



ISSN 0125-1724

วิศวกรรม
ลาดกระบัง

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

LADKRABANG ENGINEERING JOURNAL

ปีที่ 38 ฉบับที่ 2

เมษายน - มิถุนายน 2564

บทความวิจัย

1. สายอากาศปรับลำคลื่นแนวตั้งสำหรับการประยุกต์ใช้งานอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง 1
เอกภาพ อ้ายน้อย ณรงค์ นันทกุล รัฐพล จินะวงศ์ ชวงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์ และ
ศุภกิต แก้วดวงตา
2. การใช้ถ้ำกันเตาแทนที่ดินลูกรังประเภทกรวดสำหรับวัสดุงานทาง 9
พลิชฐ์ ตันตุลยกุล และ วีรยา นิมอ้อย
3. วิธีวิธีสถิติสำหรับฐานตาราง กรณีศึกษาหมากรุกไทยช่วงปลายกระดานในรูปแบบมวยเม็ต 17
ธนาพล ทัดสวน และ เกียรติกุล เจียรนัยชนะกิจ
4. การออกแบบสายอากาศแพตช์วงแหวนรูปวงกลมบนพื้นผิวอภิวัดรูปแบบเรโซเนเตอร์
วงแหวนแยกสำหรับการประยุกต์ใช้งานสองย่านความถี่ 31
จิณณัฐา เหมเมือง และ ชวงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์
5. การศึกษาปัจจัยในการคัดเลือกถนนขององค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นที่เชื่อมระหว่างจังหวัด 40
ณัฐวุฒิ เสียงแจ้ว วีระเกษตร สวนผกา และ เหมือนมาศ วิเชียรสินธุ์

“วิศวกรรมลาดกระบ้ง”

วิศวกรรมลาดกระบ้งเป็นวารสารทางวิชาการซึ่งจัดทำโดยคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบ้ง โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อ

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

วาระที่ออก

ปีละ 4 ฉบับ (ทุก 3 เดือนต่อฉบับ)

นโยบาย

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

รูปแบบของบทความ

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

บทความที่น่าสนใจเพื่อตีพิมพ์ ควรประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ตามลำดับ ดังนี้

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

กิตติกรรมประกาศ (ถ้ามี)

เอกสารอ้างอิง การอ้างในบทความให้ใช้หมายเลขประจำเอกสารหรือบทความที่อ้างอิง โดยตัว เลขจะอยู่ในวงเล็บใหญ่ โดยรูปแบบการเขียนเอกสารอ้างอิงจะเป็นดังนี้

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

การส่งบทความ

บทความที่จะส่งเปิดรับทั้งจากบุคคลภายในและภายนอกสถาบันฯ โดยเนื้อหาของบทความมีความยาวไม่เกิน 8 หน้า 2 คอลัมน์ ส่วนหน้าที่ 9 เป็นต้นไป ต้องเสียค่าตีพิมพ์หน้าละ 500 บาท ผู้เขียนจะต้องส่งต้นฉบับ 1 ชุด โดยหน้าแรกของบทความจะมีชื่อที่อยู่ของผู้เขียน 1 หน้า และหน้าแรกของบทความที่ไม่ระบุชื่อผู้เขียนอีก 1 หน้า รวมทั้งหมด 9 หน้า และกรณารับชื่อ-นามสกุล ที่อยู่ เบอร์โทรศัพท์ติดต่อ และ E-mail address ใช้ชัดเจนในแบบฟอร์มการส่งบทความด้วย ผู้เขียนสามารถส่งผ่านระบบวารสารออนไลน์ โดยลงทะเบียนและส่งบทความ ได้ที่ ลิงก์ <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/lej/about/submissions>

เจ้าของ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบ้ง

กรุงเทพฯ 10520

โทรศัพท์ (662) 329-8000 # 3464, 3465

โทรสาร (662) 329-8317

ที่ปรึกษา

คมบดี

รองศาสตราจารย์ ดร.สมยศ เกียรติวนิชวิไล

หัวหน้ากองบรรณาธิการ

รองศาสตราจารย์ ดร.อุมา สืบบุญเรือง

รองหัวหน้ากองบรรณาธิการ

รองศาสตราจารย์ ดร.จักรพงษ์ พงษ์พิ้ง

กองบรรณาธิการ

นางสาวชนัญชิตา นอบน้อม

ติดต่อประสานงาน

จัดทำต้นฉบับ Artwork

พิสูจน์อักษร และรูปเล่ม

นายทนงศักดิ์ ใจชื่นแสน

ออกแบบปก



วิศวกรรมลาดกระบัง

Faculty of Engineering King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ผู้ทรงคุณวุฒิในกองบรรณาธิการ “วิศวกรรมลาดกระบัง”

ศาสตราจารย์ ดร.ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ

สาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุ

คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต เอื้ออาภรณ์

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ศาสตราจารย์ ดร.ไพศาล กิตติศุภกร

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ศาสตราจารย์ ดร.เดวิด บรรเจิดพงศ์ชัย

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ศาสตราจารย์ ดร.ประยุทธ์ อัครเอกพาลิน

บัณฑิตวิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์นานาชาติ

สิรินธร ไทย-เยอรมัน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า-

พระนครเหนือ

ศาสตราจารย์ ดร.อภิศักดิ์ วรพิเชฐ

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

ศาสตราจารย์ ดร.สมชาย วงศ์วิเศษ

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ศาสตราจารย์ ดร.สมชาย ชูชีพสกุล

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ศาสตราจารย์ ดร.สราวุฒ สุจิตรจรร

สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน)

ศาสตราจารย์ ดร.ปานมนัส ศิริสมบูรณ์

ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร-

ลาดกระบัง

ศาสตราจารย์ ดร.วันชัย รั้วรุจา

ภาควิชาวิศวกรรมการวัดและควบคุม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร-

ลาดกระบัง

รองศาสตราจารย์ ดร.กรรณชัย กัลยาศิริ

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร-

ลาดกระบัง

รองศาสตราจารย์ ดร.จารุวัตร เจริญสุข

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร-

ลาดกระบัง

รองศาสตราจารย์ ดร.ปิติเชต สุริรักษา

ภาควิชาวิศวกรรมดนตรี

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร-

ลาดกระบัง

ศาสตราจารย์ ดร.โมนาย ไกรฤกษ์

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร-

ลาดกระบัง

ศาสตราจารย์ ดร.วัลลภ สุระกำพลธร (เกษียณอายุ)

วิทยาลัยนวัตกรรมการผลิตขั้นสูง

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร-

ลาดกระบัง

รองศาสตราจารย์ ดร. กอบชัย เดชหาญ (เกษียณอายุ)

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร-

ลาดกระบัง



วิศวกรรมลาดกระบัง

Faculty of Engineering King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

วันที่ 26 มิถุนายน 2564

เรื่อง แจ้งเพื่อทราบ

เรียน อาจารย์ นักวิจัย นักศึกษา และผู้สนใจ

กองบรรณาธิการ “วิศวกรรมลาดกระบัง” มีความประสงค์ขอเรียนแจ้งให้ท่านทราบรายละเอียดเกี่ยวกับงานวิศวกรรมลาดกระบัง ดังนี้

1. เว็บไซต์ใหม่ของวารสาร คือ <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/lej>
2. เนื้อหาของบทความให้มีความยาวจำนวนหน้า ความยาวไม่เกิน 8 หน้า 2 คอลัมน์ หากจำนวนหน้าของเนื้อหามากกว่า 8 หน้าขึ้นไป ในส่วนของหน้าที่ 9 เป็นต้นไป คิดราคาค่าตีพิมพ์เพิ่มหน้าละ 500 บาท (ห้าร้อยบาทถ้วน) โดยผู้แต่งต้องชำระเงินค่าตีพิมพ์ในจำนวนหน้าที่เกิน 8 หน้า หลังจากที่ยื่นบทความแก้ไขสมบูรณ์แล้ว และได้รับหนังสือการตอบรับการตีพิมพ์จากงานวารสารวิศวกรรมลาดกระบัง
3. การส่งบทความเพื่อพิจารณาตีพิมพ์ในวิศวกรรมลาดกระบัง ผู้เขียนบทความสามารถเสนอรายชื่อผู้ทรงคุณวุฒิที่เกี่ยวข้องในสาขาที่ท่านส่งมา จำนวน 2 ท่าน โดยแนบมาพร้อมแบบฟอร์มการส่งบทความด้วยทุกครั้ง

จึงเรียนมาเพื่อโปรดทราบ จักขอบพระคุณยิ่ง

ขอแสดงความนับถือ

(รองศาสตราจารย์ ดร.อุมา สิบบุญเรือง)

หัวหน้ากองบรรณาธิการ

สายอากาศปรับลำคลื่นแนวตั้งสำหรับการประยุกต์ใช้งาน อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง

Vertical Beam Adjustable Antenna for Internet of Things Applications

เอกภาพ อ้ายน้อย¹ ณรงค์ นันทกุล¹ รัฐพล จินะวงศ์¹ ชูวงศ์ พงษ์เจริญพาณิชย์² และ สุภกิต แก้วดวงตา^{1,*}

¹สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงใหม่

²ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

Ekkapap Aynoi, Narong Nanthakusol, Ratapon Jeenawong¹, Chuwong Phongcharoenpanich² and Supakit Kawdungta^{1,*}

¹Department of Electrical Engineering Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna, Chiang Mai

²Department of Telecommunications Engineering, School of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

*Corresponding Author E-mail: supakitting@rmutl.ac.th

Received: April 19, 2021 Revised: May 13, 2021 Accepted: May 17, 2021

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอสายอากาศปรับลำคลื่นสำหรับระบบลอว์แวนในช่วงความถี่ 920-925 MHz ซึ่งสายอากาศที่นำเสนอสามารถปรับลำคลื่นได้ 4 ทิศทางในระนาบแนวตั้ง โครงสร้างของสายอากาศประกอบด้วยโครงสร้างโมโนโพลแบบเส้นลวดวางอยู่บนระนาบกราวด์ร่วมกับแผ่นพาราซิติกรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าจำนวน 4 แผ่นวางล้อมรอบและพินไดโอดจำนวน 4 ตัว ถูกนำมาใช้ในการควบคุมทิศทางการปรับลำคลื่นด้วยการเชื่อมต่อระหว่างแผ่นพาราซิติกกับระนาบกราวด์ จากผลการออกแบบและทดสอบพบว่าสายอากาศปรับลำคลื่นมีค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ใกล้เคียง 50Ω และมีค่า $|S_{11}|$ ต่ำกว่า -10 dB ในช่วงความถี่ 920-925 MHz มีอัตราขยายเท่ากับ 2.85 dBi และสามารถปรับลำคลื่นได้ 4 ทิศทางในระนาบแนวตั้ง

คำสำคัญ: พินไดโอด แผ่นพาราซิติก สายอากาศปรับลำคลื่น ลอว์แวน

Abstract

This article presents an adjustable beam antenna for Long Range Wide Area Network (LoRaWAN) in the frequency of 920-925 MHz. The proposed antenna can be adjusted in four directions of the vertical plane. The antenna structure consists of a wire monopole structure placed on the ground plane with surrounding four parasitic patches and four PIN diodes used to adjust the beam of the antenna. From simulated and measured results, it is found that the proposed antenna has an input impedance of 50Ω , $|S_{11}|$ less than -10 dB in the frequency of 920-925 MHz and antenna gain equal to 2.48 dBi. It can be efficiently adjusted the main beam of the antenna in four directions on the vertical plane.

Keywords: Adjustable Beam Antenna, Long Range Wide Area Network (LoRaWAN), PIN diode and Parasitic Patch.

