อมูลที่มากขึ้นอาจจะมีผลทำให้ผลการวิจัยต่างไปจากนี้

จากงานวิจัยนี้พบว่าการสกัดข้อมูลชื่อภูมิศาสตร์เฉพาะในภาษาไทยนั้นจำเป็นที่จะต้องมีการสร้างฟังก์ชันคุณลักษณะที่จำเพาะเจาะจงกับงานทางด้านนี้โดยเฉพาะ เช่น บัพทระบุตำแหน่ง รูปร่างของคำ หรืออักขรानุกรม (gazetteer) มาใช้เป็นหนึ่งของคุณลักษณะที่สำคัญเนื่องจากเป็นโจทย์ที่เฉพาะทางซึ่งในอนาคตหากมีการสร้างคลังข้อมูลที่มีขนาดใหญ่ขึ้น หรือมีการสกัดคุณลักษณะสำคัญร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียม หรือการนำ transfer learning เช่น BERT มาใช้งานอาจทำให้ได้ผลลัพธ์ที่ดีมากขึ้นในอนาคต

REFERENCES

- [1] S. Kemp. "DATAREPORTAL." DATAREPORTAL.com <https://datareportal.com/reports/digital-2021-thailand> (accessed Jan. 2, 2022).
- [2] S. Hahmann and D. Burghardt, "How much information is geospatially referenced? Networks and cognition," *Int. J. Geogr. Inf. Sci.*, vol. 27, no. 6, pp. 1171–1189, 2013, doi: 10.1080/13658816.2012.743664.
- [3] M. Gritta, M. T. Pilehvar, N. Limsopatham, and N. Collier, "What's missing in geographical parsing?," *Lang. Resour. Eval.*, vol. 52, no. 2, pp. 603–623, 2018, doi: 10.1007/s10579-017-9385-8.
- [4] W. Phatthiyaphaibun, K. Chaovavanich, C. Polpanumas, A. Suriyawongkul, L. Lowphansirikul, and P. Chormai, "PyThaiNLP: Thai Natural language processing in Python." 2016. Distributed by Zenodo. doi: 10.5281/zenodo.3519354.
- [5] J. Lingad, S. Karimi, and J. Yin, "Location extraction from disaster-related microblogs," in *Proc. 22nd Int. Conf. World Wide Web*, Rio de Janeiro, Brazil, May 2013, pp. 1017–1020.
- [6] J. Wang, Y. Hu, and K. Joseph, "NeuroTPR: A neuro-net toponym recognition model for extracting locations from social media messages," *Trans. GIS*, vol. 24, no. 3, pp. 719–735, 2020.
- [7] J. A. de Bruijn, H. de Moel, B. Jongman, J. Wagemaker, and J. C. J. H. Aerts, "TAGGS: Grouping tweets to improve global geoparsing for disaster response," *J. Geovis. Spat. Anal.*, vol. 2, 2017, doi: 10.1007/s41651-017-0010-6.
- [8] M. D. Lieberman and H. Samet, "Multifaceted toponym recognition for streaming news," in *Proc. 34th Int. ACM SIGIR Conf. Res. and Develop. Inf. Retrieval*, Beijing, China, Jul. 2011, pp. 843–852.
- [9] J. R. Finkel, T. Grenager, and C. Manning, "Incorporating non-local information into information extraction systems by gibbs sampling," in *Proc. 43rd Annu. Meeting Assoc. for Comput. Linguistics*, Ann Arbor, MI, USA, Jun. 2005, pp. 363–370.
- [10] R. Chasin, D. Woodward, J. Witmer, and J. Kalita, "Extracting and displaying temporal and geospatial entities from articles on historical events," *Comput. J.*, vol. 57, no. 3, pp. 403–426, Mar. 2014.
- [11] M. Sagcan and P. Karagoz, "Toponym recognition in social media for estimating the location of events," in *Proc. IEEE Int. Conf. Data Mining Workshop (ICDMW)*, Atlantic City, NJ, USA, Nov. 2015, pp. 33–39.
- [12] H. Chanlekha, A. Kawtrakul, P. Varasrai, and I. Mulasas, "Statistical and heuristic rule based model for Thai named entity recognition," 2002. [Online]. Available: <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.295.7088>
- [13] H. Chanlekha and A. Kawtrakul, "Thai named entity extraction by incorporating maximum entropy model with simple heuristic information," 2004. [Online]. Available: <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.64.1449>
- [14] N. Tirasaroj and W. Aroonmanakun, "Thai named entity recognition based on conditional random fields," in *Proc. 8th Int. Symp. Natural Lang. Process.*, Oct. 2009, pp. 216–220, doi: 10.1109/SNLP.2009.5340913.
- [15] S. Thattinaphanich and S. Prom-on, "Thai named entity recognition using Bi-LSTM-CRF with word and character representation," in *4th Int. Conf. Inf. Technol. (InCIT)*, Bangkok, Thailand, Oct. 2019, pp. 149–154.
- [16] C. Sutton and A. McCallum, "An introduction to conditional random fields," *Found. Trends Mach. Learn.*, vol. 4, no. 4, pp. 267–373, Apr. 2012.
- [17] P. Chormai, P. Prasertsom, J. Cheevaprawatdomrong, and A. Rutherford, "Syllable-based neural Thai word segmentation," in *Proc. 28th Int. Conf. Comput. Linguistics*, Barcelona, Spain, Dec. 2020, pp. 4619–4637.
- [18] L. Ramshaw and M. Marcus, "Text chunking using transformation-based learning," in *Proc. 3rd Workshop on Very Large Corpora*, Cambridge, MA, USA, Jun. 1995, pp. 82–94.
- [19] A. Ekwonganan, "Identification of Thai and transliterated words by N-gram models," M.S. thesis, Linguistics Dept., Chulalongkorn Univ., Bangkok, Thailand, 2005.

วงจรกรองสัญญาณอนเนกประสงค์แบบหนึ่งอินพุตห้าเอาต์พุต โดยใช้วงจร VDTA

จิรพันธ์ พิมพ์พล¹ จักรกริช ปานเรือนแสน² อรพิน ชาญนำสิน^{3*} วรพงศ์ ตั้งศรีรัตน์⁴

^{1,2,3*} คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น, ขอนแก่น, ประเทศไทย

⁴ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพมหานคร, ประเทศไทย

*ผู้ประพันธ์บรรณกิจ อีเมล : orapin.ch@rmuti.ac.th

รับต้นฉบับ: 31 มีนาคม 2565; รับบทความฉบับแก้ไข: 29 กรกฎาคม 2565; ตอบรับบทความ: 6 ตุลาคม 2565

เผยแพร่ออนไลน์: 22 ธันวาคม 2565

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการสังเคราะห์วงจรกรองสัญญาณอนเนกประสงค์อันดับสองแบบหนึ่งอินพุตและห้าเอาต์พุต วงจรที่นำเสนอทำงานในโหมดแรงดัน โดยนำวงจร VDTA มาใช้เป็นอุปกรณ์แอคทีฟหลัก สามารถสังเคราะห์ฟังก์ชันกรองสัญญาณได้ครบทั้งห้ารูปแบบพร้อมกันได้แก่ ฟังก์ชันกรองสัญญาณแบบกรองผ่านความถี่ต่ำ (LP) กรองผ่านแถบความถี่ (BP) ผ่านความถี่สูง (HP) ตัดแถบความถี่ (BS) และกรองผ่านทุกความถี่ (AP) โดยไม่ต้องปรับเปลี่ยนโครงสร้างของวงจร นอกจากนี้วงจรกรองสัญญาณที่นำเสนอยังสามารถปรับค่าความถี่เชิงมุมธรรมชาติและตัวประกอบคุณภาพของวงจรได้อิสระต่อกันด้วยวิธีการทางอิเล็กทรอนิกส์ และได้ทำการจำลองคุณลักษณะการทำงานของวงจรกรองสัญญาณดังกล่าวด้วยโปรแกรม PSpice โดยใช้เทคโนโลยีซีมอส 0.25 ไมครอน อีกทั้งยังได้ต่อวงจรทดสอบการทำงานของวงจรที่นำเสนอโดยใช้ไอซีเบอร์ CA3080 ซึ่งผลการแปรค่าความถี่เชิงมุมธรรมชาติจะเห็นได้ว่าไม่ส่งผลต่อค่าตัวประกอบคุณภาพ โดยพบค่าความผิดพลาดเฉลี่ยเท่ากับ 3.727% จากการพิจารณาความผิดเพี้ยนของฮาร์มอนิก (THD) ของผลตอบสนองแบบ BP พบว่า THD มีค่าสูงสุดเท่ากับ 10.782% นอกจากนี้ยังพบว่าการทำงานของวงจรกรองสัญญาณที่นำเสนอเมื่ออุณหภูมิเกิดการเปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 0 °C ถึง 100 °C มีค่าความเบี่ยงเบนสูงสุดเท่ากับ 16.98% ที่อุณหภูมิ 100 °C รวมทั้งทำการวิเคราะห์ผลการทำงานของวงจรทางสถิติด้วยวิธี Monte Carlo ผลที่ได้พบว่าแนวโน้มของความถี่เชิงมุมธรรมชาติมีความผิดพลาดเพียง 0.189% เท่านั้น ซึ่งผลที่ได้ทั้งหมดจากการจำลองและการต่อวงจรทดลองมีความสอดคล้องกับทฤษฎีที่นำเสนอ

คำสำคัญ : วงจรกรองสัญญาณแบบหนึ่งอินพุตห้าเอาต์พุต วงจรกรองสัญญาณอนเนกประสงค์ วงจร VDTA วงจรโหมดแรงดัน

Universal Filter with Single Input and Five Outputs Employing VDTAs

Jirapun Pimpol¹ Chakkrich Panrueansan² Orapin Channumsin^{3*} Worapong Tangsrirat⁴

^{1,2,3*}Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Isan Khon Kaen Campus, Khon Kaen, Thailand

⁴School of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand

*Corresponding Author. E-mail address: orapin.ch@rmuti.ac.th

Received: 31 March 2022; Revised: 29 July 2022; Accepted: 6 October 2022

Published online: 22 December 2022

Abstract

This article introduces the synthesis of single-input five-output universal filter employing VDTA as the major active component. The proposed universal filter operates voltage-mode and it can also generate the five filter functions, namely lowpass (LP), bandpass (BP) highpass (HP) bandstop (BS) and allpass (AP) responses simultaneously without modifying the circuit configuration. The proposed filter achieves the electronically and orthogonal variation of the significant parameter natural angular frequency and the quality factor. Detail analysis of non-ideal VDGA effects and circuit component sensitivity are included. The achievement of the filter circuit is demonstrated with PSPICE simulations based on TSMC 0.25 microns CMOS technology and experimental workability employing IC CA3080. Further, the tuning results of natural angular frequency without affecting the quality factor have an average error of 3.727%. The total harmonic distortion (THD) of BP filter response has been investigated that the maximum THD values of 10.782%. Moreover, the work results when the temperature discretely run between 0 °C to 100 °C, it illustrates that the maximum deviation of temperature at 100 °C is equal to 16.98%. In addition, the operational analysis of the proposed filter with Monte Carlo method which the trend of natural angular frequency was approximately 1.593 MHz with only 0.189% of relative error. The all simulation and experimental results of the filter circuit are the corresponding to the proposed theoretical.