1. บทนำ

จากวิวัฒนาการของการสื่อสารแบบไร้สายที่มีการพัฒนาเพิ่มมากขึ้นจนถึงปัจจุบันนี้เทคโนโลยีหนึ่งที่ถูกมุ่งเน้นและมีแนวโน้มว่าจะมีความต้องการในการใช้งานมากยิ่งขึ้นก็คือ เทคโนโลยีการสื่อสารแบบอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (Internet Of Things : IoT) ซึ่งเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งนี้มีการใช้งานหลายแบบ ยกตัวอย่างเช่น อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งแบบช่วงความถี่แคบ (Narrowband Internet Of Things : NB-IoT) ลอราแวน (Long Range Wide Area Network : LoRaWAN) เครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย (Wireless Local Area Network : WLAN) หรือ ไวไฟ (Wireless Fidelity : Wi-Fi) และ บลูทูธ (Bluetooth) เป็นต้น โดยเทคโนโลยีแต่ละแบบมีข้อดีข้อเสียที่แตกต่างกันออกไปคือ อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งแบบช่วงความถี่แคบและลอราแวนจะเป็นลักษณะของการสื่อสารแบบไร้สายที่สามารถครอบคลุมได้บริเวณกว้างไกลโดยใช้พลังงานต่ำ (Low Power Wide Area Network : LPWAN) ระยะทางการติดต่อสื่อสารประมาณ 1 km ถึง 15 km จากสถานีฐานแต่อัตราการส่งผ่านข้อมูลจะไม่สูงมากนัก ในส่วนของเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายและบลูทูธจะเป็นการสื่อสารแบบไร้สายแบบเฉพาะพื้นที่ที่จำกัดหรือในพื้นที่ส่วนบุคคลมีระยะทางการติดต่อสื่อสาร 5 m ถึง 100 m จากตัวกระจายสัญญาณแต่จะมีอัตราการส่งข้อมูลที่สูงจากการพัฒนาของเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งที่จะเป็นส่วนผลักดันให้เกิดการพัฒนาในด้านต่างๆ เช่น บ้านอัจฉริยะ (Smart Home) เมืองอัจฉริยะ (Smart City) เกษตรอัจฉริยะ (Smart Agriculture) และ ระบบโครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะ (Smart Grid) เป็นต้น [1]

จากการพัฒนาในด้านต่างๆ ที่กล่าวมาแล้วจะเห็นได้ว่าระบบอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งที่สามารถรองรับระบบอัจฉริยะต่างๆ ได้ต้องมีความสามารถในการติดต่อสื่อสารในระยะไกลและใช้กำลังงานต่ำ จึงเป็นเหตุให้อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งแบบช่วงความถี่แคบและลอราแวนได้รับความสนใจเพิ่มมากขึ้นและสิ่งที่สำคัญของระบบการ

ติดต่อสื่อสารแบบไร้สายทั่วไปก็คือ การติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องลูกข่ายและสถานีฐาน โดยปัญหาส่วนใหญ่ที่ทำให้การติดต่อสื่อสารมีประสิทธิภาพลดลงคือ สายอากาศของเครื่องลูกข่ายที่ไม่มีประสิทธิภาพ จึงทำให้เกิดการพัฒนาสายอากาศสำหรับเครื่องลูกข่ายที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้นและมีขนาดเล็กกะทัดรัดเพียงพอที่จะฝังตัวอยู่ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ ได้ดังแสดงในเอกสารอ้างอิงที่ [2]-[3] อย่างไรก็ตามหากเกิดปัญหาระดับความแรงของสัญญาณระหว่างสถานีฐานและเครื่องลูกข่ายลดต่ำลงหรือเกิดสัญญาณรบกวนจากแหล่งกำเนิดอื่นๆ จะทำให้การติดต่อสื่อสารมีประสิทธิภาพลดลงได้เช่นกัน จึงทำให้เกิดการพัฒนาสายอากาศที่สามารถเลือกทิศทางการรับส่งสัญญาณได้หรือสายอากาศปรับลำคลื่น ซึ่งสายอากาศชนิดนี้จะสามารถควบคุมและเลือกทิศทางการรับส่งสัญญาณได้ด้วยสัญญาณไฟฟ้าและจะเพิ่มประสิทธิภาพของการติดต่อสื่อสารและลดการเกิดสัญญาณรบกวนในระบบการติดต่อสื่อสารได้ โดยได้มีการนำเสนอสายอากาศปรับลำคลื่นในหลายรูปแบบดังในงานวิจัยและบทความวิชาการดังนี้ สายอากาศแถวลำดับเชิงเส้น (Linear Array) ที่มีองค์ประกอบย่อยแบบยกร่วมกับระบบสวิตช์ลำคลื่นถูกนำเสนอสำหรับการใช้งานในระบบการสื่อสารแบบไร้สายที่สถานีฐาน (Base Station) เพื่อปรับปรุงการส่งสัญญาณให้ครอบคลุมพื้นที่และปรับปรุงระดับสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนที่เครื่องลูกข่ายได้ [4] และในเอกสารอ้างอิงที่ [5] ได้มีการนำเสนอระบบสายอากาศสวิตช์ลำคลื่นแบบอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic Beam Switching Antenna : EBSA) ในบทความนี้ใช้สายอากาศแบบไมโครสตริปเป็นองค์ประกอบย่อยร่วมกับระบบการปรับลำคลื่นที่มีสวิตช์ความถี่สูงอยู่ภายในโดยสายอากาศถูกนำไปใช้ในการสื่อสารแบบจุดไปยังหลายจุด (Point to Multipoint) ในระบบของอากาศยานไร้คนขับ (Unmanned Aerial Vehicle : UAV) จากบทความที่กล่าวผ่านมานั้นจะเห็นว่าสายอากาศปรับลำคลื่นนั้นสามารถที่จะใช้ปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารแบบไร้สายได้

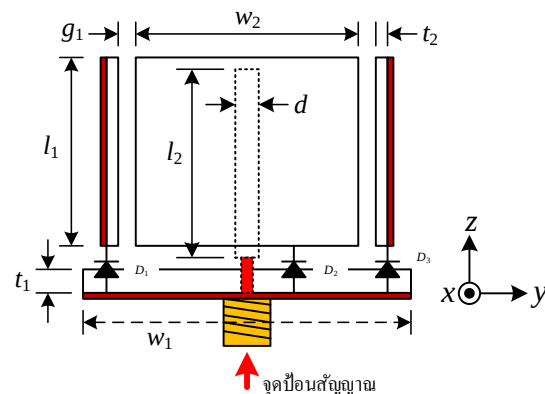
ด้วยการเลือกทิศทางการรับส่งสัญญาณและยังสามารถปรับปรุงระดับสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนได้ โดยทั่วไปการปรับค่าคลื่นนี้สามารถออกแบบได้ด้วยการใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ 2 แบบคือ การออกแบบด้วยการใช้สวิตช์ความถี่สูง (RF Switch) ซึ่งอุปกรณ์นี้จะมีลักษณะการทำงานด้วยการรับระดับแรงดันแบบดิจิทัลเพื่อทำการควบคุมการเชื่อมต่อหรือตัดวงจรของระบบสายอากาศสวิตช์ค่าคลื่นดังแสดงในเอกสารอ้างอิงที่ [6]-[8] และอุปกรณ์แบบที่สองที่นิยมใช้คือ พินไดโอด (PIN Diode) โดยมีหลักการทำงานเหมือนกับไดโอดทั่วไปแต่จะสามารถรองรับการทำงานที่ความถี่สูงได้ดังแสดงในเอกสารอ้างอิงที่ [9]-[10] อีกทั้ง L. H. Trinh และคณะ ได้มีการนำเสนอการใช้สายอากาศที่สามารถปรับค่าคลื่นนี้ในระบบอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งในส่วนของการสื่อสาร [11]

ดังนั้นในบทความนี้จึงนำเสนอการออกแบบสายอากาศปรับค่าคลื่นเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบลอราแวนในช่วงความถี่ 920-925 MHz โดยสายอากาศที่นำเสนอนี้สามารถปรับค่าคลื่นได้ 4 ทิศทางครอบคลุม 360 องศา ในระนาบมุมยก [12] เหมาะสำหรับการใช้งานกับเครื่องลูกข่ายเพื่อใช้ติดต่อสื่อสารกับสถานีฐานที่อยู่รอบๆ เครื่องลูกข่ายในระดับความสูงต่างกัน โครงสร้างของสายอากาศประกอบด้วยโครงสร้างโมโนโพลแบบเส้นลวดวางอยู่บนระนาบกราวด์ร่วมกับแผ่นพาราซิติกรุปสี่เหลี่ยมผืนผ้าจำนวน 4 แผ่นวางล้อมรอบและพินไดโอดจำนวน 4 ตัว ถูกนำมาใช้ในการควบคุมทิศทางการปรับค่าคลื่นด้วยการเชื่อมต่อระหว่างแผ่นพาราซิติกกับระนาบกราวด์

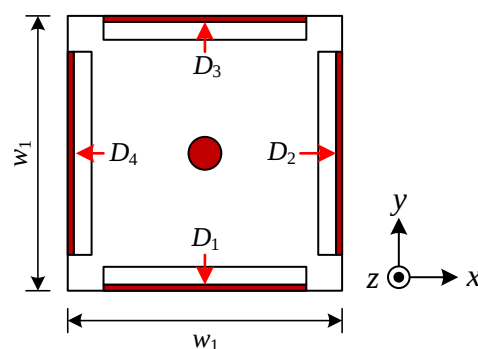
2. โครงสร้างและส่วนประกอบของสายอากาศปรับค่าคลื่น

บทความนี้นำเสนอสายอากาศปรับค่าคลื่นที่สามารถปรับค่าคลื่นหลักได้ในระนาบแนวตั้ง (Vertical Plane) ใน 4 ทิศทาง โดยมีโครงสร้างของสายอากาศแสดงดังรูปที่ 1 ประกอบด้วยโครงสร้างโมโนโพลร่วมกับระนาบกราวด์เป็นส่วนแพร่กระจายคลื่นและมีแผ่นพาราซิติกรุปสี่เหลี่ยมจำนวน 4 แผ่น วางอยู่บนระนาบกราวด์รอบตัวสายอากาศโมโนโพล ซึ่งแผ่นพาราซิติกแต่ละแผ่นจะถูกเชื่อมต่อกับระนาบกราวด์ด้วยพินไดโอด (PIN Diode) ณ จุดกึ่งกลาง

ของขอบล่างของแผ่นพาราซิติกแต่ละแผ่นเพื่อใช้สำหรับปรับค่าคลื่นหลักใน 4 ทิศทาง ด้วยพินไดโอดจำนวน 4 ตัว คือ D_1 , D_2 , D_3 และ D_4 ตามลำดับ ตารางที่ 1 แสดงการอธิบายเกี่ยวกับค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศปรับค่าคลื่นแบบโมโนโพลร่วมกับแผ่นพาราซิติก



(ก) มุมมองด้านข้าง



(ข) มุมมองด้านบน

รูปที่ 1 โครงสร้างของสายอากาศปรับค่าคลื่นแบบโมโนโพลร่วมกับแผ่นพาราซิติก

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ของสายอากาศปรับค่าคลื่นแบบโมโนโพลร่วมกับแผ่นพาราซิติก

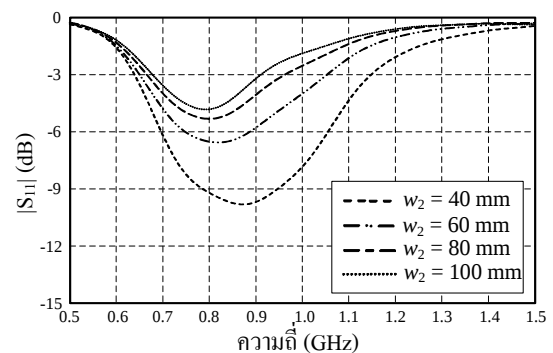
พารามิเตอร์	คำอธิบาย	ขนาด (mm)
w_1	ความกว้างของแผ่นระนาบกราวด์	55
w_2	ความกว้างของแผ่นพาราซิติก	40
l_1	ความยาวของแผ่นพาราซิติก	43
l_2	ความยาวของสายอากาศโมโนโพล	43
t_1	ความหนาของวัสดุฐานรอง	1.6
g_1	ระยะห่างระหว่างแผ่นพาราซิติก	5.8
d	เส้นผ่านศูนย์กลางของสายอากาศโมโนโพล	6

3. ผลการจำลองแบบ

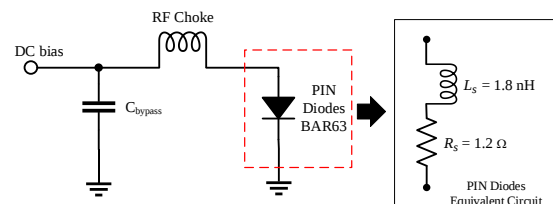
จากโครงสร้างของสายอากาศปรับค่าคลื่นแบบโมโนโพลร่วมกับแผ่นพาราซิติคที่แสดงดังรูปที่ 1 ในการออกแบบสายอากาศที่นำเสนอจะเริ่มจากการออกแบบสายอากาศโมโนโพลที่วางอยู่บนระนาบกราวด์ก่อน ซึ่งจะพิจารณาที่ความถี่กลาง (f_c) เท่ากับ 922.5 MHz และมีความยาวคลื่น (λ) เท่ากับ 325.20 mm โดยพิจารณาความยาวของสายอากาศโมโนโพล (l_2) เท่ากับ $\lambda/4$ (81.30 mm) ค่าความกว้างและความยาวของระนาบกราวด์เท่ากับ λ (325.20 mm) แล้วทำการปรับเส้นผ่านศูนย์กลางของสายอากาศโมโนโพล (d) เพื่อให้เกิดเรโซแนนซ์ (Resonance) ที่ความถี่กลางและเพื่อให้มีช่วงกว้างความถี่ครอบคลุมช่วงความถี่ใช้งาน พบว่าเส้นผ่านศูนย์กลางที่ทำให้เกิดความถี่เรโซแนนซ์ที่ดีที่สุดและทำให้ช่วงกว้างความถี่เพียงพอต่อการใช้งานมีค่าเท่ากับ 6 mm อย่างไรก็ตามพบว่าหากเส้นผ่านศูนย์กลางของสายอากาศโมโนโพลมีขนาดเล็กลงจะเป็นผลทำให้ช่วงความถี่ของสายอากาศแคบลงและทำให้ความสูงของแผ่นพาราซิติคที่ใช้ในการปรับค่าคลื่นเปลี่ยนแปลงไป จากนั้นนำแผ่นพาราซิติคที่เป็นแผ่นวงจรพิมพ์ (Printed Circuit Board : PCB) ชนิด FR4 ($\epsilon_r = 4.3$) ที่มีความหนาเท่ากับ 1.6 mm โดยมีแผ่นทองแดงด้านเดียวรูปทรงสี่เหลี่ยมมาวางล้อมรอบตัวสายอากาศโมโนโพลทั้งสี่ด้านแล้วทำการปรับความกว้างของแผ่นพาราซิติคหรือ w_2 เท่ากับ 40 mm 60 mm 80 mm และ 100 mm โดยกำหนดให้ l_1 มีค่าเท่ากับ $\lambda/4$ (81.30 mm) พบว่าความกว้างของแผ่นพาราซิติคที่วางล้อมรอบสายอากาศโมโนโพลนั้นมีผลทำให้ค่า $|S_{11}|$ เลื่อนไปเรโซแนนซ์ที่ความถี่ต่ำลงตามความกว้างของแผ่นพาราซิติคที่เพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2 จะเห็นได้ว่าค่าความกว้างของแผ่นพาราซิติคที่ทำให้เกิดเรโซแนนซ์ใกล้เคียงกับความถี่กลางมากที่สุดคือ w_2 เท่ากับ 40 mm อย่างไรก็ตามในขณะที่ทำการปรับค่า w_2 จะเป็นผลทำให้ค่าความกว้างของแผ่นระนาบกราวด์ (w_1) และระยะห่างระหว่างแผ่นพาราซิติค (g_1) มีค่าลดลงตามกันไปด้วยและจะเป็นผลทำให้แผ่นพาราซิติคนั้นสามารถที่จะปรับค่าคลื่นได้ดีขึ้นด้วย จากนั้นทำการปรับขนาดของระนาบกราวด์ให้มีขนาดเล็กลงพอดี

กับระยะของแผ่นพาราซิติคแล้วจึงปรับค่าความสูงของแผ่นพาราซิติคต่อไปเพื่อให้เกิดการเรโซแนนซ์ที่ความถี่กลางมากยิ่งขึ้นและทั้งนี้เพื่อให้สามารถควบคุมค่าคลื่นของสายอากาศโมโนโพลได้จึงทำการปรับค่าความยาวของแผ่นพาราซิติคไปพร้อมกับความยาวของสายอากาศโมโนโพล

เมื่อได้โครงสร้างของสายอากาศปรับค่าคลื่นแบบโมโนโพลร่วมกับแผ่นพาราซิติคแล้วจึงทำการพิจารณาในส่วนของการควบคุมการเปลี่ยนแปลงของค่าคลื่น โดยจะใช้พินไดโอดเบอร์ BAR63 [13] จำนวน 4 ตัว แต่ละตัวเชื่อมต่อกับแผ่นพาราซิติค ณ จุดกึ่งกลางของขอบล่างเพื่อใช้สำหรับปรับค่าคลื่นหลักใน 4 ทิศทาง และจะทำการควบคุมสถานะการนำกระแสของพินไดโอดด้วยการป้อนไบอัสตรง (Forward Bias) และสถานะหยุดนำกระแสด้วยการป้อนไบอัสกลับ (Reverse Bias) รูปที่ 3 แสดงวงจรควบคุมสถานะของพินไดโอดและวงจรสมมูลในกรณีที่พินไดโอดนำกระแส

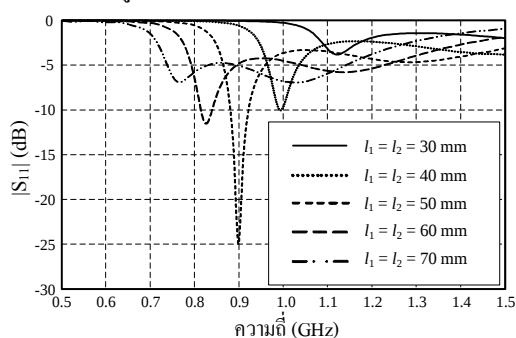


รูปที่ 2 ค่า $|S_{11}|$ ของสายอากาศแบบโมโนโพลร่วมกับแผ่นพาราซิติคเมื่อปรับค่า w_2



รูปที่ 3 วงจรควบคุมสถานะการทำงานของพินไดโอดและวงจรสมมูลในสถานะนำกระแส

จากการที่นำพินไดโอดมาเชื่อมต่อกับโครงสร้างของสายอากาศพบว่าในสถานะการนำกระแสของพินไดโอดเพื่อการควบคุมทิศทางของลำคลื่นหลักนั้นจะเกิดค่าความต้านทานและค่าความเหนี่ยวนำขึ้นซึ่งสามารถแสดงเป็นวงจรสมมูล (Equivalent Circuit) ได้ดังแสดงในรูปที่ 3 และจะเป็นผลทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศเกิดการเปลี่ยนแปลงไปจึงต้องทำการปรับค่าความยาวของสายอากาศโมโนโพล (l_2) และความยาวของแผ่นพาราซิติค (l_1) เพื่อให้เกิดสถานะเรโซแนนซ์ที่ความถี่กลางอีกครั้ง จากผลการจำลองในรูปที่ 4 พบว่าเมื่อปรับค่า l_1 และ l_2 จาก 30 mm ถึง 70 mm ทำให้ความถี่เรโซแนนซ์เปลี่ยนแปลงและที่ความยาว 50 mm มีค่า $|S_{11}|$ ที่ต่ำที่สุดที่ความถี่ 900 MHz สังเกตเห็นว่าความยาวของสายอากาศโมโนโพลนั้นจะสั้นกว่า $\lambda/4$ เนื่องจากสายอากาศโมโนโพลนั้นมีเส้นผ่านศูนย์กลางที่กว้างซึ่งทำให้ช่วงกว้างความถี่เพิ่มขึ้นแต่ในขณะที่ความยาวสั้นลง เมื่อได้ค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศปรับลำคลื่นแบบโมโนโพลร่วมกับแผ่นพาราซิติคเป็นที่เรียบร้อยแล้วทำการปรับค่าที่เหมาะสมอีกครั้งจะได้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ตามแนวทางการออกแบบสายอากาศโมโนโพลในเอกสารอ้างอิงที่ [14] ดังแสดงในตารางที่ 1 และผลการจำลองของสายอากาศปรับลำคลื่นแบบโมโนโพลร่วมกับแผ่นพาราซิติคเมื่อเชื่อมต่อกับพินไดโอดแสดงดังรูปที่ 5 และ 6 ตามลำดับ



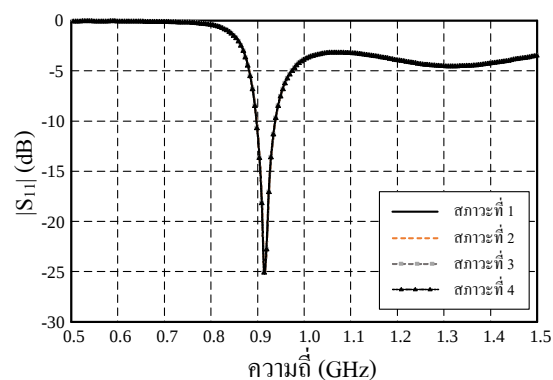
รูปที่ 4 ค่า $|S_{11}|$ ของสายอากาศแบบโมโนโพลร่วมกับแผ่นพาราซิติคเชื่อมต่อกับพินไดโอดเมื่อปรับค่า l_1 และ l_2

จากผลการจำลองของสายอากาศแบบโมโนโพลร่วมกับแผ่นพาราซิติคเมื่อเชื่อมต่อกับพินไดโอดสามารถทำการปรับเปลี่ยนลำคลื่นได้ 4 สถานะ ด้วยการควบคุมการ

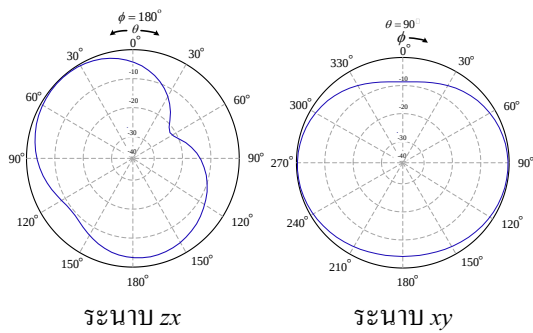
นำกระแสของพินไดโอดดังแสดงในตารางที่ 2 โดยทั้ง 4 สถานะนั้นจะสามารถเลือกทิศทางการแพร่กระจายคลื่นได้ 4 ทิศทาง ในระนาบแนวตั้ง (Vertical Plane, θ) ที่มุม θ เท่ากับ 43 องศา ไปตามระนาบแนวนอน (Horizontal Plane, ϕ) ที่มุม ϕ เท่ากับ 180 270 0 และ 90 องศาตามลำดับ ทั้ง 4 สถานะมีความกว้างลำคลื่นเท่ากันเท่ากับ 97.7 องศา และมีอัตราขยายเท่ากับ 2.48 dBi ทั้งนี้ ค่า $|S_{11}|$ ของทั้ง 4 สถานะ ได้แสดงในรูปที่ 5 พบว่ามีลักษณะที่เหมือนกันเนื่องมาจากโครงสร้างของสายอากาศที่สมมาตรกันและมี $|S_{11}|$ ต่ำกว่า -10 dB ในช่วงความถี่ 900 – 937 MHz

ตารางที่ 2 การควบคุมทิศทางการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศปรับลำคลื่นแบบโมโนโพลร่วมกับแผ่นพาราซิติคด้วยพินไดโอด

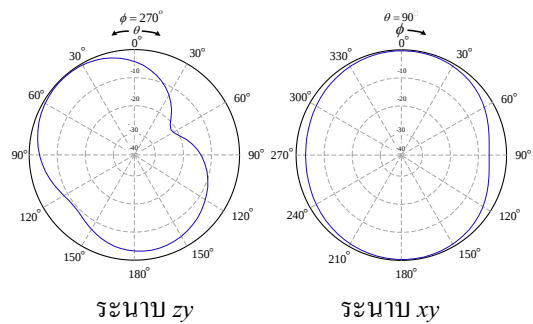
สถานะที่	พินไดโอด				ทิศทางของลำคลื่นหลัก (ϕ, θ)	ความกว้างลำคลื่น
	D_1	D_2	D_3	D_4		
1	ON	OFF	OFF	OFF	(180°, 43°)	97.7°
2	OFF	ON	OFF	OFF	(270°, 43°)	97.7°
3	OFF	OFF	ON	OFF	(0°, 43°)	97.7°
4	OFF	OFF	OFF	ON	(90°, 43°)	97.7°



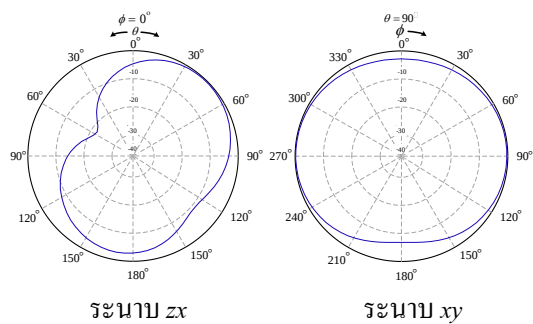
รูปที่ 5 ค่า $|S_{11}|$ ของสายอากาศปรับลำคลื่นแบบโมโนโพลร่วมกับแผ่นพาราซิติคเมื่อทำการควบคุมด้วยพินไดโอด



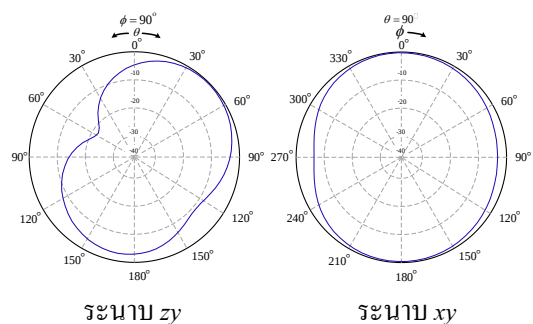
(ก) สภาวะที่ 1



(ข) สภาวะที่ 2



(ค) สภาวะที่ 3



(ง) สภาวะที่ 4

รูปที่ 6 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศปรับลำคลื่นแบบโมโนโพลร่วมกับแผ่นพาราซิติคเมื่อทำการควบคุมด้วยพินไดโอด