Keywords: Single-input five-output (SIFO), Universal filter, VDTA element, Voltage-mode circuit

1) บทนำ

หลายสิบปีที่ผ่านมาเมื่อกล่าวถึงวงจรที่ใช้ในการประมวลสัญญาณแอนะล็อก อาทิเช่น วงจรอินทิเกรเตอร์ วงจรกรองสัญญาณ วงจรออสซิลเลเตอร์ และวงจรเลียนแบบอุปกรณ์ เป็นต้น การออกแบบและสังเคราะห์วงจรดังกล่าวเหล่านี้โดยใช้อุปกรณ์แอคทีฟประเภทต่าง ๆ ได้มีการนำเสนอและตีพิมพ์กันอย่างกว้างขวาง [1]–[13] และเมื่อไม่นานมานี้ อุปกรณ์แอคทีฟที่ชื่อว่า วงจร VDTA (voltage differencing transconductance amplifier) [14] ซึ่งเป็นอุปกรณ์แอคทีฟประเภทหนึ่งที่ได้รับคามนิยมเป็นอย่างมาก โครงสร้างของวงจร VDTA นั้นประกอบด้วยวงจรแหล่งจ่ายกระแสที่ควบคุมด้วยแรงดัน (voltage-controlled current source; VCCS) จำนวนสองวงจรผนวกเข้าด้วยกัน โดยวงจร VDTA ได้อาศัยหลักการทำงานของวงจร VCCS ซึ่งมีคุณลักษณะที่น่าสนใจ คือ สามารถแปรค่าพารามิเตอร์หลักของวงจรด้วยวิธีการทางอิเล็กทรอนิกส์จากการปรับอัตราขยายค่าความนำ (transconductance gain) ของวงจร อีกทั้งจากคุณลักษณะดังกล่าวสามารถนำไปสู่การลดจำนวนอุปกรณ์ในการออกแบบและสังเคราะห์วงจรได้อีกด้วย ในช่วงระยะเวลาที่ผ่านมาหากพิจารณาถึงวงจรกรองสัญญาณที่มีโครงสร้างแบบหนึ่งอินพุตและหลายเอาต์พุต (single-input multiple-output; SIMO) ซึ่งมีการทำงานในโหมดแรงดัน พบว่ามีการนำอุปกรณ์แอคทีฟหลากหลายประเภทมาใช้สำหรับออกแบบและสังเคราะห์วงจรกรองสัญญาณ SIMO เป็นจำนวนมาก [15]–[25] อย่างไรก็ตามพบว่าวงจรกรองสัญญาณที่นำเสนอในหลายวงจรยังมีโครงสร้างเป็นแบบหนึ่งอินพุตสามเอาต์พุต (single-input three-output; SITO) ซึ่งสามารถทำหน้าที่กรองสัญญาณได้เพียงสามรูปแบบเท่านั้น [15]–[20] อีกทั้งยังคงต้องการอุปกรณ์แอคทีฟจำนวนมากกว่าสองตัวขึ้นไป นำมาต่อร่วมกับอุปกรณ์พาสซีฟ โดยยังพบว่ามีการใช้อุปกรณ์ดังกล่าวจำนวนมากอยู่ [18]–[20] นอกจากนี้วงจรที่นำเสนอ [17] ยังคงใช้ตัวเก็บประจุต่อแบบลอยตัว ทำให้โครงสร้างของวงจรมีความซับซ้อน พื้นที่วงจรมีขนาดใหญ่ และเกิดการสูญเสียกำลังไฟฟ้ามาก จึงเป็นแนวทางที่ไม่เหมาะสมในการนำไปสังเคราะห์เป็นวงจรรวม (integrated circuit; IC) รวมถึงในบางวงจร [15]–[17] ยังไม่สามารถแปรค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญของวงจร อาทิเช่น ความถี่เชิงมุมธรรมชาติ (ω_0) และตัวประกอบคุณภาพ (Q) ได้อิสระต่อกัน ต่อมาได้มีนักวิจัยทำการออกแบบและพัฒนาโครงสร้างของวงจรกรองสัญญาณอเนกประสงค์อันดับสองให้สามารถสังเคราะห์ฟังก์ชัน

กรองสัญญาณได้ครบทั้งห้าฟังก์ชันพร้อมกัน โดยออกแบบให้โครงสร้างของวงจรดังกล่าวเป็นแบบหนึ่งอินพุตห้าเอาต์พุต (single-input five-output; SIFO) [21]–[26] เพื่อความสะดวกในการนำไปใช้งาน โดยวงจรกรองสัญญาณแบบ SIFO ดังกล่าวสามารถสังเคราะห์ฟังก์ชันกรองสัญญาณได้ครบทุกฟังก์ชันพร้อมกัน อย่างไรก็ตามพบว่าวงจรดังกล่าวเหล่านี้ยังต้องการอุปกรณ์แอคทีฟจำนวนมากอยู่ อีกทั้งยังต้องการเงื่อนไขความเท่ากันของอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับสังเคราะห์ฟังก์ชันกรองสัญญาณ [21]–[25] ซึ่งพบว่าในวงจร [21] ยังไม่สามารถแปรค่าความถี่ ω_0 และ Q ได้อิสระต่อกัน รวมถึงบางวงจรที่นำเสนอไม่สามารถแปรค่าด้วยวิธีการทางอิเล็กทรอนิกส์จากการเปลี่ยนแปลงค่ากระแสไบอัสในวงจร [21]–[22], [24]

ดังนั้นบทความที่นำเสนอจึงมุ่งเน้นการสังเคราะห์วงจรกรองสัญญาณอเนกประสงค์ไบควอดราติกแบบหนึ่งอินพุตห้าเอาต์พุต (SIFO) ซึ่งมีการทำงานในโหมดแรงดันโดยใช้อุปกรณ์แอคทีฟและพาสซีฟจำนวนน้อย ในที่นี้ได้นำวงจร VDTA มาสังเคราะห์เป็นอุปกรณ์แอคทีฟหลักต่อร่วมกับตัวต้านทานและตัวเก็บประจุต่อเทียบกราวด์ วงจรกรองสัญญาณไบควอดราติกแบบ SIFO ที่นำเสนอมีข้อดี ดังนี้

- (1) ใช้อุปกรณ์แอคทีฟ คือ วงจร VDTA จำนวนสองตัว ตัวต้านทานจำนวนสองตัว และตัวเก็บประจุต่อเทียบกราวด์จำนวนสองตัว
 - (2) สามารถสังเคราะห์ฟังก์ชันกรองสัญญาณได้ครบทั้งทุกฟังก์ชันพร้อมกัน คือ LP BP HP BS และ AP โดยไม่ต้องปรับเปลี่ยนโครงสร้างของวงจร
 - (3) ปราศจากเงื่อนไขความเท่ากันของอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับสังเคราะห์ฟังก์ชันกรองสัญญาณในทุกฟังก์ชัน
 - (4) สามารถแปรค่าพารามิเตอร์หลักของวงจรได้อิสระต่อกันด้วยวิธีการทางอิเล็กทรอนิกส์จากอัตราขยายค่าความนำ
 - (5) มีค่าความไวต่อการแปรค่าของอุปกรณ์ในวงจรที่ต่ำ
- วงจรกรองสัญญาณแบบ SIFO ที่นำเสนอได้นำเทคโนโลยีซิมอส 0.25 ไมครอน มาใช้จำลองการทำงาน อีกทั้งได้นำไอซีเบอร์ CA3080 มาต่อเพื่อทดสอบการทำงานของวงจรกรองสัญญาณที่นำเสนอ นอกจากนี้ได้เปรียบเทียบกับคุณสมบัติการทำงานของวงจรที่นำเสนอกับวงจรกรองสัญญาณไบควอดราติกที่มีโครงสร้างแบบ SIMO อื่น ๆ [15]–[26] แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 : เปรียบเทียบคุณสมบัติของวงจรกรองสัญญาณที่นำเสนอและวงจรกรองสัญญาณใน [15]–[26]

Ref.	จำนวนอุปกรณ์แอคทีฟ	จำนวนอุปกรณ์พาสซีฟ	โครงสร้างวงจรกรองสัญญาณ	กรองสัญญาณได้ครบทุกฟังก์ชัน (LP, BP, HP, BS และ AP)	เงื่อนไขความเท่ากันของอุปกรณ์	ปรับค่า ω_c และ Q ได้อิสระ	แปรค่าด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์
[15]	DCCTA=1	Gnd R=1, Gnd C=2	SITO	✗	✗	✗	✓
[16]	VD-DIBA=2	Gnd C=1	SITO	✗	✗	✗	✓
[17]	VDGA=2	Float C=1, Gnd C=2	SITO	✗	✗	✗	✓
[18]	CFOA=3 (AD844)	Float R=2, Gnd R=2, Gnd C=2	SITO	✗	✗	✓	✓
[19]	CFA=3 (AD844)	Float R=2, Gnd R=1, Gnd C=2	SITO	✗	✗	✓	✓
[20]	LT1228=3	Float R=3, Gnd R=1, Gnd C=2	SITO	✗	✗	✓	✓
[21]	DVCC=3	Gnd R=3, Gnd C=2	SIFO	✓	✓	✗	✗
[22]	DDCC=2	Float R=2, Gnd R=1, Gnd C=2	SIFO	✓	✓	✓	✗
[23]	DDCCTA=2	Gnd R=2, Gnd C=2	SIFO	✓	✓	✓	✓
[24] Fig.2	TO-CCII=2	Float R=4, Gnd R=1, Gnd C=2	SIFO	✓	✓	✓	✗
[24] Fig.3	TO-CCII=2	Float R=3, Gnd R=2, Gnd C=2	SIFO	✓	✓	✓	✗
[25]	VDTA=2	R-MOS=2, Gnd C=2	SIFO	✓	✓	✓	✓
[26]	VDDDA=3	Gnd R=1, Gnd C=2	SIFO	✓	✗	✓	✓
This work	VDTA=2	Float R=1, Gnd R=1, Gnd C=2	SIFO	✓	✗	✓	✓

หมายเหตุ : DDCCTA = differential difference current conveyor transconductance amplifier

VD-DIBA = voltage differencing differential input buffered amplifier

VDGA = voltage differencing gain amplifier

CFOA = current-feedback operational amplifier

CFA = current-feedback amplifier

DVCC = differential voltage current conveyor

DDCC = differential difference current conveyor

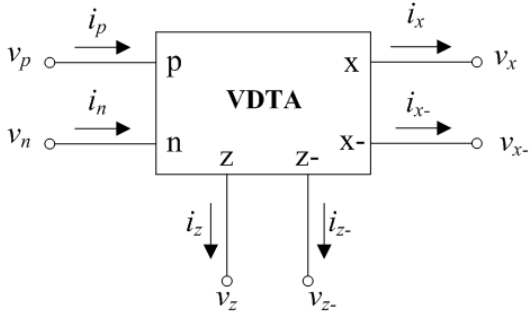
TO-CCII = triple-output second-generation current conveyor

VDTA = voltage differencing transconductance amplifier

VDDDA = voltage differencing differential difference amplifier

2) คุณสมบัติของวงจร VDTA

ในทางอุดมคติพบว่าวงจร VDTA จะมีค่าอิมพีแดนซ์สูงที่ขั้วแรงดันอินพุต v_p และ v_n อีกทั้งยังมีค่าอิมพีแดนซ์สูงที่ขั้วกระแสเอาต์พุต i_z , i_{z-} , i_x และ i_{x-} ตามลำดับ ซึ่งคุณลักษณะของวงจร VDTA สามารถแสดงสัญลักษณ์ทางไฟฟ้าได้ดังรูปที่ 1 และสามารถอธิบายความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสไฟฟ้าของวงจร VDTA ได้ดังสมการต่อไปนี้ [25]



รูปที่ 1 : สัญลักษณ์ทางไฟฟ้าของวงจร VDTA

$$\begin{bmatrix} i_z \\ i_{z-} \\ i_x \\ i_{x-} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} +g_{mF} & -g_{mF} & 0 \\ -g_{mF} & +g_{mF} & 0 \\ 0 & 0 & +g_{mS} \\ 0 & 0 & -g_{mS} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_p \\ v_n \\ v_z \end{bmatrix} \quad (1)$$