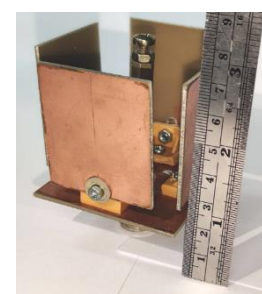
4. ผลการทดสอบ

ในหัวข้อนี้เป็นการนำผลที่จากการจำลองมาสร้างสายอากาศต้นแบบและทำการทดสอบคุณสมบัติ โดยสายอากาศปรับลำคลื่นแบบโมโนโพลร่วมกับแผ่นพาราซิติคที่ได้ทำการออกแบบถูกสร้างขึ้น โดยสายอากาศโมโนโพลสร้างด้วยแท่งโลหะ ในส่วนของระนาบกราวด์และแผ่นพาราซิติคถูกสร้างด้วยแผ่นวงจรพิมพ์ชนิด FR4 ($\epsilon_r = 4.3$) ที่มีความหนาเท่ากับ 1.6 mm และได้นำเอาทองแดงออกหนึ่งด้าน รูปที่ 7 แสดงภาพถ่ายของสายอากาศต้นแบบที่ทำการสร้างขึ้น

จากนั้นนำพินไดโอดมาเชื่อมต่อ ณ จุดที่ได้ทำการออกแบบไว้ทั้ง 4 ด้าน และทำการเชื่อมต่อกับวงจรควบคุมเมื่อได้ต้นแบบที่สมบูรณ์แล้วจึงทำการทดสอบค่า $|S_{11}|$ ของสายอากาศต้นแบบซึ่งพบว่าสายอากาศต้นแบบสามารถที่จะปรับลำคลื่นได้ทั้ง 4 สภาวะ ด้วยการควบคุมการป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงและเมื่อสายอากาศต้นแบบเปลี่ยนแปลงไปทั้ง 4 สภาวะค่าของ $|S_{11}|$ ที่ทดสอบได้นั้นค่อนข้างที่จะสอดคล้องกันในที่นี้จึงแสดงผลเฉพาะค่า $|S_{11}|$ ของสภาวะที่ 1 เปรียบเทียบกับผลการจำลองแบบ จากผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 8 สายอากาศต้นแบบมีค่า $|S_{11}|$ ครอบคลุมช่วงความถี่ 900-980 MHz และมีค่า $|S_{11}|$ ต่ำกว่า -10 dB ซึ่งสอดคล้องกับผลที่ได้จากการจำลองแบบ

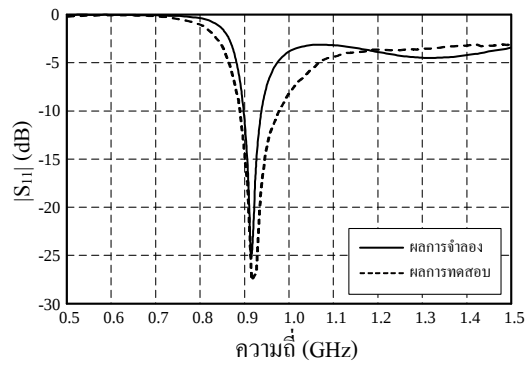


(ก) ด้านบน



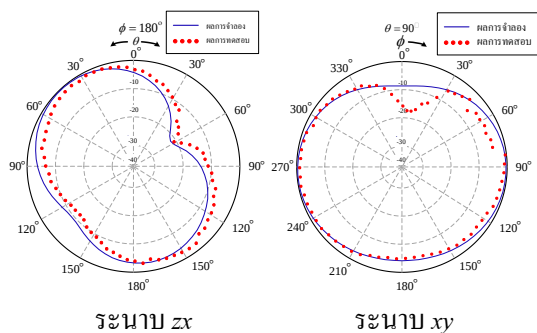
(ข) ด้านข้าง

รูปที่ 7 ภาพถ่ายของสายอากาศปรับลำคลื่นแบบโมโนโพลร่วมกับแผ่นพาราซิติคต้นแบบที่ทำการสร้างขึ้น

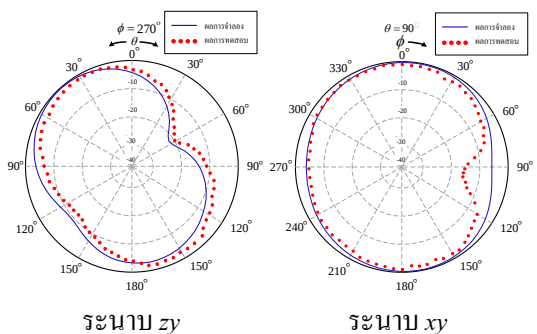


รูปที่ 8 ค่า $|S_{11}|$ ของสายอากาศปรับค่าคลื่นแบบโมนโพล
ร่วมกับแผ่นพาราซิติคต้นแบบเมื่อทำการควบคุม
ด้วยพินไดโอดในสภาวะที่ 1

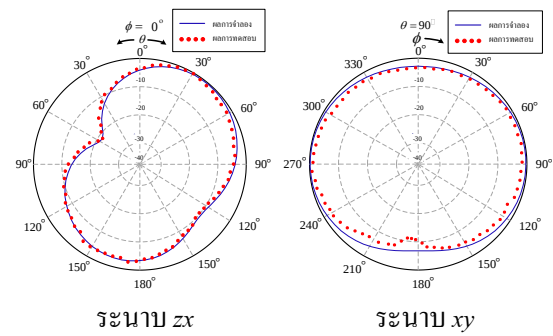
สุดท้ายได้ทำการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น
ของสายอากาศต้นแบบทั้ง 4 สภาวะ ทั้งในระนาบแนวนอน
และระนาบแนวตั้งพบว่าสายอากาศสามารถที่จะปรับค่า
คลื่นหลักที่พุ่งขึ้นตามระนาบแนวตั้งไปตามระนาบ
แนวนอนได้ทั้งหมด 4 ทิศทาง มีความกว้างลำคลื่น 90
องศาและอัตราขยาย 2.85 dBi ดังแสดงในรูปที่ 9



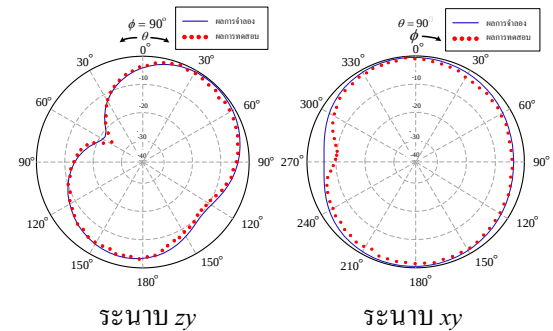
(ก) สภาวะที่ 1



(ข) สภาวะที่ 2



(ค) สภาวะที่ 3



(ง) สภาวะที่ 4

รูปที่ 9 ผลการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของ
สายอากาศปรับค่าคลื่นแบบโมนโพลร่วมกับแผ่น
พาราซิติคเมื่อทำการควบคุมด้วยพินไดโอด

5. สรุปผล

สายอากาศปรับค่าคลื่นสำหรับระบบลอว์แวนในช่วง
ความถี่ 920-925 MHz ที่ได้ทำการออกแบบและทดสอบ
นั้นสามารถปรับค่าคลื่นได้ 4 ทิศทางในระนาบแนวตั้ง จาก
โครงสร้างของสายอากาศที่ประกอบด้วยสายอากาศโม
โพลวางอยู่บนระนาบกราวด์ร่วมกับแผ่นพาราซิติกรูป
สี่เหลี่ยมผืนผ้าจำนวน 4 แผ่น วางล้อมรอบและพินไดโอด
จำนวน 4 ตัว สามารถนำมาใช้ในการควบคุมทิศทางการ
ปรับค่าคลื่นด้วยการเชื่อมต่อระหว่างแผ่นพาราซิติคกับ
ระนาบกราวด์ จากผลการออกแบบและทดสอบพบว่า
สายอากาศปรับค่าคลื่นมีค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ใกล้เคียง 50
 Ω และมีค่า $|S_{11}|$ ต่ำกว่า -10 dB ในช่วงความถี่ 900-980
MHz มีอัตราขยายเท่ากับ 2.85 dBi

6.เอกสารอ้างอิง

- [1] C. Khunboa, "IoT Architecture: Internet of Things", Se-Ed, Bangkok, 2019.
- [2] L.H. Trinh, T. Q. K. Nguyen, D. D. Phan, V. Q. Tran, V. X Bui, N. V. Truong and F. Ferrero, "Miniature Antenna for IoT Devices Using LoRa Technology," 2017 International Conference on Advanced Technologies for Communications (ATC), pp. 170-173, October 2017.
- [3] Q. Zhang and Y. Gao, "Embedded Antenna Design On LoRa Radio for IoT Applications," 12th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2018), pp. 1-3, April 2018.
- [4] V. Ludwig-Barbosa, E. Schlosser, R. Machado, F. G. Ferreira, S. M. Tolfo and M. V. T. Heckler, "Linear Array Design with Switched Beams for Wireless Communications Systems," International Journal of Antennas and Propagation, Vol. 2015, Article ID 278160, pp. 1-9, April 2015.
- [5] D. R. Jahagirdar and K. Sambasiva Rao, "Design and Development of Electronic Beam Switching Antenna for Point-to-Multipoint Long Range Data Link Applications," 2017 IEEE International Conference on Antenna Innovations & Modern Technologies for Ground, Aircraft and Satellite Applications (iAIM), Bangalore, India, pp. 1-4, November 2017.
- [6] Y. Li and Z.-C. Hao, "A Wideband Switched Beam Antenna for Full 360° Coverage," 2017 Sixth Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation (APCAP), Xi'an, China, pp. 1-3, October 2017.
- [7] C. W. Jung, M.-J. Lee, G. P. Li and F. De Flaviis, "Reconfigurable Scan-Beam Single-Arm Spiral Antenna Integrated with RF-MEMS Switches," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 54, no. 2, pp. 455-463, February 2006.
- [8] S. Cheng, P. Rantakari, R. Malmqvist, C. Samuelsson, T. Vaha-Heikkila, A. Rydberg and J. Varis, "Switched Beam Antenna Based on RF MEMS SPDT Switch on Quartz Substrate," IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, Vol. 8, pp. 383-386, March 2009.
- [9] Y.-Y. Lin, C.-L. Liao, T.-H. Hsieh and W.-J. Liao, "A Novel Beam-Switching Array Antenna Using Series-Fed Slots With PIN Diodes," IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, Vol. 16, pp. 1393-1396, December 2016.
- [10] V. A. Nguyen and P. S. Ook, "Compact Switched and Reconfigurable 4-ports Beam Antenna Array for MIMO Applications," 2011 IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on Intelligent Radio for Future Personal Terminals, Daejeon, South Korea, pp. 1-3, August 2011.
- [11] L. H. Trinh, T. N. Le, R. Staraj, F. Ferrero and L. Lizzi, "A Pattern-Reconfigurable Slot Antenna for IoT Network Concentrators," Electronics 2017, 6, 105, pp. 1-7, November 2017.
- [12] S. V. Shynu Nair and M. J. Ammann, "Reconfigurable Antenna With Elevation and Azimuth Beam Switching," IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol. 9, pp. 367-370, April 2010.
- [13] Infineon Technologies, Silicon PIN Diodes, BAR63, datasheet October 1999.
- [14] C. A. Balanis, Antenna Theory: Analysis and Design, 3rd ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2005.

การใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ดินลูกรังประเภทกรวดสำหรับวัสดุงานทาง

The Granular Lateritic soil replaced by Bottom Ash for Highway Materials

พสิษฐ์ ตันดุลยกุล^{1,*} และ วีรยา ชิมอ้อย¹

¹ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

Pasit Tandulyakul^{1,*} and Weeraya Chimoye¹

¹Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Thammasat University

*Corresponding Author E-mail: Pasit.tan@hotmail.com

Received: April 28, 2021 Revised: May 19, 2021 Accepted: May 21, 2021

บทคัดย่อ

งานวิจัยฉบับนี้ศึกษาการนำเถ้าก้นเตาซึ่งเป็นวัสดุพลอยได้จากการผลิตกระแสไฟฟ้ามาใช้ในการแทนที่ดินลูกรัง เพื่อเป็นวัสดุทดแทนวัสดุธรรมชาติสำหรับใช้เป็นวัสดุงานทาง โดยใช้เถ้าก้นเตาจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ ผ่านตะแกรง 1 นิ้ว โดยนำมาแทนที่ดินลูกรังที่มีการคัดขนาดตามมาตรฐานวัสดุชั้นรองพื้นทาง ทล.-ม. 205/2532 Type A และ Type C ของกรมทางหลวง อยู่ในช่วงร้อยละ 10 ถึง 60 โดยมวลดินลูกรังแห้ง จากผลการศึกษาคุณสมบัติการบดอัดของดินลูกรังแทนที่ด้วยเถ้าก้นเตาพบว่าเมื่ออัตราส่วนการแทนที่เถ้าก้นเตาที่เพิ่มขึ้น ความหนาแน่นแห้งสูงสุดมีแนวโน้มลดลง ในขณะที่ความชื้นเหมาะสมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น สำหรับคุณสมบัติด้านกำลังรับน้ำหนัก พบว่าค่า CBR มีแนวโน้มลดลงตามอัตราส่วนการแทนที่เถ้าก้นเตาที่เพิ่มขึ้นจนถึงร้อยละ 30 หลังจากนั้นค่า ซี บี อาร์ มีค่าสูงขึ้น หากเทียบกับมาตรฐานวัสดุรวมชั้นรองพื้นทาง พบว่าการบดอัดด้วยความชื้นเหมาะสมมีค่า CBR ผ่านมาตรฐาน และการบดอัดด้วยความชื้นเหมาะสม+2% มีค่า CBR ผ่านมาตรฐานเมื่อร้อยละการแทนที่เถ้าก้นเตาอยู่ในช่วง ร้อยละ 40 – 60 แต่ไม่ได้ช่วยปรับปรุงคุณภาพของดินลูกรัง

คำสำคัญ: ดินลูกรัง เถ้าก้นเตา วัสดุงานทาง CBR

Abstract

The purpose of the study is to investigate the potential of using coal bottom ash (BA) as an aggregate material for subbases in road pavements. The bottom ash from MaeMoh passing 1" sieve was used to replace the Lateritic soil that was sieved into Type A and Type C according to the standard of Department of Highways (DOH), Thailand in the range of 10 – 60% of mass of dry lateritic soil. It is found that the maximum dry density of soil-BA mixtures decreased with increasing BA contents whereas the optimum water content increased. The CBR at optimum water content and optimum water content+2% of both types

of lateritic soil replace with BA decrease with the percentage of replacement up 30% and the CBR increase later. Compare with the DOH standard, the lateritic soil replaced with BA in the range of 40 – 60% pass the standard for subbase material.

Keywords: Lateritic Soil, Bottom Ash, Highway Material, CBR

1. บทนำ

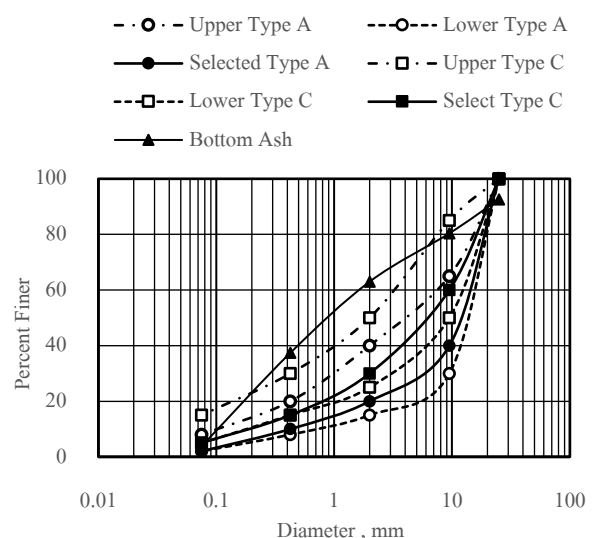
เถ้าก้นเตา เป็นวัสดุผลพลอยได้จำนวนมากที่เหลือจากกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าโดยใช้ถ่านหิน ส่วนใหญ่จะถูกนำไปทิ้งโดยการฝังกลบ ทำให้เกิดค่าใช้จ่ายและไม่ได้ใช้วัสดุให้เกิดประโยชน์ เนื่องจากเถ้าก้นเตามีอนุภาคไม่เป็นรูปทรงกลม มีความพรุนสูง ค่อนข้างชื้นและทำปฏิกิริยาช้าเมื่อเปรียบเทียบกับเถ้าลอย ที่ผ่านมาได้มีการศึกษาที่จะนำเถ้าก้นเตามาใช้ในอุตสาหกรรมคอนกรีต [1] แต่เนื่องจากเถ้าก้นเตามีเม็ดหยาบต้องมีการบดให้ละเอียดมากพอจึงจะเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกและต้องทำให้แห้งซึ่งเป็นการเพิ่มต้นทุนในการใช้งาน นอกจากนี้ยังมีการศึกษาในการใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดในคอนกรีต [2] แต่ก็ยังใช้แทนที่ได้น้อย จึงทำให้ไม่มีการใช้อย่างแพร่หลายนัก ในทางวิศวกรรมโยธาวัสดุธรรมชาติคือ ดินลูกรังก็เป็นวัสดุก่อสร้างหลักสำหรับงานทาง และเนื่องจากระบบการขนส่งทางบก คือ ถนน เป็นระบบการขนส่งหลักของประเทศไทย จึงจำเป็นต้องใช้ดินลูกรังจำนวนมาก ที่ผ่านมามีงานวิจัยจำนวนมากที่ศึกษาการนำวัสดุผลพลอยได้จากอุตสาหกรรม เช่น เถ้าไม้เบญจพรรณ เถ้าแกลบ หรือนำวัสดุเหลือทิ้งกลับมาใช้ใหม่ เช่น รีไซเคิลแอสฟัลต์ รีไซเคิลคอนกรีต โดยนำมาแทนที่ดินลูกรัง หรือนำมาปรับปรุงคุณภาพดินจากปฏิกิริยาปอซโซลานิก รวมถึงมีศึกษาการใช้เถ้าก้นเตาในวัสดุงานทางด้วย [3, 4, 5, 6, 7 และ 8] แต่ยังไม่สามารถนำมาใช้งานได้จริง เถ้าก้นเตาจึงยังเป็นวัสดุผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมที่ต้องกำจัดทิ้ง จากปัญหาที่กล่าวมาข้างต้น งานวิจัยนี้จึงต้องการศึกษาการใช้เถ้าก้นเตาจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะมาแทนที่ดินลูกรัง Type A และ Type C ซึ่งเป็นดินประเภทกรวด โดยมีร้อยละการแทนที่ของเถ้าก้นเตาโดยมวลร้อยละ 10 – 60 เพื่อให้ครอบคลุมทั้งในแง่ของการใช้เถ้าก้นเตาเพื่อลดปริมาณการ

ใช้วัสดุธรรมชาติ หรือการใช้เถ้าก้นเตาในการปรับปรุงคุณภาพของดินลูกรัง

2. วัสดุและวิธีการวิจัย

2.1 ตัวอย่างดินลูกรังและเถ้าก้นเตา

ดินลูกรังที่ใช้มีค่าขีดจำกัดเหลว (LL) เท่ากับ 29.5 ซึ่งน้อยกว่า 35 ขีดจำกัดพลาสติก (PL) เท่ากับ 20.8 และดัชนีพลาสติก (PI) เท่ากับ 8.7 ซึ่งน้อยกว่า 11 แสดงว่าผ่านมาตรฐานชั้นรองพื้นทาง ทล.-ม. 205/2532 ค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.82 โดยมีการคัดขนาดให้เป็นไปตามมาตรฐานวัสดุรองพื้นทาง Type A และ Type C ดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งร้อยละการกระจายขนาดที่เลือกจะใกล้เคียงกับ โดยเมื่อจำแนกดินตามระบบ USCS พบว่า ดิน Type A เป็นดินประเภท GP (Poorly Graded Gravel) และดิน Type C เป็นประเภท GW-GC (Well-graded gravel with clay)



รูปที่ 1 การกระจายขนาดของดินลูกรังและเถ้าก้นเตา

เถ้าก้นเตาจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะไม่มีความเป็นพลาสติก เนื่องจากเถ้าก้นเตามีความพรุนสูงและไม่มีความเหนียว มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.7 เมื่อนำไปทดสอบการกระจายของขนาดกละ พบว่าเถ้าก้นเตามีขนาดในช่วงที่เป็นทรายเป็นส่วนใหญ่ ดังแสดงในรูปที่ 1 จึงเลือกใช้เถ้าก้นเตาที่ผ่านตะแกรงขนาด 1 นิ้ว เนื่องจากต้องการใช้เถ้าก้นเตาในสภาพธรรมชาติเพื่อลดค่าใช้จ่ายในการเตรียมเถ้าก้นเตาหากมีความเป็นไปได้ในการนำไปใช้งานจริง เมื่อจำแนกตามระบบ USCS พบว่าเถ้าก้นเตาเป็นประเภท SP (Poorly Graded Sand)

เมื่อนำเถ้าก้นเตาแทนที่ดินลูกรังพบว่าค่าขีดจำกัดเหลวและค่าดัชนีพลาสติกลดลงตามปริมาณการแทนที่ของเถ้าก้นเตา เนื่องจากเถ้าก้นเตาเป็นวัสดุที่ไม่มีความเหนียวทำให้ดินลูกรังผสมเถ้าก้นเตามีค่าดัชนีพลาสติกลดลง [7]

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของดินลูกรังและเถ้าก้นเตาโดยวิธี X-Ray Fluorescence Spectrometer (XRF) แสดงในตารางที่ 1 พบว่าดินลูกรังมีองค์ประกอบหลัก คือ SiO_2 ในขณะที่เถ้าก้นเตามีองค์ประกอบหลักคือ SiO_2 , CaO , Fe_2O_3 , และ Al_2O_3 ซึ่งใกล้เคียงกับเถ้าลอยของโรงไฟฟ้าแม่เมาะ แต่มีความไวกในการทำปฏิกิริยาน้อยกว่าเนื่องจากเถ้าลอยมีขนาดใหญ่และมีความพรุนสูง

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของดินลูกรังและเถ้าก้นเตา

สารประกอบออกไซด์	ปริมาณ (ร้อยละ)	
	เถ้าก้นเตา	ดินลูกรัง
SiO_2	59.50	79.00
CaO	2.92	0.39
Fe_2O_3	6.07	6.29
Al_2O_3	25.70	10.90
MgO	0.80	0.45
K_2O	1.56	1.41

2.2 การทดสอบการบดอัดและการทดสอบ CBR

เมื่อคัดขนาดดินลูกรังตามมาตรฐาน Type A และ Type C แล้ว ดังแสดงในรูปที่ 2 นำไปทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Proctor test, ASTM D-

1557) สำหรับตัวอย่างที่มีการแทนที่เถ้าก้นเตา คำนวณปริมาณดินลดลงตามร้อยละการแทนที่ของเถ้าก้นเตา แล้วใส่เถ้าก้นเตาตามปริมาณร้อยละการแทนที่ที่ 10, 20, 30, 40, 50 และ 60 ในแต่ละกรณี ผสมให้เข้ากับดินก่อน ดังแสดงในรูปที่ 2 จากนั้นค่อย ๆ เติมน้ำผสมให้เข้ากัน แล้วจึงบดอัดตามมาตรฐาน เนื่องจากเถ้าก้นเตาไม่มีความไวกในการเกิดปฏิกิริยา จึงไม่ได้กำหนดเวลาในการบดอัด เมื่อได้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด (ρ_{dmax}) และปริมาณความชื้นเหมาะสม (W_{opt}) ของแต่ละกรณีแล้ว นำมาเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบ CBR ตามมาตรฐาน ASTM D-1883-99 โดยควบคุมความหนาแน่นแห้งของตัวอย่างต้องไม่น้อยกว่าร้อยละ 95 ของความหนาแน่นแห้งสูงสุดและมีความชื้นที่ความชื้นเหมาะสม และความชื้นเหมาะสม+2% และทดสอบกรณีไม่แช่น้ำ สำหรับการทดสอบแบบแช่น้ำทดสอบเฉพาะบางกรณีที่มีค่า CBR กรณีไม่แช่น้ำผ่านมาตรฐาน โดยการทดสอบ CBR ในแต่ละกรณีทำการทดสอบอย่างน้อย 2 ตัวอย่าง



ก) ดินลูกรัง Type A



ข) ดินลูกรัง Type C



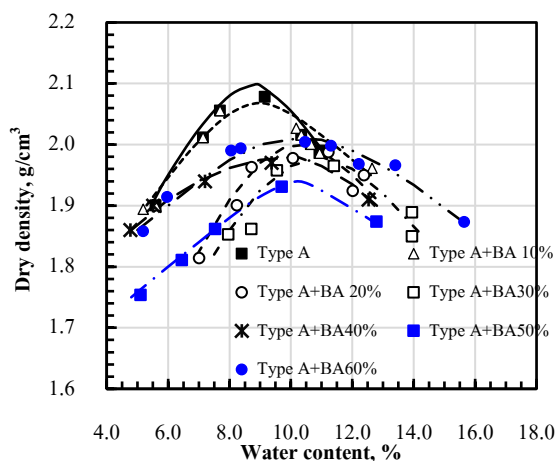
ค) ดินลูกรัง Type C ผสมเถ้าก้นเตาร้อยละ 40