จากสมการ (1) พบว่าพารามิเตอร์ g_{mF} และ g_{mS} คือ อัตราขยายค่าความนำ (transconductance gain) ตัวที่หนึ่ง และอัตราขยาย

ค่าความนำตัวที่สอง ตามลำดับ โดยทั่วไปแล้วอัตราขยายค่าความนำสามารถแปรค่าได้ด้วยวิธีการทางอิเล็กทรอนิกส์จากกระแสไบอัสของวงจร VDTA ซึ่งผลต่างของแรงดันอินพุตที่พอร์ต p และ n ($v_p - v_n$) จะถูกแปลงไปเป็นกระแสเอาต์พุตที่พอร์ต z และ $z-$ (i_z และ i_{z-}) ด้วย g_{mF} นอกจากนี้แรงดันที่พอร์ต z และ $z-$ (v_z และ v_{z-}) ถูกแปลงมาเป็นกระแสเอาต์พุตที่พอร์ต x และ $x-$ (i_x และ i_{x-}) ด้วย g_{mS} ตามลำดับ

โครงสร้างภายในของวงจร VDTA ภายใต้เทคโนโลยีซีมอสสามารถแสดงดังรูปที่ 2 [25] โดยประกอบด้วยแหล่งจ่ายกระแสควบคุมด้วยแรงดัน (M_1 ถึง M_4 และ M_5 ถึง M_8) จากรูปที่ 2 พบว่าโครงสร้างที่นำเสนอจะมีอัตราขยายค่าความนำ g_{mF} และ g_{mS} ของวงจรเป็นดังสมการต่อไปนี้

$$g_{mF} = \left(\frac{g_1 g_2}{g_1 + g_2} \right) + \left(\frac{g_3 g_4}{g_3 + g_4} \right) \quad (2)$$

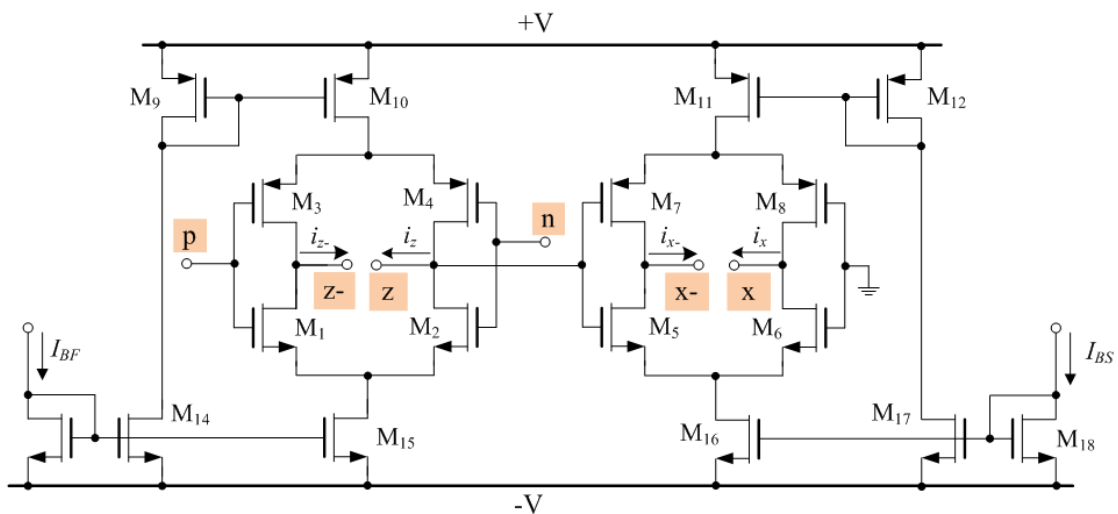
และ

$$g_{mS} = \left(\frac{g_5 g_6}{g_5 + g_6} \right) + \left(\frac{g_7 g_8}{g_7 + g_8} \right) \quad (3)$$

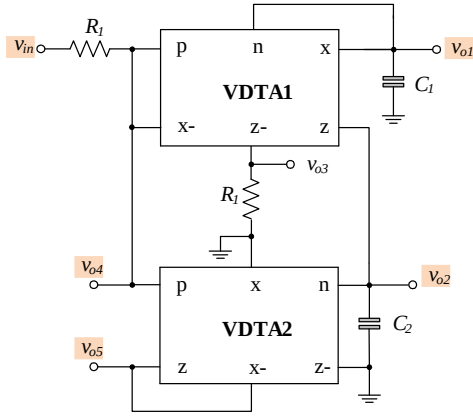
เมื่อ

$$g_i = \sqrt{\mu C_{ox} (W_i / L_i) I_{Bi}} \quad (4)$$

และ g_i คือ ค่าความนำ I_{Bi} คือ กระแสไบอัสตรงจากภายนอก μ คือ ค่าความคล่องตัวของพาหะในช่องนำกระแส C_{ox} คือ ความจุไฟฟ้าต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ W_i และ L_i คือ ความกว้างและความยาวของช่องนำกระแส ของมอสเฟตตัวที่ i ($i = 1, 2, \dots, 8$) ตามลำดับ



รูปที่ 2 : โครงสร้างภายในของวงจร VDTA แบบเทคโนโลยีซีมอส



รูปที่ 3 : วงจรกรองสัญญาณอเนกประสงค์แบบ SISO โดยใช้วงจร VDTA ที่นำเสนอ

3) วงจรกรองสัญญาณอเนกประสงค์แบบ SISO

ในหัวข้อนี้ได้นำเสนอการสังเคราะห์วงจรกรองสัญญาณอเนกประสงค์อันดับสองแบบ SISO ในโหมดแรงดัน ซึ่งประกอบด้วยวงจร VDTA เพียงสองตัว ตัวต้านทานจำนวนสองตัว ต่อร่วมกับตัวเก็บประจุเทียบกราวด์จำนวนสองตัวเท่านั้น โครงสร้างของวงจรกรองสัญญาณดังกล่าวแสดงได้ดังรูปที่ 3

จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของวงจรกรองสัญญาณแบบ SISO ดังรูปที่ 3 พบว่าวงจรดังกล่าวนี้สามารถทำการสังเคราะห์ฟังก์ชันกรองสัญญาณอันดับสองได้ทั้งครบทำรูปแบบพร้อมกันดังสมการต่อไปนี้

$$H_{LP} = \frac{V_{o1}}{V_{in}} = \frac{\left(\frac{g_{mF1}g_{mS1}}{C_1C_2} \right)}{D(s)} \quad (5)$$

$$H_{BP} = \frac{V_{o2}}{V_{in}} = \frac{s \left(\frac{g_{mF1}}{C_2} \right)}{D(s)} \quad (6)$$

$$H_{HP} = \frac{V_{o3}}{V_{in}} = \frac{s^2 \left(\frac{g_{mF1}R_2}{C_1C_2} \right)}{D(s)} \quad (7)$$

$$H_{BS} = \frac{V_{o4}}{V_{in}} = \frac{\left(s^2 + \frac{g_{mF1}g_{mS1}}{C_1C_2} \right)}{D(s)} \quad (8)$$

$$H_{AP} = \frac{V_{o5}}{V_{in}} = \left(\frac{g_{mF2}}{g_{mS2}} \right) \cdot \left[\frac{s^2 - s \left(\frac{g_{mF1}}{C_2} \right) + \frac{g_{mF1}g_{mS1}}{C_1C_2}}{D(s)} \right] \quad (9)$$

$$\text{เมื่อ} \quad D(s) = s^2 + s \left(\frac{g_{mF1}g_{mS1}R_1}{C_2} \right) + \left(\frac{g_{mF1}g_{mS1}}{C_1C_2} \right) \quad (10)$$

จากสมการ (5) ถึง (10) จะเห็นได้ว่าฟังก์ชันกรองสัญญาณในรูปแบบ LP BP HP BS และ AP สามารถสังเคราะห์ได้จากขั้ว V_{o1} V_{o2} V_{o3} V_{o4} และ V_{o5} ตามลำดับ โดยปราศจากเงื่อนไขความเท่ากันของอุปกรณ์ภายในวงจรอีกด้วย ซึ่งในกรณีฟังก์ชันกรองสัญญาณแบบ AP จะมีอัตราขยายเท่ากับ (g_{mF2}/g_{mS2}) ดังสมการ (10) นอกจากนี้เมื่อทำการพิจารณาค่าพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญในวงจรถัดไป ได้แก่ ค่าความถี่เชิงมุมธรรมชาติ (ω_0) และค่าตัวประกอบคุณภาพ (Q) สามารถหาได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{g_{mF1}g_{mS1}}{C_1C_2}} \quad (11)$$

และ

$$Q = \frac{1}{R_1} \sqrt{\frac{C_2}{g_{mF1}g_{mS1}C_1}} \quad (12)$$

จากสมการ (11) และ (12) พบว่าสามารถแปรค่าได้จาก g_{mF} และ/หรือ g_{mS} ในขณะเดียวกันค่าพารามิเตอร์ Q สามารถแปรค่าได้อิสระจากการปรับค่าตัวต้านทาน R_1 เพียงตัวเดียวเท่านั้น

4) วิเคราะห์ความผิดพลาดในกรณีไม่เป็นอุดมคติ

เมื่อทำการวิเคราะห์ถึงสมการคุณลักษณะกรณีไม่เป็นอุดมคติของวงจร VDTA จะเห็นได้ว่าจะพบค่าเบี่ยงเบนที่เกิดเนื่องความผิดพลาดในการส่งผ่านอัตราขยาย ซึ่งสมการคุณลักษณะในกรณีไม่เป็นอุดมคติจะเป็นดังนี้

$$\begin{bmatrix} i_z \\ i_{z-} \\ i_x \\ i_{x-} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} +\beta_F g_{mF} & -\beta_F g_{mF} & 0 \\ -\beta_F g_{mF} & +\beta_F g_{mF} & 0 \\ 0 & 0 & +\beta_S g_{mS} \\ 0 & 0 & -\beta_S g_{mS} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_p \\ v_n \\ v_z \end{bmatrix} \quad (13)$$

เมื่อ β_F และ β_S คือ ความผิดพลาดในการส่งผ่านอัตราขยายค่าความนำตัวที่ 1 และ 2 ของวงจร VDTA จากสมการ (13) หากพิจารณาถึงความผิดพลาดดังกล่าวที่เกิดขึ้นภายในวงจรกรองสัญญาณอเนกประสงค์ดังรูปที่ 3 พบว่าค่าพารามิเตอร์ ω_0 และ Q สมการจะเป็นดังนี้

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{\beta_{F1}\beta_{S1}g_{mF1}g_{mS1}}{C_1C_2}} \quad (14)$$

และ

$$Q = \frac{1}{R_1} \sqrt{\frac{C_2}{\beta_{F1}\beta_{S1}g_{mF1}g_{mS1}C_1}} \quad (15)$$

จากนั้นทำการวิเคราะห์ค่าความไวของ ω_0 และ Q ของอุปกรณ์ภายในวงจรที่นำเสนอ พบว่าเป็นดังสมการต่อไปนี้

$$S_{g_{mF1},g_{mS1}}^{\omega_0} = S_{\beta_{F1},\beta_{S1}}^{\omega_0} = -S_{C_1,C_2}^{\omega_0} = \frac{1}{2} \quad (16)$$

$$S_{g_{mF1}, g_{mS1}}^Q = S_{C_1}^Q = S_{\beta_{F1}, \beta_{S1}}^Q = -S_{C_2}^Q = -\frac{1}{2} \quad (17)$$

$$\text{และ} \quad S_{R_1, R_2}^{\omega_0} = S_{\beta_{F2}, \beta_{F2}}^{\omega_0} = S_{R_1, R_2}^Q = S_{\beta_{F1}, \beta_{F2}}^Q = 0 \quad (18)$$

จากสมการ (16) ถึง (18) จะพบว่าสัมประสิทธิ์ค่าความไวของ ω_0 และ Q มีค่าไม่เกิน 1 ดังนั้นความไวของวงจรกรองสัญญาณอนกประสงค์ที่นำเสนอจึงมีค่าต่ำ

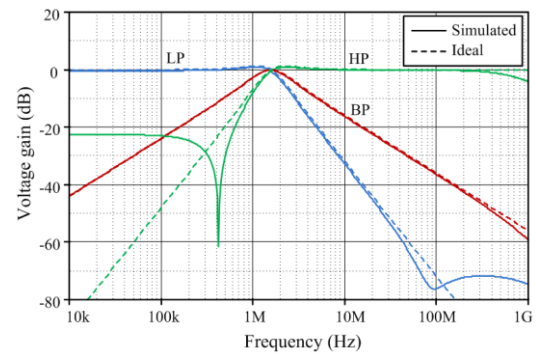
5) การจำลองการทำงานของวงจรที่นำเสนอ

ได้ทำการตรวจสอบประสิทธิภาพการทำงานของวงจรกรองสัญญาณที่นำเสนอด้วยโปรแกรม PSpice ซึ่งโปรแกรมดังกล่าวมีข้อดี คือ สามารถจำลองโครงสร้างภายในของวงจร VDTA ในรูปที่ 2 โดยใช้โมเดลทรานซิสเตอร์แบบชิมอสภายใต้เทคโนโลยี 0.25- μm จากบริษัท TSMC (Taiwan Semiconductor Manufacturing Company) เมื่อป้อนแหล่งจ่ายไฟให้วงจร VDTA มีค่า $+V = -V = 1\text{ V}$ และอัตราส่วน W/L ของทรานซิสเตอร์เป็นดังตารางที่ 2

เมื่อกำหนดให้กระแสไบอัส $I_{BF} = I_{BS} = 100\text{ }\mu\text{A}$ ($g_m = 1\text{ mAV}$) ตัวต้านทาน $R_1 = R_2 = 1\text{ k}\Omega$ และตัวเก็บประจุ $C_1 = C_2 = 100\text{ pF}$ จากการกำหนดค่าดังกล่าวทำให้ความถี่ $f_o = \omega_o/2\pi \cong 1.59\text{ MHz}$ และ $Q = 1$ โดยผลตอบสนองทางความถี่ของฟังก์ชันกรองสัญญาณในรูปแบบ LP HP และ BP ของวงจรที่นำเสนอในรูปที่ 3 สามารถแสดงได้รูปที่ 4 ซึ่งจะเห็นได้ว่าผลตอบสนองแบบ HP ในช่วงความถี่ต่ำกว่า 1 MHz จะพบความผิดพลาดเกิดขึ้นค่อนข้างมาก อย่างไรก็ตามผลตอบสนองดังกล่าวที่เกิดขึ้นอยู่ในช่วงอัตราขยายต่ำกว่า -8 dB จึงไม่ส่งผลกระทบต่อการทำงานของวงจร ในทำนองเดียวกันหากพิจารณาผลตอบสนองแบบ LP พบว่าเกิดความผิดพลาดเพิ่มมากขึ้นในช่วงความถี่ประมาณ 3 MHz เป็นต้นไป อย่างไรก็ตามค่าดังกล่าวไม่ได้อยู่ในช่วงการทำงานของผลตอบสนองแบบ LP ดังนั้นจึงไม่ส่งผลกระทบต่อการทำงานเช่นเดียวกัน

ตารางที่ 2 : อัตราส่วนทรานซิสเตอร์ของวงจร VDTA ในรูปที่ 2

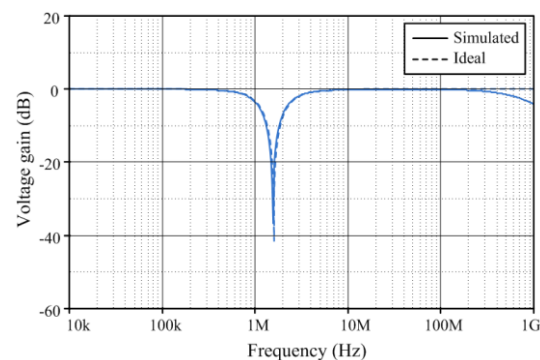
ทรานซิสเตอร์	$W/L (\mu\text{m}/\mu\text{m})$
$M_1 - M_2, M_5 - M_6$	14.55/0.25
M_3, M_4, M_7, M_8	23.3/0.25
$M_9 - M_{10}, M_{11} - M_{12}$	5.2/0.25
$M_{13} - M_{14}, M_{16} - M_{17}$	2.8/0.25
M_{15}, M_{18}	3.2/0.25



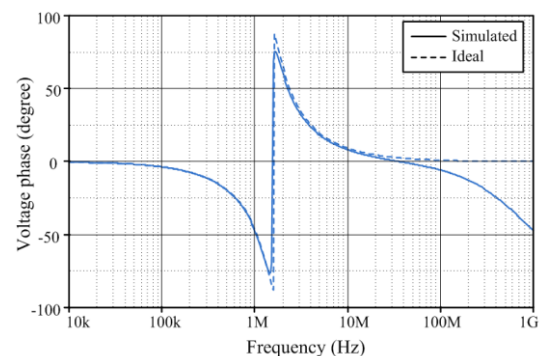
รูปที่ 4 : ผลการจำลองทางความถี่แบบ LP BP และ HP ของวงจรที่นำเสนอในรูปที่ 3

ถัดมาทำการจำลองผลตอบสนองทางขนาดและเฟสของฟังก์ชันกรองสัญญาณแบบ BS และ AP ของวงจรที่นำเสนอแสดงได้ดังรูปที่ 5 และ 6 ตามลำดับ ซึ่งพบว่าผลที่ได้จากการจำลองของวงจรที่นำเสนอมีความสอดคล้องและใกล้เคียงกับทฤษฎีที่นำเสนอ

จากนั้นทำการจำลองผลตอบสนองทางเวลาของฟังก์ชันกรองสัญญาณแบบ BP เทียบกับแรงดันอินพุต เมื่อป้อนแรงดันอินพุต (v_{in}) เท่ากับ 100 mV_p ที่ความถี่ 1.59 MHz ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 7 นอกจากนี้ยังพบค่าการสูญเสียกำลังงานของวงจรที่นำเสนอมีค่าประมาณ 3 mW

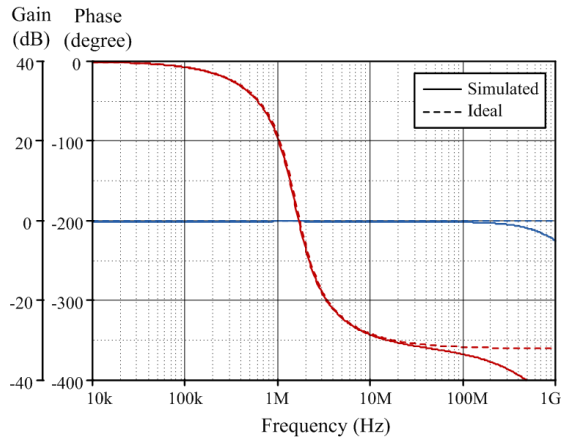


(ก) ผลการจำลองทางขนาด

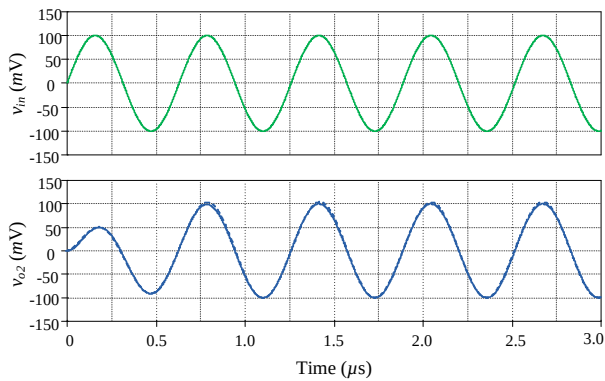


(ข) ผลการจำลองทางเฟส

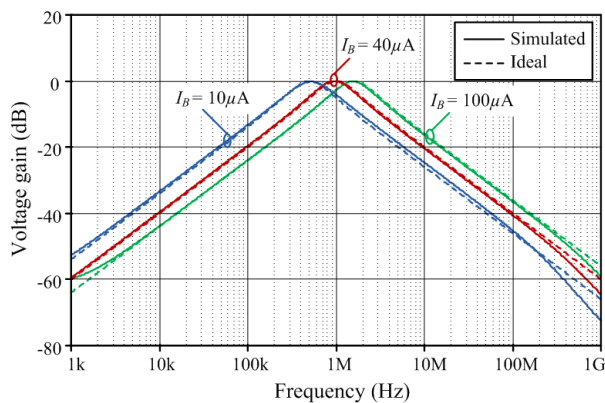
รูปที่ 5 : ผลการจำลองทางความถี่แบบ BS ของวงจรในรูปที่ 3



รูปที่ 6 : ผลจำลองทางขนาดและเฟสแบบ AP ของวงจรในรูปที่ 3



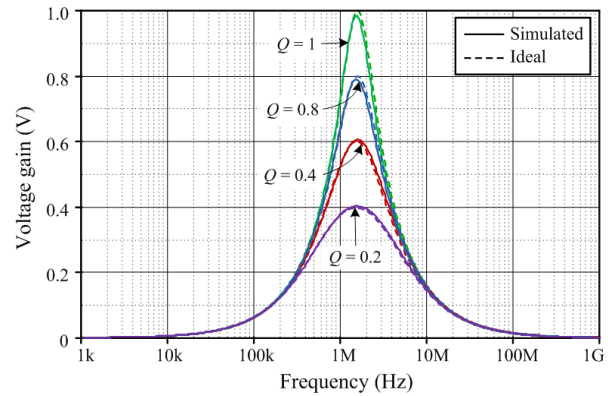
รูปที่ 7 : ผลตอบสนองทางเวลาของฟังก์ชันกรองสัญญาณแบบ BP ที่ความถี่ 1.59 MHz



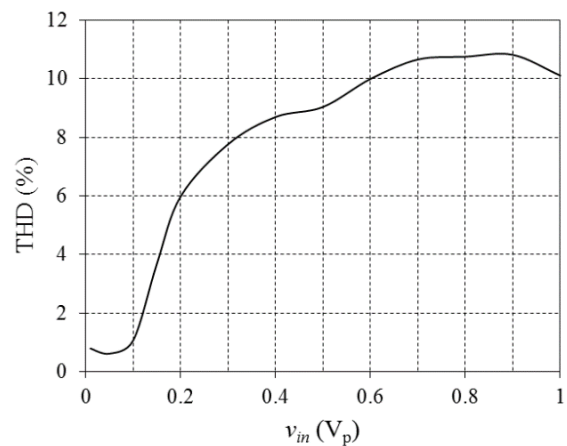
รูปที่ 8 : ผลจำลองทางความถี่แบบ BP เมื่อทำการแปรค่า f_o

จากรูปที่ 8 แสดงผลที่ได้จากการแปรค่าความถี่ f_o และ Q ของวงจรที่นำเสนอ เมื่อกำหนดให้ $I_{BF} = I_{BS}$ มีค่าเป็นดังนี้ $10 \mu A$ ($g_m = 316 \mu A/V$), $40 \mu A$ ($g_m = 632 \mu A/V$) and $100 \mu A$ ($g_m = 1 \text{ mA/V}$) ที่ความถี่ f_o เท่ากับ 0.5 MHz , 1 MHz และ 1.59 MHz ตามลำดับ โดยค่า f_o จากการจำลองพบว่ามีค่าเป็น 0.524