รูปที่ 2 ดินลูกรังและดินลูกรังผสมเถ้าก้นเตา

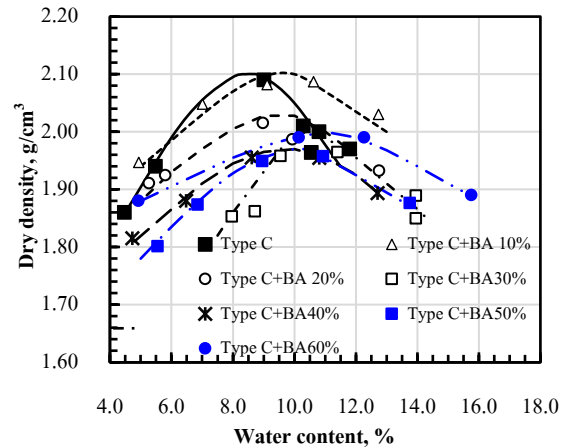
3. ผลการศึกษาและการวิเคราะห์ผล

3.1 คุณสมบัติด้านการบดอัด

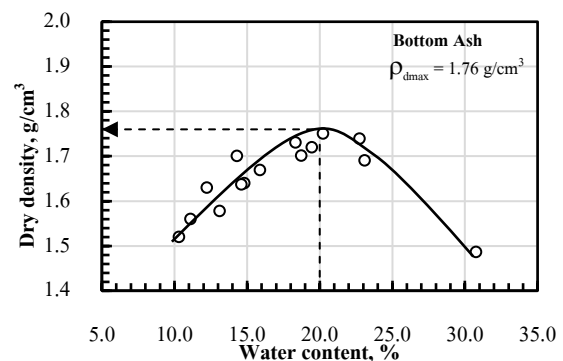
เมื่อนำดินลูกรังที่คัดขนาดตามมาตรฐาน Type A และ Type C และดินลูกรังทั้งสองประเภทแทนที่ด้วยเถ้าก้นเตา มาทดสอบคุณสมบัติด้านการบดอัด โดยบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Proctor Compaction) ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งและความชื้นของดินตามมาตรฐานทั้ง 2 ประเภทแทนที่ด้วยเถ้าก้นเตา แสดงในรูปที่ 3 และ 4 ตามลำดับ จากความสัมพันธ์พบว่า ดินลูกรัง Type A และ Type C สามารถบดอัดได้ดีกว่าเมื่อแทนที่ด้วยเถ้าก้นเตา โดยเส้นโค้งของการบดอัดสำหรับดินลูกรังล้วนมีความชันมากกว่าดินลูกรังแทนที่ด้วยเถ้าก้นเตา โดยเฉพาะเมื่อมีการแทนที่เถ้าก้นเตามากขึ้นทำให้เส้นโค้งการบดอัดมีลักษณะแบนแสดงว่าการเปลี่ยนแปลงความชื้นทำให้ค่าความหนาแน่นแห้งเปลี่ยนแปลงได้ไม่มากนัก สำหรับเถ้าก้นเตาเมื่อทดสอบการบดอัดพบว่าค่าความหนาแน่นสูงสุดต่ำกว่าดินลูกรัง และมีปริมาณความชื้นเหมาะสมสูงกว่าดินลูกรัง ดังแสดงในรูปที่ 5 โดยค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด และปริมาณความชื้นเหมาะสมของดินลูกรัง เถ้าก้นเตาและดินลูกรังแทนที่ด้วยเถ้าก้นเตา แสดงในตารางที่ 2



รูปที่ 3 ความหนาแน่นแห้งและความชื้นของดินลูกรัง Type A และดินลูกรังแทนที่ด้วยเถ้าก้นเตา



รูปที่ 4 ความหนาแน่นแห้งและความชื้นของดินลูกรัง Type C และดินลูกรังแทนที่ด้วยเถ้าก้นเตา

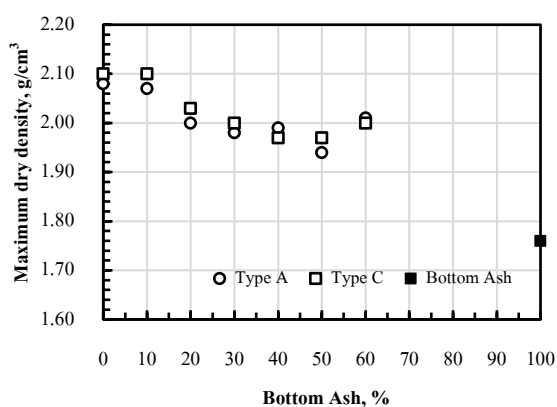


รูปที่ 5 ความหนาแน่นแห้งและความชื้นของเถ้าก้นเตา

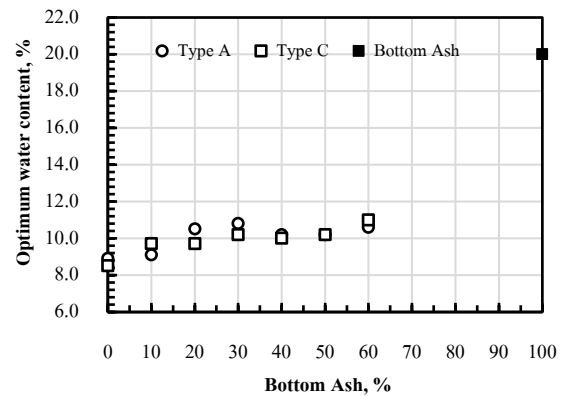
การแทนที่เถ้าก้นเตามีผลให้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดลดลงตามร้อยละการแทนที่เถ้าก้นเตาที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่ความชื้นเหมาะสมของดินลูกรังมีค่าเพิ่มขึ้นตามร้อยละการแทนที่เถ้าก้นเตาที่เพิ่มขึ้นสำหรับดินลูกรังทั้งสองประเภท เนื่องจากเถ้าก้นเตามีความพรุนและมีความถ่วงจำเพาะน้อยกว่าดินเมื่อเข้าไปแทนที่ดินลูกรังจึงทำให้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดมีค่าลดลง ดังแสดงในรูปที่ 6 ในขณะที่เถ้าก้นเตาสามารถดูดซับน้ำได้ดีทำให้ปริมาณความชื้นเหมาะสมมีค่ามากขึ้นตามร้อยละการแทนที่ด้วยเถ้าก้นเตาที่เพิ่มขึ้น [9] ดังแสดงในรูปที่ 7

ตารางที่ 2 ความหนาแน่นแห้งสูงสุดและความชื้นเหมาะสมของดินลูกรัง เถ้าก้นเตา และดินลูกรังแทนที่ด้วยเถ้าก้นเตา

ชนิดของวัสดุ กลัดเลือก	% BA	ความ หนาแน่น แห้งสูงสุด (g/cm ³)	ความชื้น เหมาะสม (%)
Type A	0	2.08	8.9
Type A + BA(10)	10	2.07	9.1
Type A + BA(20)	20	2.00	10.5
Type A + BA(30)	30	1.98	10.8
Type A + BA(40)	40	1.99	10.2
Type A + BA(50)	50	1.94	10.2
Type A + BA(60)	60	2.01	10.6
Type C	0	2.10	8.5
Type C + BA(10)	10	2.10	9.7
Type C + BA(20)	20	2.03	9.7
Type C + BA(30)	30	2.00	10.2
Type C + BA(40)	40	1.97	10.0
Type C + BA(50)	50	1.97	10.2
Type C + BA(60)	60	2.00	11.0
เถ้าก้นเตา		1.76	20.0



รูปที่ 6 ความหนาแน่นแห้งสูงสุดกับร้อยละการแทนที่เถ้าก้นเตา

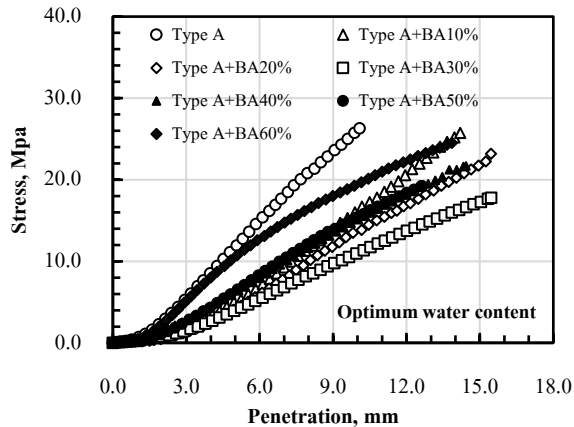


รูปที่ 7 ความชื้นเหมาะสมกับร้อยละการแทนที่เถ้าก้นเตา

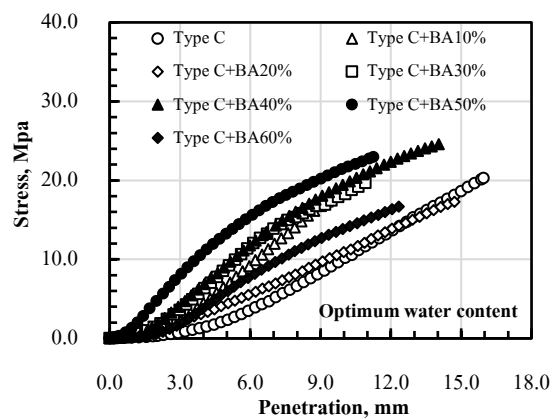
3.2 ค่า CBR

รูปที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและระยะจมของดินลูกรัง Type A และดินลูกรัง Type A แทนที่ด้วยเถ้าก้นเตากรณีความชื้นเหมาะสม พบว่าเมื่ออัตราส่วนการแทนที่ของเถ้าก้นเตาเพิ่มขึ้นทำให้ความชันลดลง ซึ่งแสดงว่ากำลังรับน้ำหนักของดินลูกรังมีค่าลดลงเมื่ออัตราส่วนการแทนที่เถ้าก้นเตาเพิ่มขึ้นจนถึงร้อยละ 30 หลังจากนั้นกำลังรับน้ำหนักดีขึ้น โดยเมื่อแทนที่เถ้าก้นเตาร้อยละ 60 มีความชันของหน่วยแรงใกล้เคียงกับดินลูกรัง Type A ส่วนดินลูกรัง Type C กำลังรับน้ำหนักของดินค่อนข้างต่ำ เมื่อแทนที่ด้วยเถ้าก้นเตาทำให้กำลังรับน้ำหนักดีขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 8 ซึ่งแสดงว่าอิทธิพลของเถ้าก้นเตาขึ้นอยู่กับกำลังรับน้ำหนักของดินลูกรังเริ่มต้น หากกำลังรับน้ำหนักของดินลูกรังเองมีค่าสูง การแทนที่ด้วยเถ้าก้นเตาไม่ได้ช่วยปรับปรุงคุณสมบัติด้านกำลังรับน้ำหนัก แต่หากดินลูกรังเริ่มต้นมีกำลังรับน้ำหนักที่ไม่ดีนัก เถ้าก้นเตาสามารถปรับปรุงคุณภาพด้านกำลังรับน้ำหนักได้ [9]

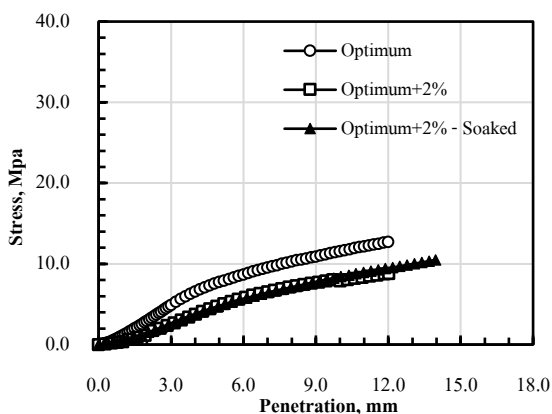
กรณีบดอัดที่ความชื้นเหมาะสม+2% พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและระยะจมเป็นไปในลักษณะเดียวกับกรณีบดอัดที่ความชื้นเหมาะสม แต่ค่ากำลังรับน้ำหนักมีค่าลดลงเนื่องจากความชื้นเริ่มต้นในการบดอัดเพิ่มขึ้น สำหรับเถ้าก้นเตาพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและระยะจมที่ความชื้นเหมาะสมมีกำลังรับน้ำหนักดีกว่าเมื่อบดอัดด้วยความชื้นเหมาะสม+2% แต่อย่างไรก็ดีเมื่อเห็นว่าเถ้าก้นเตามีกำลังรับน้ำหนักใกล้เคียงกับกรณีไม่แช่น้ำ ดังแสดงในรูปที่ 10



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและระยะจมของดินลูกรัง Type A แทนที่ด้วยเถ้าก้นเตา

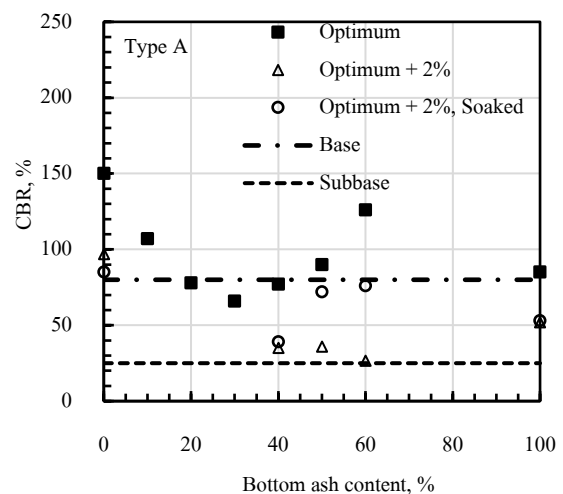


รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและระยะจมของดินลูกรัง Type C แทนที่ด้วยเถ้าก้นเตา