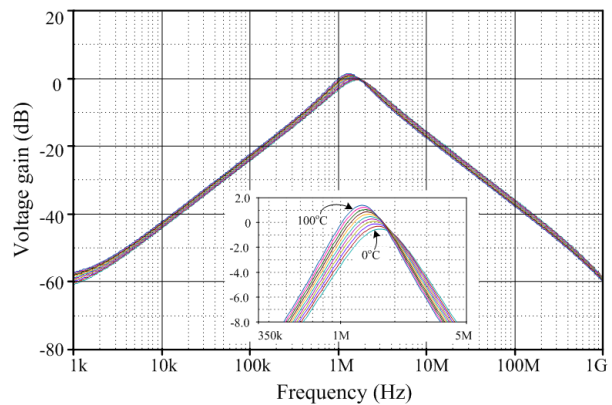
MHz 0.955 MHz และ 1.56 MHz ตามลำดับ หรือมีค่าความผิดพลาดเท่ากับ 4.8% , 4.5% และ 1.88% ตามลำดับ โดยพบความผิดพลาดเฉลี่ยมีค่าประมาณ 3.727%



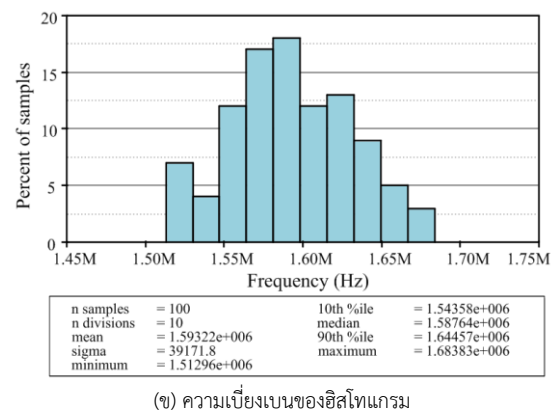
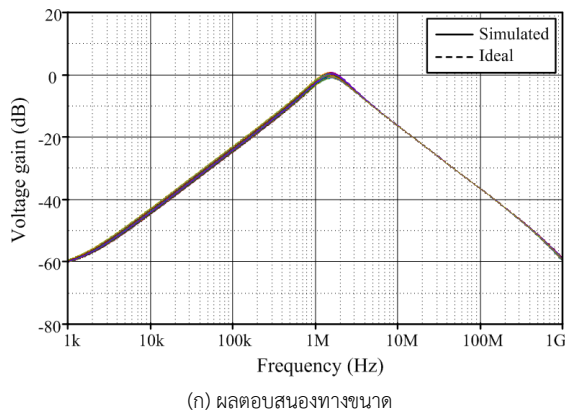
รูปที่ 9 : ผลจำลองทางความถี่แบบ BP เมื่อทำการแปรค่า Q



รูปที่ 10 : การเปรียบเทียบค่า THD และขนาดแรงดันอินพุตของผลตอบสนองแบบ BP



รูปที่ 11 : คุณสมบัติของผลตอบสนองแบบ BP เมื่ออุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลง



รูปที่ 12 : ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธี Monte Carlo สำหรับผลตอบสนองแบบ BP

ได้ทำการแปรค่าพารามิเตอร์ Q ของวงจรที่นำเสนอในรูปที่ 3 เมื่อกำหนดให้ $I_{BF} = I_{BS}$ มีค่าเป็นดังนี้ $100 \mu A$ ($g_m = 1 \text{ mA/V}$) ตัวเก็บประจุ $C_1 = C_2 = 100 \text{ pF}$ และทำการแปรค่าตัวต้านทาน ($R_1 = R_2$) ให้มีค่าเป็น $1 \text{ k}\Omega$ $1.25 \text{ k}\Omega$ $1.65 \text{ k}\Omega$ และ $2.5 \text{ k}\Omega$ ตามลำดับ โดยที่ $Q = 1$ 0.8 0.6 และ 0.4 ตามลำดับ อย่างไรก็ตามพบว่าจากการแปรค่าความถี่ f_0 จะไม่ส่งผลกระทบต่อค่า Q ในขณะเดียวกันเมื่อทำการแปรค่าพารามิเตอร์ Q ก็ไม่ส่งผลกระทบต่อค่า f_0 ด้วยเช่นกัน

หากพิจารณาความผิดเพี้ยนของฮาร์โมนิก (the total harmonic distortion; THD) ของผลตอบสนองแบบ BP เมื่อป้อนสัญญาณรูปคลื่นไซน์ที่ v_{in} ของวงจร โดยทำการแปรค่า v_{in} จนกระทั่งมีค่าเท่ากับ $1 V_p$ ที่ความถี่ 1.59 MHz ผลที่ได้สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 10 ซึ่งพบว่า THD สูงสุดมีค่าเท่ากับ 10.82%

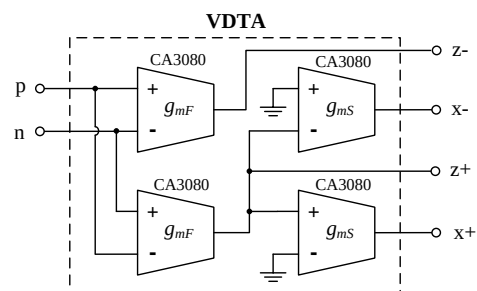
นอกจากนี้ได้ทำการพิจารณาการทำงานของวงจรกรองสัญญาณที่นำเสนอเมื่ออุณหภูมิเกิดการเปลี่ยนแปลง จากรูปที่ 11 แสดงผลตอบสนองทางความถี่แบบ BP เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ตั้งแต่ 0°C จนถึง 100°C ซึ่งพบว่าความถี่ f_0 มีการแปรค่าตั้งแต่ 1.659 MHz ที่อุณหภูมิ 0°C ไปจนถึง f_0 เท่ากับ 1.32 MHz ที่อุณหภูมิ 100°C โดยมีค่าความเบี่ยงเบนสูงสุดเท่ากับ 16.98% ที่อุณหภูมิ 100°C และต่ำสุดเท่ากับ 4.34% ที่อุณหภูมิ 0°C ผลที่ได้ดังกล่าวจะเห็นได้ว่าค่าความถี่ f_0 เกิดการเปลี่ยนแปลงเพิ่มมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิมีค่าสูงขึ้น อย่างไรก็ตามความเบี่ยงเบนที่เกิดขึ้นดังกล่าวสามารถทำการชดเชยได้จากการปรับอัตราขยายค่าความนำ

ทำการวิเคราะห์ผลการการทำงานของวงจรกรองสัญญาณที่นำเสนอทางสถิติด้วยวิธี Monte Carlo โดยจำลองการทำงานจำนวน 100 ครั้ง เมื่อกำหนดให้ C_1 มีค่าความเบี่ยงเบนแบบเกาส์เซียน

(Gaussian) เท่ากับ 10% ผลตอบสนองทางความถี่และกราฟความเบี่ยงเบนของฮิสโทแกรม (histogram) ดังกล่าวสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 12 (ก) และ 12 (ข) ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าแนวโน้มค่าเฉลี่ยของความถี่ f_0 มีค่าประมาณ 1.593 MHz ซึ่งจากแนวโน้มค่าเฉลี่ย f_0 ดังกล่าวคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดเฉลี่ยมีค่าเพียง 0.189% เท่านั้น นอกจากนี้ยังพบว่าความถี่ต่ำสุดมีค่าประมาณ 1.513 MHz ในขณะที่ความถี่สูงสุดพบว่ามีค่าประมาณ 1.684 MHz ดังนั้นผลที่ได้จากการจำลองด้วยวิธี Monte Carlo มีแนวโน้มเป็นไปตามทฤษฎี

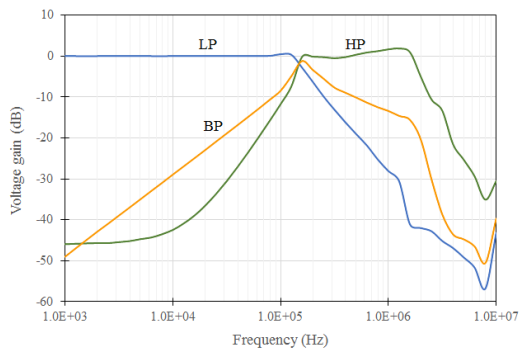
6) ผลการทดลองของวงจรที่นำเสนอ

ในหัวข้อนี้ได้ทดลองการทำงานของวงจรกรองสัญญาณที่นำเสนอ ซึ่งการต่อวงจร VDTA โดยใช้โอซีเบอร์ CA3080 แสดงได้ดังรูปที่ 13 เมื่อกำหนดแหล่งจ่ายไฟให้โอซีเบอร์ CA3080 มีค่า $+V = -V = 5 \text{ V}$ และกำหนดให้กระแสไบอัส $I_{BF} = I_{BS} = 100 \mu A$ ($g_m = 1 \text{ mA/V}$) ตัวต้านทาน $R_1 = R_2 = 1 \text{ k}\Omega$ และตัวเก็บประจุ $C_1 = C_2 = 1 \text{ nF}$ ซึ่งพบว่าความถี่ $f_0 \approx 159 \text{ kHz}$ และ $Q = 1$ ผลตอบสนองทางความถี่ของ LP HP และ BP ของวงจรกรองที่นำเสนอสามารถแสดงได้รูปที่ 14

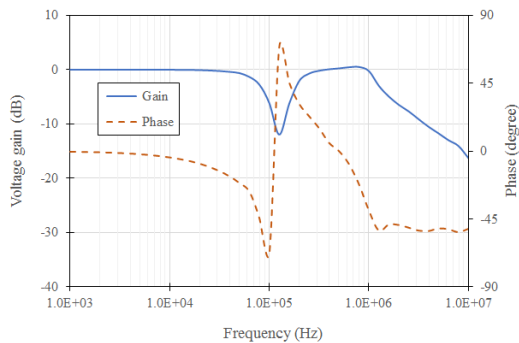


รูปที่ 13 : วงจร VDTA ที่ใช้ในการทดลอง

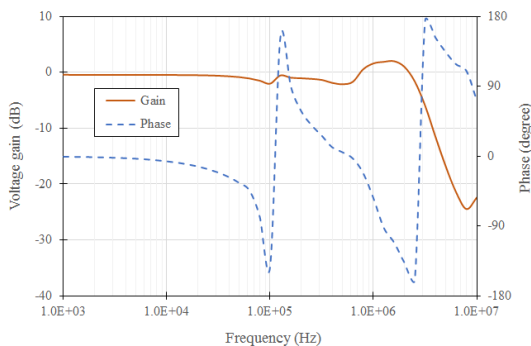
จากรูปที่ 15 และ 16 แสดงผลตอบสนองทางความถี่ของอัตราขยายและเฟสแบบ BS และ AP ตามลำดับ ผลที่ได้จากการทดลองพบว่ามีความถี่ f_0 มีค่าประมาณ 158.5 kHz โดยมีความผิดพลาดเท่ากับ 0.314% เท่านั้น นอกจากนี้ได้ตรวจสอบการทำงานของผลตอบสนองทางเวลาของฟังก์ชันกรองสัญญาณแบบ BP เทียบกับสัญญาณอินพุต เมื่อกำหนดให้อินพุตมีรูปคลื่นเป็นสัญญาณไซน์ขนาด 100 mV_{p-p} ที่ความถี่ 159 kHz ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวเป็นดังรูปที่ 17 โดยจะเห็นได้ว่าผลลัพธ์ที่ได้มีความสอดคล้องกับทฤษฎี



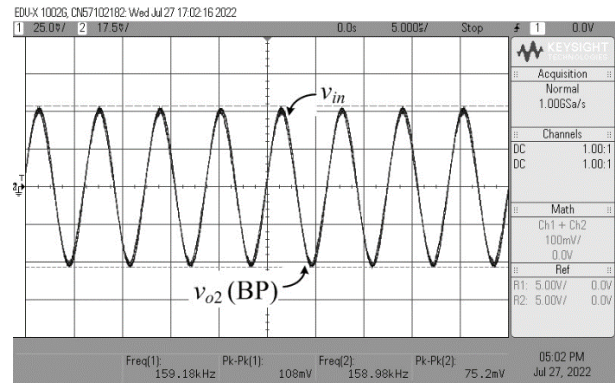
รูปที่ 14 : การวัดผลตอบสนองทางความถี่แบบ LP BP และ HP ของวงจรที่นำเสนอ



รูปที่ 15 : การวัดผลตอบสนองของอัตราขยายและเฟสแบบ BS ของวงจรที่นำเสนอ



รูปที่ 16 : การวัดผลตอบสนองของอัตราขยายและเฟสแบบ AP ของวงจรที่นำเสนอ



รูปที่ 17 : ผลตอบสนองทางเวลาแบบ BP เทียบกับ v_{in}

7) บทสรุป

บทความนี้ได้นำเสนอการสังเคราะห์วงจรกรองสัญญาณอนาล็อกประเภทอันดับสองโหมดแรงดัน ซึ่งอุปกรณ์แอคทีฟหลักที่ใช้สำหรับสังเคราะห์วงจรดังกล่าว คือ วงจร VDTA โครงสร้างของวงจรกรองสัญญาณเป็นแบบ SIFO สามารถทำหน้าที่กรองสัญญาณได้ครบทั้งห้าฟังก์ชัน ได้แก่ LP BP HP BS และ AP ได้พร้อมกันจากโครงสร้างวงจรเดียวกัน โดยปราศจากเงื่อนไขความเท่ากันของอุปกรณ์ อีกทั้งยังสามารถแปรค่า ω_0 และ Q ได้อิสระต่อกันด้วยวิธีการทางอิเล็กทรอนิกส์ นอกจากนี้ค่าความไวต่อการแปรค่าอุปกรณ์ของวงจรที่นำเสนอยังมีค่าต่ำ ผลที่ได้จากการจำลองคุณลักษณะของวงจรมีความสอดคล้องกับทฤษฎีที่นำเสนอ โดยพบค่าการสูญเสียกำลังงานของวงจรที่นำเสนอมีค่าประมาณ 3 mW อีกทั้งยังพบว่า THD ของผลตอบสนองแบบ BP มีค่าสูงสุดเท่ากับ 10.782% นอกจากนี้เมื่ออุณหภูมิเกิดการเปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 0 °C ถึง 100 °C ยังพบค่าความเบี่ยงเบนสูงสุดเท่ากับ 16.98% ที่อุณหภูมิ 100 °C รวมทั้งผลจากการวิเคราะห์การทำงานของวงจรด้วยวิธี Monte Carlo พบว่าแนวโน้มของความถี่เชิงมุมธรรมชาติมีค่าประมาณ 1.593 MHz ซึ่งมีความผิดพลาดเพียง 0.189% เท่านั้น จากนั้นตรวจสอบการทำงานของวงจรกรองสัญญาณที่นำเสนอโดยการต่อวงจรทดลอง โดยพบความผิดพลาดของความถี่ f_0 มีค่าเพียง 0.314% เท่านั้น

กิตติกรรมประกาศ

บทความนี้ได้รับการสนับสนุนจากคณะวิศวกรรมศาสตรมหาวิทยาลัทยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น

REFERENCES

- [1] P. Prommee, *Analog Integrated Circuits for Communications*. Bangkok, Thailand: Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (in Thai), 2017.
- [2] E. Yuce and S. Minaei, "New CCII-based versatile structure for realizing PID controller and instrumentation amplifier," *Microelectron. J.*, vol. 41, no. 5, pp. 311–316, May 2010.
- [3] E. Yuce, "Novel instrumentation amplifier and integrator circuits using single DDCC and only grounded passive elements," *Indian J. Pure Appl. Phys.*, vol. 52, no. 11, pp. 767–775, 2014.
- [4] D. Agrawal and S. Maheshwari, "Cascadable current mode instrumentation amplifier," *AEU - Int. J. Electron. Commun.*, vol. 94, pp. 91–101, Sep. 2018.
- [5] T. Ettaghzouti, M. Bchir, and N. Hassen, "High CMRR voltage mode instrumentation amplifier using a new CMOS differential difference current conveyor realization," *Int. J. Electr. Electron. Eng. Telecommun.*, vol. 9, no. 3, pp. 132–141, May 2020.
- [6] S.-F. Wang, H.-P. Chen, Y. Ku, and C.-L. Lee, "Versatile voltage-mode biquadratic filter and quadrature oscillator using four OTAS and two grounded capacitors," *Electronics*, vol. 9, no. 9, p. 1493, Sep. 2020, doi: 10.3390/electronics9091493.
- [7] N. Herencsar, J. Koton, K. Vrba, and A. Lahiri, "New voltage-mode quadrature oscillator employing single DBTA and only grounded passive elements," *IEICE Electron. Express*, vol. 6, no. 24, pp. 1708–1714, 2009.
- [8] D. Biolek, A. Lahiri, W. Jaikla, M. Siripruchyanun, and J. Bajer, "Realization of electronically tunable voltage-mode/current-mode quadrature sinusoidal oscillator using ZC-CG-CDBA," *Microelectron. J.*, vol. 42, no. 10, pp. 1116–1123, Oct. 2011.
- [9] A. Yesil, F. Kacar, and K. Gurkan, "Design and experimental evaluation of quadrature oscillator employing single FB-VDBA," *J. Electr. Eng.*, vol. 67, no. 2, pp. 137–142, 2016.
- [10] B. Metin and O. Cicekoglu, "A novel floating lossy inductance realization topology with NICs using current conveyors," *IEEE Trans. Circuits Syst. II: Express Briefs*, vol. 53, no. 6, pp. 483–486, Jun. 2006.
- [11] M. A. Ibrahim, S. Minaei, E. Yuce, N. Herencsar, and J. Koton, "Lossy/lossless floating/grounded inductance simulation using one DDCC," *Radioengineering*, vol. 21, no. 1, pp. 3–10, 2012.
- [12] W. Tangsrirat, "Floating simulator with a single DVCCTA," *Indian J. Eng. Mater. Sci.*, vol. 20, no. 2, pp. 79–86, Apr. 2013.
- [13] H. Alpaslan, "DVCC-based floating capacitance multiplier design," *Turkish J. Elec. Eng. Comp. Sci.*, vol. 25, no. 2, pp. 1334–1345, 2017.
- [14] A. Yesil, F. Kacar, and H. Kuntman, "New simple CMOS realization of voltage differencing transconductance amplifier and its RF filter application," *Radioengineering*, vol. 20, no. 3, pp. 632–637, Sep. 2011.
- [15] W. Tangsrirat and O. Channumsin, "High-input impedance voltage-mode multifunction filter using a single DDCCTA and grounded passive elements," *Radioengineering*, vol. 20, no. 4, pp. 905–910, Dec. 2011.
- [16] W. Jaikla, D. Biolek, S. Siripongdee, and J. Bajer, "High input impedance voltage-mode biquad filter using VD-DIBAs," *Radioengineering*, vol. 23, no. 3, pp. 914–921, Sep. 2014.
- [17] W. Tangsrirat and O. Channumsin, "Dual-mode multifunction filter using VDGA," in *Proc. 15th Int. Conf. Elec. Eng./Electron., Comp., Telecommun. and Inf. Technol. (ECTI-CON2018)*, Chiang Rai, Thailand, Jul. 2018, pp. 481–488.
- [18] S.-F. Wang, H.-P. Chen, Y. Ku, and M.-X. Zhong, "Voltage-mode multifunction biquad filter and its application as fully-uncoupled quadrature oscillator based on current-feedback operational amplifiers," *Sensors*, vol. 20, no. 22, p. 6681, Nov. 2020, doi: 10.3390/s20226681.
- [19] S. F. Wang, H. P. Chen, Y. Ku, and Y. F. Li, "High-input impedance voltage-mode multifunction filter," *Appl. Sci.*, vol. 11, no. 1, p. 387, Jan. 2021, doi: 10.3390/app11010387.
- [20] M. P. P. Wai, P. Suwanjan, W. Jaikla, and A. Chaichana, "Electronically and orthogonally tunable SITO voltage-mode multifunction biquad filter using LT1228s," *Elektronika Ir Elektrotechnika*, vol. 27, no. 5, pp. 11–17, 2021.
- [21] S. Minaei and E. Yuce, "All-grounded passive elements voltage-mode DVCC-based universal filters," *Circuits Syst. Signal Process.*, vol. 29, no. 2, pp. 295–309, 2010.
- [22] W. Y. Chiu and J. W. Horng, "Voltage-mode biquadratic filters with one input and five outputs using two DDCCs," *Indian J. Eng. Mater. Sci.*, vol. 18, no. 2, pp. 97–101, 2011.
- [23] O. Channumsin, T. Pukkalanun, and W. Tangsrirat, "Voltage-mode universal filter with one input and five outputs using DDCCTAs and all-grounded passive components," *Microelectron. J.*, vol. 43, no. 8, pp. 555–561, Aug. 2012.
- [24] M. A. Ibrahim, E. Yuce, N. Herencsar, and J. Koton, "SIFO voltage-mode universal filters employing TO-CCIs," in *Proc. 35th Int. Conf. Telecommun. and Signal Process. (TSP2012)*, Prague, Czech Republic, Jul. 2012, pp. 359–362.

- [25] J. Satansup, T. Pukkalanun, and W. Tangsrirat, "Electronically tunable single-input five-output voltage-mode universal filter using VDTAs and grounded passive elements," *Circuits Syst. Signal Process.*, vol. 32, pp. 945–957, 2013.
- [26] P. Huaihongthong *et al.*, "Single-input multiple-output voltage-mode shadow filter based on VDDDA," *AEU - Int. J. Electron. Commun.*, vol. 103, pp. 13–23, May 2019.

คำแนะนำสำหรับผู้เขียนบทความเพื่อลงตีพิมพ์

วารสารวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีดิจิทัล เป็นวารสารวิชาการทางด้านวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี ของสถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น บทความที่น่าสนใจจะต้องพิมพ์เป็นภาษาไทย หรือภาษาอังกฤษตามรูปแบบที่กำหนด และพร้อมที่จะนำไปตีพิมพ์ได้ทันที การเสนอบทความเพื่อพิจารณาตีพิมพ์ในวารสาร มีรายละเอียดดังนี้

1. หลักเกณฑ์การพิจารณาบทความเพื่อตีพิมพ์

1.1 เป็นบทความที่ไม่ได้อยู่ระหว่างการพิจารณาตีพิมพ์ หรือไม่ได้อยู่ระหว่างการพิจารณาของสื่อสิ่งพิมพ์อื่น ๆ และไม่เคยตีพิมพ์ในวารสารหรือรายงานการสืบเนื่องจากการประชุมวิชาการใดมาก่อนทั้งในประเทศและต่างประเทศ หากตรวจสอบพบว่ามีการตีพิมพ์ซ้ำซ้อน ถือเป็นความรับผิดชอบของผู้เขียนแต่เพียงผู้เดียว

1.2 เป็นบทความที่แสดงให้เห็นถึงความคิดริเริ่มสร้างสรรค์ มีคุณค่าทางวิชาการ มีความสมบูรณ์ของเนื้อหา และมีความถูกต้องตามหลักวิชาการ

1.3 บทความที่ได้รับการตีพิมพ์จะต้องผ่านการประเมินคุณภาพจากผู้ทรงคุณวุฒิ (Peer reviewer) อย่างน้อย 2 ท่าน ต่อบทความ ซึ่งผู้ทรงคุณวุฒิอาจให้ผู้เขียนแก้ไขเพิ่มเติมหรือปรับปรุงบทความให้เหมาะสมยิ่งขึ้น