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและระยะจมของเถ้าก้นเตา

จากความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและระยะจมสามารถหาค่า CBR ของดินลูกรัง เถ้าก้นเตา และดินลูกรังผสมเถ้าก้นเตาได้ ดังแสดงในตารางที่ 3 จากตารางพบว่าสำหรับดินลูกรัง Type A เมื่อแทนที่ด้วยเถ้าก้นเตาแล้วทำให้ค่า CBR ลดลง เมื่อร้อยละของการแทนที่น้อยกว่า 30 หลังจากนั้นค่า CBR จะมีค่าเพิ่มขึ้น กรณียกข้อที่ความชื้นเหมาะสม แต่สำหรับกรณียกข้อด้วยความชื้นเหมาะสม +2% ค่า CBR มีค่าน้อยกว่ากรณียกข้อที่ความชื้นเหมาะสม เนื่องจากความชื้นเริ่มต้นในการบดอัดเพิ่มขึ้นทำให้ค่ากำลังรับน้ำหนักลดลง และค่า CBR ไม่แตกต่างกันมากนัก เมื่อร้อยละการแทนที่ตั้งแต่ร้อยละ 40 - 60 เมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐานรองพื้นทางที่กำหนดค่า CBR ต้องไม่น้อยกว่าร้อยละ 25 ดังแสดงในรูปที่ 11 พบว่า ดินลูกรัง Type A แทนที่ด้วยเถ้าก้นเตาที่ร้อยละ 40 - 60 มีค่า CBR ผ่านมาตรฐานชั้นรองพื้นทาง โดยมีค่า CBR มากกว่าร้อยละ 25 แม้ว่าบดอัดที่ความชื้นเหมาะสม+2% โดยหากสามารถควบคุมความชื้นในการบดอัดให้อยู่ในช่วงความชื้นเหมาะสมที่ร้อยละการแทนที่ 50 และ 60 มีค่า CBR ที่สามารถผ่านมาตรฐานชั้นรองพื้นทางได้ โดยมีค่า CBR มากกว่าร้อยละ 80 (ดังแสดงในรูปที่ 11) ดังนั้นสำหรับดินลูกรังตามมาตรฐาน Type A ซึ่งเป็นดินลูกรังที่มีมาตรฐานดีสามารถใช้เถ้าก้นเตามาแทนที่เพื่อลดปริมาณการใช้วัสดุธรรมชาติสำหรับชั้นรองพื้นทางได้



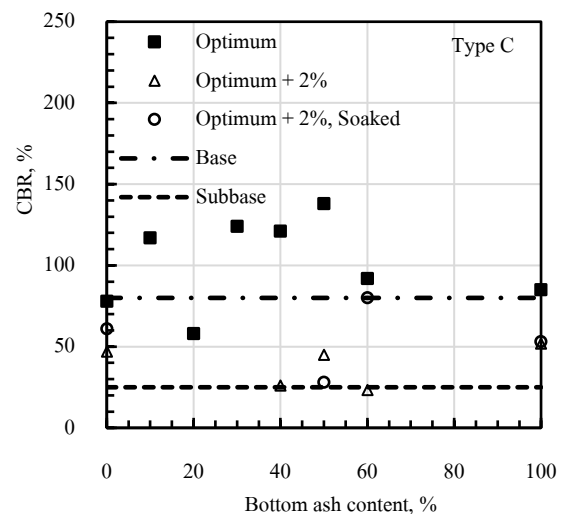
รูปที่ 11 ค่า CBR ของดินลูกรัง Type A กับร้อยละการแทนที่เถ้าก้นเตา

ตารางที่ 3 ค่า CBR ของดินลูกรังแทนที่ด้วยเถ้าก้นเตา

Type	อัตราส่วน แทนที่ เถ้าก้นเตา	ค่า CBR, %		
		Unsoaked W_{opt}	Unsoaked $W_{opt}+2\%$	Soaked $W_{opt}+2\%$
A	0	150	97	85
	10	107	-	-
	20	78	-	-
	30	66	-	-
	40	77	35	39
	50	90	36	72
	60	126	27	76
C	0	78	47	61
	10	117	-	-
	20	58	-	-
	30	124	-	-
	40	121	26	-
	50	138	45	28
	60	92	23	80
BA	100	85	52	53

สำหรับดินลูกรัง Type C ความสัมพันธ์ระหว่างค่า CBR และร้อยละการแทนที่ด้วยเถ้าก้นเตาแสดงในรูปที่ 12 พบว่า ค่า CBR ของดินลูกรัง Type C เมื่อพิจารณากรณีความชื้นเหมาะสมและกรณีความชื้นเหมาะสม+2% ค่า CBR เพิ่มขึ้นตามร้อยละเถ้าก้นเตาที่เพิ่มขึ้นเมื่อแทนที่เถ้าก้นเตามากกว่าร้อยละ 30 และมีค่าลดลงเมื่อแทนที่ด้วยเถ้าก้นเตาร้อยละ 60 โดยมีค่า CBR ใกล้เคียงกับค่า CBR ของเถ้าก้นเตาล้วน เนื่องจากเมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าก้นเตาในสัดส่วนที่เหมาะสม เถ้าก้นเตาซึ่งมีการกระจายขนาดเป็นทรายสามารถเข้าไปแทรกกระหว่างช่องว่างระหว่างกรวดของดินลูกรัง นอกจากนี้เถ้าก้นเตามีความเปราะเมื่อถูกบดอัดทำให้มีการแตกหัก ทำให้การกระจายขนาดของดินลูกรังผสมเถ้าก้นเตาละเอียดขึ้น ทำให้ดินแน่นขึ้นมีอัตราส่วนช่องว่างน้อยลง [9] แต่เมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าก้นเตามากเกินไป ทำให้อัตราส่วนของอนุภาคในช่วงขนาดของทรายมีค่ามากกว่าทำให้ค่า CBR ลดลง

กรณีของดินลูกรัง Type C เมื่อแทนที่ด้วยเถ้าก้นเตาในช่วงร้อยละ 10 – 50 มีค่า CBR มากกว่าร้อยละ 25 ผ่านมาตรฐานชั้นรองพื้นทาง แต่หากสามารถควบคุมความชื้นของการบดอัดในช่วงความชื้นเหมาะสม จะมีค่า CBR มากกว่าร้อยละ 80 สามารถผ่านมาตรฐานชั้นพื้นทางได้ที่ร้อยละการแทนที่ 30 – 60 ดังแสดงในรูปที่ 12 สำหรับดินลูกรังที่มีกำลังรับน้ำหนักต่ำ เถ้าก้นเตาสามารถปรับปรุงคุณภาพด้านกำลังรับน้ำหนักได้ในอัตราส่วนการแทนที่ที่เหมาะสม [10]



รูปที่ 12 ค่า CBR ของดินลูกรัง Type C กับร้อยละการแทนที่เถ้าก้นเตา

4. สรุปผลการศึกษา

จากผลการศึกษาการใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ดินลูกรังสรุปได้ว่า

1. คุณสมบัติด้านการบดอัด โดยบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานของดินลูกรังแทนที่ด้วยเถ้าก้นเตาพบว่าดินลูกรัง Type A และ C ที่อัตราส่วนการแทนที่ด้วยเถ้าก้นเตาร้อยละ 0 – 50 ค่าความชื้นเหมาะสมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนการแทนที่เถ้าก้นเตาที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่ความหนาแน่นแห้งสูงสุดมีแนวโน้มลดลงตามอัตราส่วนของเถ้าก้นเตาที่เพิ่มขึ้น
2. คุณสมบัติด้านกำลังรับน้ำหนัก โดยการทดสอบ CBR ของดินลูกรังและดินลูกรังแทนที่ด้วยเถ้าก้นเตา ที่อัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 0 – 60 พบว่า สำหรับดินลูกรัง

Type A เมื่อบดอัดด้วยความชื้นเหมาะสม ค่า CBR มีค่าลดลงตามอัตราส่วนการแทนที่เถ้าก้นเตาที่เพิ่มขึ้นจนถึงอัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 30 หลังจากนั้นค่า CBR มีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่ดินลูกรัง Type C เมื่อบดอัดด้วยความชื้นเหมาะสม ค่า CBR มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามร้อยละการแทนที่เถ้าก้นเตาที่เพิ่มขึ้น โดยมีค่า CBR สูงสุดเมื่อร้อยละการแทนที่เถ้าก้นเตาเท่ากับ 50 ในกรณีบดอัดด้วยความชื้นเหมาะสม+2% พบว่าค่า CBR มีค่าลดลงเมื่อเทียบกับกรณีบดอัดด้วยความชื้นเหมาะสม

3. สำหรับดินลูกรังทั้งสองประเภท หากเทียบค่า CBR กับมาตรฐานวัสดุมวลรวมชั้นรองพื้นทาง พบว่าสำหรับดินลูกรัง Type A ร้อยละการแทนที่เถ้าก้นเตาอยู่ในช่วง ร้อยละ 40 – 60 เช่นเดียวกับดินลูกรัง Type C ทั้งนี้หากต้องการใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทาง ต้องควบคุมความชื้นในการบดอัดให้อยู่ในช่วงความชื้นเหมาะสม โดยสำหรับดินลูกรัง Type A ร้อยละการแทนที่ในช่วงร้อยละ 50 – 60 ส่วนดินลูกรัง Type C ร้อยละการแทนที่ในช่วงร้อยละ 40 – 50

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ขอขอบพระคุณโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์วัสดุเถ้าก้นเตาในการศึกษาวิจัย และขอขอบพระคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ สำหรับห้องปฏิบัติการ และ เครื่องมือต่าง ๆ ที่ใช้ในการศึกษาวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] C. Jaturapitakkul and R. Cheerarat, "Use of Ground Bottom Ash as a Pozzolanic Material in Concrete," Research and Development Journal, Vol. 15, No. 2, pp. 1-8, 2003.
- [2] Thailand Concrete Association (TCA), "Manual for using Bottom Ash replacement fine Aggregates of Concrete," 2016.
- [3] M. Cabrera, A.P. Galvin, F. Agrela, M.D. Carvajal and J. Ayuso, "Characterisation and technical feasibility of using biomass bottom ash for civil infrastructures", Construction and Building Materials, Vol. 58, pp. 234-244, 2014.
- [4] M. Cabrera, J.R. Garcia, J. Ayuso, J. Estaire and F. Agrela, "Feasibility of using olive biomass bottom ash in the subbases of roads and rural paths" Construction and Building Materials, Vol. 181, pp. 266-275, 2018.
- [5] L. Balachowski and Z. Sikora "Mechanical properties of bottom ash – dredge material mixtures in laboratory tests", Studia Geotechnica et Mechanica, Vol. 35, No.3, pp. 3-11, 2013.
- [6] K. Chot and P. Daungduen, "Improvement of lateritic soil by bottom ash and lime", Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Thailand, 2013.
- [7] N. Sukbangnop and C. Atsawaratanajinda, "Stabilization of Lateritic Soil by Bottom Ash", Civil Engineering, Faculty of Engineering, Thammasat University, Thailand, 2019.
- [8] P. Panidapa and C. Yokkhrut, "The use of bottom ash mixed with lateritic soil for subbase", Civil Engineering, Faculty of Engineering, Thammasat University, Thailand, 2019.
- [9] O. Junsing and W. Chimoye, "Properties of lateritic soil replaced by bottom ash for highway material", The 25th National Convention on Civil Engineering, 15 – 17 July 2020, pp. GTE13-1-GTE13-6, 2020.
- [10] T.H.Y. Htun, P. Julnipayawong, W. Chimoye and S. Tangtermsirikul, "Use of Bottom Ash as a Subbase Material for Pavement", The 15th International Joint Symposium on Artificial Intelligence and Natural Language Processing (iSAINLP 2020) and The International Conference on Artificial Intelligence and Internet of Things (AIoT 2020), November 18–20, Bangkok, Thailand, 2020.