1.4 กองบรรณาธิการขอสงวนสิทธิ์ในการตรวจแก้ไขรูปแบบบทความที่ส่งมาตีพิมพ์ตามที่เห็นสมควร

1.5 บทความ ข้อความ ภาพประกอบ และตารางประกอบ ที่ตีพิมพ์ลงวารสารเป็นความคิดเห็นส่วนตัวของผู้เขียน กองบรรณาธิการไม่มีส่วนรับผิดชอบใด ๆ ถือเป็นความรับผิดชอบของผู้เขียนแต่เพียงผู้เดียว

1.6 ต้องเป็นบทความที่ไม่ละเมิดลิขสิทธิ์ ไม่ลอกเลียน หรือคัดลอกข้อความของผู้อื่นโดยไม่ได้รับอนุญาต

1.7 หากเป็นงานแปลหรือเรียบเรียงจากภาษาต่างประเทศ ต้องมีหลักฐานการอนุญาตให้ตีพิมพ์เป็นลายลักษณ์อักษรจากเจ้าของลิขสิทธิ์

1.8 ต้องมีการอ้างอิงที่ถูกต้อง เหมาะสมก่อนการตีพิมพ์ ซึ่งเป็นความรับผิดชอบของเจ้าของผลงาน

1.9 บทความที่ส่งถึงกองบรรณาธิการ ขอสงวนสิทธิ์ที่จะไม่ส่งคืนผู้เขียน

2. รูปแบบการกลั่นกรองบทความก่อนลงตีพิมพ์ (Peer-review)

ในการประเมินบทความโดยผู้ทรงคุณวุฒิเป็นการประเมินแบบ Double-blind peer review คือ ผู้ทรงคุณวุฒิไม่ทราบชื่อและรายละเอียดของผู้เขียนบทความ และผู้เขียนบทความไม่ทราบชื่อและรายละเอียดของผู้ทรงคุณวุฒิ

3. ประเภทของบทความที่รับพิจารณาลงตีพิมพ์

นิพนธ์ต้นฉบับต้องเป็นบทความวิจัย ประกอบด้วย บทคัดย่อ บทนำ วัตถุประสงค์ของการวิจัย วิธีดำเนินการวิจัย ผลการวิจัยและอภิปรายผล สรุปผล และเอกสารอ้างอิง*

หมายเหตุ : บทความภาษาไทยต้องมีบทคัดย่อภาษาไทยและภาษาอังกฤษ โดยให้หน้าบทคัดย่อภาษาไทยอยู่ก่อนหน้าบทคัดย่อภาษาอังกฤษ สำหรับบทความภาษาอังกฤษไม่ต้องมีบทคัดย่อภาษาไทย

* เอกสารอ้างอิง เป็นการบอกรายการแหล่งอ้างอิงที่มีการอ้างอิงในเนื้อหาของงานเขียน

4. จริยธรรมในการตีพิมพ์ผลงานวิจัยในวารสารวิชาการ

วารสารวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีดิจิทัล ได้คำนึงถึงจริยธรรมในการตีพิมพ์บทความ โดยจริยธรรมและบทบาทหน้าที่ของผู้เกี่ยวข้อง มีดังนี้

จริยธรรมและหน้าที่ของผู้เขียน

1. ผู้เขียนต้องเขียนบทความให้เป็นไปตามรูปแบบที่วารสารกำหนดไว้ในคำแนะนำสำหรับผู้เขียน
2. หากมีการนำข้อมูลของผู้อื่นหรือข้อมูลของผู้เขียนที่เคยตีพิมพ์ในวารสารฉบับอื่นมาใช้ ผู้เขียนต้องอ้างอิงแหล่งที่มาของข้อมูลนั้น โดยไม่ทำให้ผู้อื่นเข้าใจผิดว่าข้อมูลนั้นเป็นผลงานใหม่ของผู้เขียน
3. ผู้เขียนต้องไม่ดัดแปลงหรือบิดเบือนข้อมูล
4. ผู้เขียนต้องระบุแหล่งทุนที่สนับสนุนในการทำวิจัย (ถ้ามี)
5. ผู้เขียนต้องเปิดเผยข้อมูลเกี่ยวกับผลประโยชน์ทับซ้อนอย่างชัดเจน (ถ้ามี)

จริยธรรมและหน้าที่ของบรรณาธิการ

1. บรรณาธิการต้องดำเนินการเผยแพร่วารสารให้ตรงตามเวลา
2. บรรณาธิการต้องคัดเลือกบทความ โดยพิจารณาจากคุณภาพและความสอดคล้องของเนื้อหาบทความกับขอบเขตของวารสาร
3. บรรณาธิการต้องดำเนินการประเมินบทความอย่างเป็นธรรม ไม่ปฏิเสธการตีพิมพ์บทความโดยใช้อคติ
4. บรรณาธิการต้องไม่เปิดเผยข้อมูลของผู้เขียนบทความ และผู้ประเมินบทความแก่บุคคลอื่นที่ไม่เกี่ยวข้อง
5. บรรณาธิการต้องไม่มีผลประโยชน์ทับซ้อนกับผู้เขียน และผู้ประเมินบทความ
6. บรรณาธิการต้องใช้โปรแกรมในการตรวจสอบการคัดลอกผลงาน เพื่อป้องกันการตีพิมพ์ผลงานซึ่งคัดลอกมาจากผลงานผู้อื่น หากพบการคัดลอกผลงานของผู้อื่น บรรณาธิการต้องหยุดกระบวนการพิจารณาบทความทันที และติดต่อผู้เขียนเพื่อขอคำชี้แจง

จริยธรรมและหน้าที่ของผู้ประเมินบทความ

1. ผู้ประเมินบทความ ควรพิจารณาตอบรับการประเมินเฉพาะบทความที่สอดคล้องกับความเชี่ยวชาญของตนเองเท่านั้น เพื่อให้บทความที่ตีพิมพ์มีคุณภาพ
2. ผู้ประเมินบทความควรประเมินบทความให้แล้วเสร็จตามระยะเวลาที่กำหนด เพื่อไม่ให้บทความที่ผ่านการพิจารณาตีพิมพ์ล่าช้า
3. ผู้ประเมินควรประเมินบทความโดยให้ข้อเสนอแนะตามหลักวิชาการเท่านั้น ไม่ควรใช้ความคิดเห็นส่วนตัวที่ไม่มีเหตุผลหรือไม่มีข้อมูลรองรับ
4. ผู้ประเมินควรปฏิเสธการประเมินบทความ หากเห็นว่าตนเองอาจมีผลประโยชน์ทับซ้อนกับผู้เขียน
5. ผู้ประเมินต้องไม่เปิดเผยเนื้อหาภายในบทความให้ผู้ที่ไม่เกี่ยวข้องทราบ
6. หากผู้ประเมินเห็นว่ามีความเห็นที่ผู้เขียนไม่ได้กล่าวอ้างถึง แต่เป็นบทความที่สำคัญและเกี่ยวข้องกับบทความ ผู้ประเมินควรแจ้งให้ผู้เขียนกล่าวอ้างถึงบทความนั้น

5. ข้อกำหนดการจัดพิมพ์ต้นฉบับบทความ

ผู้เขียนต้องจัดพิมพ์บทความตามข้อกำหนดเพื่อให้มีรูปแบบการตีพิมพ์เป็นมาตรฐานแบบเดียวกัน ดังนี้

5.1 ขนาดของกระดาษ ให้ใช้ขนาด A4

5.2 กรอบของข้อความ ระยะห่างของขอบกระดาษ

ด้านบน 2.5 ซม. (0.98")

ด้านล่าง 2 ซม. (0.79")

ด้านซ้าย 2 ซม. (0.79")

ด้านขวา 2 ซม. (0.79")

5.4 ระยะห่างระหว่างบรรทัด หนึ่งช่วงบรรทัดของเครื่องคอมพิวเตอร์ (Single)

5.4 ตัวอักษร รูปแบบของตัวอักษรให้ใช้ TH Sarabun New

5.5 รายละเอียดต่าง ๆ ของบทความ กำหนดดังนี้

ชื่อเรื่อง (Title) ขนาด 22 ตัวหนา กำหนดกึ่งกลาง

ชื่อผู้เขียน (Author) ขนาด 16 ตัวธรรมดา กำหนดกึ่งกลาง ไม่ต้องใส่คำนำหน้า

ที่ติดต่อผู้เขียน ขนาด 14 ตัวเอน กำหนดกึ่งกลาง

E-mail ผู้ประพันธ์บรรณกิจ (Corresponding Author) ขนาด 12 ตัวธรรมดา กำหนดกึ่งกลาง

บทคัดย่อ (Abstract) จัดรูปแบบการพิมพ์เป็นแบบ 1 คอลัมน์ ชื่อหัวข้อ ขนาด 14 **ตัวหนาและเอน** กำหนดกึ่งกลาง ข้อความในบทคัดย่อ ขนาด 14 ตัวธรรมดา

คำสำคัญ (Keywords) ให้ใส่คำสำคัญ 4-5 คำ ซึ่งเกี่ยวข้องกับบทความที่นำเสนอ โดยให้จัดพิมพ์ใต้บทคัดย่อ ขนาด 12 **ตัวหนาและเอน** กำหนดชิดซ้าย ข้อความในคำสำคัญ ขนาด 12 ตัวธรรมดา

รูปแบบการพิมพ์เนื้อหาของบทความ

- รูปแบบการพิมพ์เป็นแบบ 2 คอลัมน์ แต่ละคอลัมน์ กว้าง 8.2 ซม. (3.23") ระยะห่างระหว่างคอลัมน์ 0.6 ซม. (0.24")
- หัวข้อหลัก ประกอบด้วย บทนำ (INTRODUCTION) วัตถุประสงค์ของการวิจัย (OBJECTIVES) วิธีดำเนินการวิจัย (METHODS) ผลการวิจัยและอภิปรายผล (RESULTS AND DISCUSSION) สรุปผล (CONCLUSIONS) เอกสารอ้างอิง (REFERENCES) ขนาด 14 ตัวธรรมดา กำหนดกึ่งกลาง และมีเลขกำกับ เช่น 1) บทนำ หรือ I. INTRODUCTION เป็นต้น
- หัวข้อรอง ระดับที่ 1 ขนาด 14 ตัวเอน กำหนดชิดซ้าย
- หัวข้อรอง ระดับที่ 2 ขนาด 14 ตัวเอน กำหนดชิดซ้ายและเลื่อนเข้ามา 0.5 ซม.
- เนื้อเรื่อง ขนาด 14 ตัวธรรมดา
- ชื่อตาราง ขนาด 12 ตัวธรรมดา กำหนดกึ่งกลาง และใส่ชื่อเหนือตาราง
- หัวข้อในตาราง ขนาด 12 ตัวหนา กำหนดกึ่งกลาง เนื้อหาในตาราง ขนาด 12 ตัวธรรมดา
- ชื่อภาพประกอบ ขนาด 12 ตัวธรรมดา กำหนดกึ่งกลาง และใส่ชื่อใต้ภาพ
- เนื้อหาในภาพประกอบ ขนาด 12 ตัวธรรมดา

วารสารวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีดิจิทัล

ปีที่ 10 ฉบับที่ 2 กรกฎาคม – ธันวาคม 2565

5.6 เอกสารอ้างอิง

1. การอ้างอิงในเนื้อหาบทความใช้การอ้างอิงแบบตัวเลข ตามมาตรฐานสากล โดยใช้หมายเลขในเครื่องหมายก้ามปู [] และเรียงลำดับการอ้างอิงตามเนื้อหา โดยมีตัวอย่างการเขียน เช่น [1] หรือ [2] หรือ [1], [2] หรือ [1], [3]–[8] หรือ [9], [10], [15], [16] หากมีการอ้างอิงซ้ำบทความเดิมให้ใช้หมายเลขเดิม ตัวอย่างเช่น by Brown [4], [5]; as mentioned earlier [2], [4]–[7], [9]; Smith [4] and Brown and Jones [5]; Wood *et al.* [7]
2. รูปแบบของชื่อหัวข้อใช้รูปแบบตัวอักษร TH Sarabun New ขนาด 14 ตัวธรรมดา ในเนื้อหาขนาด 12 ตัวธรรมดา
3. การอ้างอิงท้ายบทความ จะต้องเรียงตามลำดับบทความที่เขียนอ้างอิงในเนื้อเรื่อง และใช้การอ้างอิงตามรูปแบบการอ้างอิง IEEE ซึ่งผู้เขียนสามารถศึกษาวิธีการเขียนเอกสารอ้างอิงตามรูปแบบที่กำหนดได้ที่เว็บไซต์ <https://ieeauthorcenter.ieee.org/wp-content/uploads/IEEE-Reference-Guide.pdf> โดยจะต้องเขียนเป็นภาษาอังกฤษเท่านั้น หากบทความอ้างอิงมาจากบทความภาษาไทย ต้องแปลเป็นภาษาอังกฤษให้ถูกต้อง
4. กรณีที่เอกสารที่นำมาอ้างอิงเขียนเป็นภาษาไทยให้เติมคำว่า “(in Thai)” เข้าไปในเอกสารอ้างอิง ดังเช่นตัวอย่างต่อไปนี้

ตัวอย่างรูปแบบการเขียนและการแปลเอกสารอ้างอิงภาษาไทยเป็นภาษาอังกฤษ

ตัวอย่างที่ 1 การอ้างอิงจากหนังสือ(Books)

Basic Format:

- [Number] J. K. Author, *Title of His Published Book*, xth ed. City of Publisher, State (only U.S.), Country: Abbrev. of Publisher, year.
- [Number] J. K. Author, “Title of chapter in the book,” in *Title of His Published Book*, xth ed. City of Publisher, State (only U.S.), Country: Abbrev. of Publisher, year, ch. x, sec. x, pp. xxx–xxx.

Examples:

- [1] V. Rijiravanich, *Work Study: Principles and Case Studies*, 4th ed. Bangkok, Thailand: Chulalongkorn University Press (in Thai), 2005.
วันชัย ริจิรวนิช, *การศึกษาการทำงาน: หลักการและกรณีศึกษา*, พิมพ์ครั้งที่ 4, กรุงเทพฯ, ประเทศไทย: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2548.
- [2] L. Edelstein-Keshet, *Mathematical Models in Biology*. New York, NY, USA: Random House, 1998.
- [3] K. J. Roodbergen, “Storage assignment for order picking in multiple-block warehouses,” in *Warehousing in the Global Supply Chain: Advanced Models, Tools and Applications for Storage Systems*. London, U.K.: Springer, 2012, pp. 139–155.

ตัวอย่างที่ 2 การอ้างอิงจากวารสาร (Periodicals)

Basic Format:

[Number] J. K. Author, "Name of paper," *Abbrev. Title of Periodical*, vol. x, no. x, pp. xxx-xxx, Abbrev. Month, year.

[Number] J. K. Author, "Name of paper," *Abbrev. Title of Periodical*, vol. x, no. x, pp. xxx-xxx, Abbrev. Month, year, doi: xxx.

Examples:

[4] N. Dechampai and K. Sethanan, "An application of lean manufacturing system in the textile of lean manufacturing system in the textile and garment industry case study: Wacoal Kabinburi Co., Ltd," (in Thai), *MBA-KKU Journal*, vol. 7, no. 2, pp. 13-27, 2014.

นิวัฒน์ เดชอำไพ และกาญจนา เศรษฐนันท์, "การเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการผลิตชุดชั้นในสตรีโดยประยุกต์ใช้แนวคิดการผลิตแบบลีน," *วารสารวิทยาลัยบัณฑิตศึกษากิจการมหาวิทยาลัยขอนแก่น*, ปีที่ 7, ฉบับที่ 2, หน้า 13-27, 2557.

[5] S.-F. Wang, H.-P. Chen, Y. Ku, and M.-X. Zhong, "Voltage-mode multifunction biquad filter and its application as fully-uncoupled quadrature oscillator based on current-feedback operational amplifiers," *Sensors*, vol. 20, no. 22, p. 6681, Nov. 2020, doi: 10.3390/s20226681.

[6] M. Dwiyaniti *et al.*, "Extremely high surface area of activated carbon originated from sugarcane bagasse," in *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, vol. 909, no. 1, 2020, pp. 1-8.

[7] M. Yoshiki, Y. Fujita, A. Kawamura, and H. Arai, "Instability of plates with holes (1st report)," (in Japanese), *J. Zosen Kiokai*, vol. 1967, no. 122, pp. 137-145, 1967.

ตัวอย่างที่ 3 การอ้างอิงจากการประชุมทางวิชาการ (Conferences and Conference Proceedings)

Basic Format:

[Number] J. K. Author, "Title of paper," in *Abbrev. Name of Conf.*, City, State (only U.S.), Country, Month year, pp. xxx-xxx.

Examples:

[8] N. Kriengkarakot, P. Kriengkarakot, S. Duan, P. Thung, and W. Piromsuk, "Repair work reduction in sewing process of the apparel factory," (in Thai), in *Proc. 10th Ubon Ratchathani Univ. Nat. Res. Conf.*, Ubon Ratchathani, Thailand, Jul. 2016, pp. 87-96.

นุชสรุา เกรียงกรกฎ, ปรีชา เกรียงกรกฎ, สกาวเดือน พรหมทุ่ง และวิจิตรา ภิรมย์สุข, "งานวิจัยการลดชิ้นส่วนงานซ่อมในขั้นตอนการเย็บของโรงงานผลิตเสื้อผ้าสำเร็จรูป," *การประชุมวิชาการระดับชาติ มอว. วิจัยครั้งที่ 10*, อุบลราชธานี, ประเทศไทย, 7-8 กรกฎาคม, 2559, หน้า 87-96.

[9] J. Lingad, S. Karimi, and J. Yin, "Location extraction from disaster-related microblogs," in *Proc. 22nd Int. Conf. World Wide Web*, Rio de Janeiro, Brazil, May 2013, pp. 1017-1020.

วารสารวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีดิจิทัล ปีที่ 10 ฉบับที่ 2 กรกฎาคม – ธันวาคม 2565

ตัวอย่างที่ 4 การอ้างอิงจากวิทยานิพนธ์ (Theses and Dissertations)

Basic Format:

[Number] J. K. Author, "Title of thesis," M.S. thesis / Ph.D. dissertation, Abbrev. Dept., Abbrev. Univ., City of Univ., Abbrev. State, year.

Examples:

- [10] N. Kawasaki, "Parametric study of thermal and chemical nonequilibrium nozzle flow," M.S. thesis, Dept. Electron. Eng., Osaka Univ., Osaka, Japan, 1993.
- [11] Y. Sornsa and P. Wanrerk, "Buckling of rectangular plates with a central square hole," (in Thai), B.S. thesis, Dept. Mech. Eng., Burapha Univ., Chonburi, Thailand, 2007.

6. วิธีการจัดส่งบทความ

ผู้เขียนส่งบทความออนไลน์ได้ที่ <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/TNIJournal>

เมื่อกองบรรณาธิการได้รับบทความจะดำเนินการส่งบทความเสนอผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความและแจ้งผลการพิจารณาให้ผู้เขียนบทความทราบ สำหรับบทความที่ผ่านการประเมินโดยผู้ทรงคุณวุฒิแล้วจะได้รับการตีพิมพ์ลงในวารสารเพื่อเผยแพร่ต่อไป

วารสารวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีดิจิทัล

ปีที่ 10 ฉบับที่ 2 กรกฎาคม – ธันวาคม 2565

“สร้างนักคิด ผลิตนักปฏิบัติ สร้างนักประดิษฐ์ ผลิตนักบริหาร”

คณะวิศวกรรมศาสตร์

หลักสูตรระดับปริญญาตรี

- หลักสูตรวิศวกรรมยานยนต์ (Automotive Engineering, B.Eng. : AE)
- หลักสูตรวิศวกรรมหุ่นยนต์และระบบอัตโนมัติแบบลีน (Robotics and Lean Automation Engineering, B.Eng. : RE)
- หลักสูตรวิศวกรรมคอมพิวเตอร์และปัญญาประดิษฐ์ (Computer Engineering and Artificial Intelligence, B.Eng. : CE)
- หลักสูตรวิศวกรรมอุตสาหกรรม (Industrial Engineering, B.Eng. : IE)
- หลักสูตรวิศวกรรมไฟฟ้า (Electrical Engineering, B.Eng. : EE)

หลักสูตรระดับปริญญาโท

- หลักสูตรเทคโนโลยีวิศวกรรม (Engineering Technology, M.Eng. : MET)

คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ

หลักสูตรระดับปริญญาตรี

- หลักสูตรเทคโนโลยีสารสนเทศ (Information Technology, B.Sc. : IT)
- หลักสูตรเทคโนโลยีมัลติมีเดีย (Multimedia Technology, B.Sc. : MT)
- หลักสูตรเทคโนโลยีสารสนเทศทางธุรกิจ (Business Information Technology, B.Sc. : BI)
- หลักสูตรเทคโนโลยีดิจิทัลทางสื่อสารมวลชน (Digital Technology in Mass Communication, B.Sc. : DC)

หลักสูตรระดับปริญญาโท

- หลักสูตรเทคโนโลยีสารสนเทศ (Information Technology, M.Sc. : MIT)

คณะบริหารธุรกิจ

หลักสูตรระดับปริญญาตรี

- หลักสูตรการจัดการเทคโนโลยีและนวัตกรรม (Management of Technology and Innovation, B.B.A. : MI)
- หลักสูตรบริหารธุรกิจญี่ปุ่น (Japanese Business Administration, B.B.A. : BJ)
- หลักสูตรการจัดการธุรกิจระหว่างประเทศ (International Business Management, B.B.A. : IB)
- หลักสูตรการบัญชี (Accountancy, B.Acc. : AC)
- หลักสูตรการจัดการทรัพยากรมนุษย์แบบญี่ปุ่น (Japanese Human Resources Management, B.B.A. : HR)
- หลักสูตรการจัดการโลจิสติกส์และโซ่อุปทาน (Logistics and Supply Chain Management, B.B.A. : LM)
- หลักสูตรการตลาดดิจิทัล (Digital Marketing, B.B.A. : DM)
- หลักสูตรการจัดการการท่องเที่ยวและการบริการเชิงนวัตกรรม (Innovative Tourism and Hospitality Management, B.B.A. : TH)

หลักสูตรระดับปริญญาโท

- หลักสูตรบริหารธุรกิจญี่ปุ่น (Japanese Business Administration, M.B.A. : MBJ)
- หลักสูตรนวัตกรรมจัดการธุรกิจและอุตสาหกรรม (Innovation of Business and Industrial Management, M.B.A. : MBI)
 - แขนงวิชา การวางแผนกลยุทธ์สำหรับผู้ประกอบการ (Strategic Planning and Management Entrepreneur : SPE)
 - แขนงวิชา การจัดการระบบการผลิต และโลจิสติกส์แบบลีน (Lean Manufacturing System and Logistics Management : LMS)

Thai-Nichi International College (TNIC)

Bachelor's Degree Programs

- Digital Engineering (DGE)
- Data Science and Analytics (DSA)
- Data Science and Analytics (DSA)
- Japanese for International Business (JIB)

Thai-Nichi Institute of Technology

1771/1 Pattanakarn Road, Suanluang, Bangkok 10250, Thailand

Tel: 0-2763-2600 Fax: 0-2763-2700

Website: <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/TNIJournal> E-mail: JEDT@tni.ac.th