วิธีฮิวริสติกสำหรับฐานตาราง กรณีศึกษาหมากรุกไทย

ช่วงปลายกระดานในรูปแบบมวยเม็ด

Heuristic method for tablebases: A Case Study of Thai chess endgame in King-Knight-Queen-King pattern

ธนาพล ทัดสวน* และ เกียรติกุล เจียรนัยชนะกิจ

ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

Thanapon Tudsuan* and Kietikul Jearanaitanakij

Department of Computer Engineering, School of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

*Corresponding Author E-mail: thanapon.tu@kmitl.ac.th

Received: May 7, 2021 Revised: June 16, 2021 Accepted: June 16, 2021

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างฐานข้อมูลปลายกระดาน (Endgame Tablebases) และออกแบบฮิวริสติก (Heuristic) สำหรับการเล่นหมากรุกไทยในรูปแบบมวยเม็ด กล่าวคือฝ่ายไล่มี ขุน 1 ตัว, ม้า 1 ตัว, เม็ดหรือเบี้ยหางยา 1 ตัว และฝ่ายหนีมี ขุน 1 ตัว ซึ่งรวมตัวหมากทั้งหมดเป็น 4 ตัว สำหรับฮิวริสติกที่ได้ออกแบบในการไล่รูปแบบมวยเม็ด มีทั้งหมด 5 ตาราง ได้แก่ 1) ค่าตารางของระยะห่างของขุนฝ่ายสีขาวและสีดำ 2) ค่าตารางของขุนฝ่ายหนี 3) ค่าตารางของขุนฝ่ายไล่ 4) ค่าตารางของม้าฝ่ายไล่ 5) ค่าตารางของเม็ดฝ่ายไล่ ซึ่งใช้วิธีการอัลฟาเบตา (Alpha-beta pruning) โดยทำการค้นหาคำตอบด้วยวิธีการค้นหาในแนวลึกแบบวนเพิ่มความลึก (Iterative Deepening Depth-First Search) โดยใช้ความลึกที่ 10 ในการทดสอบฮิวริสติกที่ได้ออกแบบไว้เมื่อใช้ความลึกคงที่เท่ากับ 10 ในการทดสอบได้โปรแกรม SeniorSoft ThaiChess Master V3 จำนวน 100 กระดาน เพื่อบันทึกผลใน 4 ด้าน ได้แก่ 1) อัตราการรุกจน (รุกจนหมายถึงทำให้ชนะ) 2) จำนวนครั้งเฉลี่ยที่ใช้ในการรุกจน 3) เวลาเฉลี่ยใน 1 ตาเดินที่นับเฉพาะการเดิน 10, 15, 20 ครั้ง และ 4) เวลาที่ใช้รุกจนเฉลี่ยต่อ 1 เกม โดยเปรียบเทียบด้วยวิธี 3 แบบ ได้แก่ 1) Quiescence Search 2) โปรแกรม Prop (ดัดแปลงมาจาก Stockfish) และ 3) ผู้เล่นที่เคยได้รับรางวัลจากการแข่งขันระดับชาติ สรุปผลการทดลองได้ว่าผลลัพธ์ของงานวิจัยนี้ดีที่สุด คือ 1) มีอัตราการรุกจน 100.00 เปอร์เซ็นต์ 2) จำนวนครั้งเฉลี่ยที่ใช้ในการรุกจน คือ 33 ครั้ง 3) เวลาเฉลี่ยใน 1 ตาเดินที่นับเฉพาะการเดิน 10, 15, 20 ครั้ง คือ 3.908, 3.695, 3.400 วินาที ตามลำดับ และ 4) เวลาที่ใช้รุกจนเฉลี่ยต่อ 1 เกม คือ 84.658 วินาที และสำหรับผลลัพธ์ของฐานข้อมูลปลายกระดานที่สามารถทำให้เกิดการรุกจนที่ได้สร้างขึ้นมีทั้งหมด 472,900 ตำแหน่ง และจำนวนครั้งที่ใช้ไล่นานที่สุดเป็น 36 ครั้ง (ฝ่ายสีขาวเริ่มเดินก่อนและนับจำนวนครั้งเฉพาะตาที่ฝ่ายสีขาวเดินเท่านั้น)

คำสำคัญ: การตัดกิ่งแบบอัลฟา-เบตา ฮิวริสติก ฐานข้อมูลปลายกระดาน หมากรุกไทย

Abstract

This research aims to develop the endgame tablebases and design the heuristic for playing Thai chess in King-Knight-Queen-King Pattern. The chasing side includes a King, a Knight, and a Queen, whereas the other has only a King (a total of four pieces). The heuristic designed in King-Knight-Queen-King Pattern consists of 5 tables as follows: 1) King Distance Table 2) Black King Table 3) White King Table 4) White Knight Table and 5) White Queen Table. Alpha-beta pruning was applied in this study. Iterative Deepening Depth-First Search with a depth of 10 was used to evaluate the heuristic. The researcher tested the program by competing with Senior Soft Thai Chess Master V3 of 100 games and recorded the results in 4 parts: 1) winning rate 2) the average number of times it took to win by checkmate 3) the average time per move counted at 10, 15, 20 moves and 4) the average length of checkmate per game. Afterward the results were compared with three methods consisting of 1) Quiescence search 2) Prop program (adapted from Stockfish) and 3) National Thai chess players. After comparing the result with three methods, the findings showed that this research is most effective, which can be explained as follows: 1) winning rate is 100 percentage 2) the average number of times it took to win by checkmate is 33 moves 3) the average time per move counted at 10, 15, 20 moves are 3.908, 3.695, 3.400 second and 4) the average length of checkmate per game is 84.658 second. The result of the endgame tablebases, all the positions have 472,900 positions for checkmate. The longest checkmate is 36 moves (White to move and checkmate in 64-move rule).

Keywords: Alpha-beta pruning, Heuristic, Endgame tablebases, Thai chess

1. บทนำ

ในปี ค.ศ. 1997 ปัญญาประดิษฐ์ที่ถูกสร้างขึ้นจากมนุษย์ในรูปแบบโปรแกรมหมากรุกที่มีชื่อว่า Deep Blue [1] สามารถเอาชนะแชมป์หมากรุกสากลมือหนึ่งของโลกชาวรัสเซีย Garry Kasparov จากการแข่งขัน 6 เกม โดย Deep Blue ชนะ 2 แพ้ 1 และเสมอ 3 เกม [2] และในปีนั้น Deep Blue กลายเป็นเครื่องคอมพิวเตอร์เครื่องแรกที่สามารถเอาชนะแชมป์หมากรุกสากลของโลกได้ ต่อมาปี ค.ศ. 2011 ในการแข่งขันปัญญาประดิษฐ์หมากรุกสากลรายการ Top Chess Engine Championship (TCEC) ครั้งที่ 1 ปรากฏว่าโปรแกรมหมากรุกที่มีชื่อว่า Houdini ได้รับรางวัลชนะเลิศเป็นครั้งแรกที่มีการจัดการแข่งขันรายการนี้เกิดขึ้น และในปัจจุบัน (ค.ศ. 2021) โปรแกรมหมากรุก Stockfish [3] มีชื่อขึ้นในทำเนียบว่าได้รับรางวัลชนะเลิศมากที่สุดตั้งแต่มีการจัดการแข่งขันรายการ TCEC ขึ้นมาแล้ว 20 ครั้ง

สำหรับเกมหมากรุกไทยเป็นเกมกระดานที่มีลักษณะการเล่นใกล้เคียงกับหมากรุกสากล โดยแชมป์โลกหมากรุกสากล วลาดิมีร์ ครัมนิค ได้ระบุว่า “หมากรุกไทยเป็นเกมที่ต้องใช้กลยุทธ์มากกว่าหมากรุกสากล ซึ่งต้องมีการวางแผนอย่างระมัดระวังเนื่องจากหมากรุกไทยสามารถเปรียบเทียบได้กับปลายกระดานของหมากรุกสากล” [4] ซึ่งปลายกระดานในหมากรุกไทยและหมากรุกสากลนั้นมีความแตกต่างกันโดยสิ้นเชิง ทั้งในแง่ของกฎกติกาและศักยภาพของตัวหมากที่สามารถทำให้เกิดการรุกจนได้ [5]

โดยงานวิจัยนี้ได้ศึกษาปลายกระดานในเกมหมากรุกไทยรูปแบบที่มีชื่อว่ามวยเม็ด [6] และจัดได้ว่าเป็นกลยุทธ์ที่ลึกซึ้งที่สุดในกระบวนศักดิ์หมาก การไล่ - หนีในหมากรุกไทย กล่าวคือเมื่อปลายกระดานของเกมหมากรุกไทยตัวหมากทั้งหมดบนกระดานเหลือรูปแบบมวยเม็ด (ฝ่ายไล่มี ขุน 1 ตัว, ม้า 1 ตัว, เม็ดหรือเบี้ยหงาย 1 ตัว และฝ่ายหนีมี ขุน 1 ตัว) จะปรากฏตำแหน่งต่าง ๆ มากมายที่สามารถทำให้เกิดการรุกจนและรุกไม่จนได้ โดยที่งานวิจัย

นี้ได้ใช้ประโยชน์จากคอมพิวเตอร์ในการพิสูจน์หาคำตอบเพื่อสร้างฐานข้อมูลปลายกระดานของรูปแบบมวยเม็ด [7] ซึ่งคำตอบที่ได้นับว่าเป็นฐานข้อมูลที่เป็นมาตรฐานและสามารถพิสูจน์ได้เป็นข้อเท็จจริงว่าจะมีตำแหน่งที่สามารถทำให้เกิดการรุกจนและรุกไม่จนทั้งหมดกี่ตำแหน่ง

สำหรับปัญญาประดิษฐ์ที่ได้สร้างขึ้นของงานวิจัยนี้ เป็นการประยุกต์ใช้อัลกอริทึมอัลฟาเบตา [8] ในเกมหมากรุกไทยรูปแบบมวยเม็ด โดยทำการค้นหาคำตอบด้วยวิธีการค้นหาในแนวลึกแบบวนเพิ่มความลึก [9] ซึ่งได้เน้นไปที่การแสดงให้เห็นถึงหลักการสร้างค่าฮิวริสติกที่ได้ออกแบบจากการพิจารณาฐานข้อมูลที่ได้รับร่วมกับตำแหน่งที่มีแนวโน้มเกิดขึ้นจริงในเกมหมากรุกไทย

ซึ่งในบทที่ 1 จะกล่าวถึงที่มาและปัญหาของงานวิจัยที่เกิดขึ้น ตามด้วยบทที่ 2 เป็นการนำความรู้และทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง อีกทั้งเป็นการอธิบายขั้นตอนการสร้างความรู้ใหม่เพื่อสนับสนุนงานวิจัย ในส่วนของบทที่ 3 เป็นส่วนของการออกแบบการทดลองและผลลัพธ์การทดลองของงานวิจัย ซึ่งในบทที่ 4 เป็นการสรุปผลการทดลองที่เกิดขึ้น รวมถึงข้อเสนอแนะของงานวิจัยนี้

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

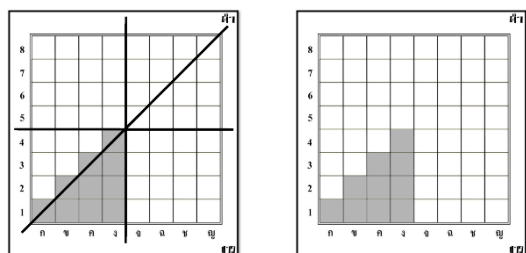
2.1 ฐานข้อมูลปลายกระดาน (Endgame Tablebases)

การสร้างฐานข้อมูลปลายกระดานถูกสร้างขึ้นด้วยหลักการเดินย้อนกลับจากตำแหน่งที่ถูกรุกจนในทุกตาเดินของจำนวนตัวหมากที่ได้กำหนดอย่างละเอียด [10] ซึ่งสามารถบอกผลลัพธ์ได้ทันทีว่าเกมจะจบลงด้วยผลเสมอหรือแพ้ - ชนะ โดยคอมพิวเตอร์จะบันทึกในทุกกรณีที่อยู่บนกระดานทุกตำแหน่งต่าง ๆ ว่าใช้จำนวนตาเดินอีกกี่ครั้งเพื่อทำให้เกิดการรุกจน (ในกรณีที่สามารถทำให้เกิดการรุกจนได้) การแก้ปัญหาได้พัฒนาความเข้าใจของนักหมากรุกเกี่ยวกับทฤษฎีปลายกระดานอย่างลึกซึ้ง ซึ่งบางตำแหน่งที่มนุษย์วิเคราะห์ว่าเสมอกัน แต่คอมพิวเตอร์ได้ทำการพิสูจน์แล้วว่าสามารถเกิดการชนะได้ [11, 12] โดยการวิเคราะห์ฐานข้อมูลสามารถค้นหาคำแหน่งรุกจนได้ในการ

เดินมากกว่าห้าร้อยครั้ง ซึ่งใกล้เคียงกว่าความสามารถของมนุษย์จะมองออกในระหว่างที่ได้ทำการเดินบนกระดานจริง สำหรับการสร้าง Endgame Tablebases (EGTB) ในหมากรุกสากลนั้น เมื่อปี ค.ศ 2018 Bojun Guo [13] ได้สร้างฐานข้อมูลที่มีตัวหมากรุกกันทั้งสิ้น 7 ตัว โดยใช้ความจุทั้งสิ้นประมาณ 17 TB

2.1.1 หลักการสมมาตรของฐานข้อมูลปลายกระดาน

เมื่อใช้หลักการสมมาตรเพื่อช่วยลดทรัพยากรในการหาคำตอบในทุก ๆ ตำแหน่งของรูปมวยเม็ด จะเห็นได้ว่าตำแหน่งอ้างอิงของขุนฝ่ายหนึ่งเพียง 1 ใน 8 ส่วนของกระดานหมากรุกก็สามารถกระจายผลลัพธ์ของทุกตำแหน่งทั่วกระดานได้ [14] โดยใช้ 10 ตำแหน่งบนกระดาน ประกอบด้วย ตำแหน่ง ก1, ข1, ข2, ค1, ค2, ค3, ง1, ง2, ง3 และ ง4 สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 หลักการสมมาตรที่ใช้ลดทรัพยากรในการสร้างฐานข้อมูล

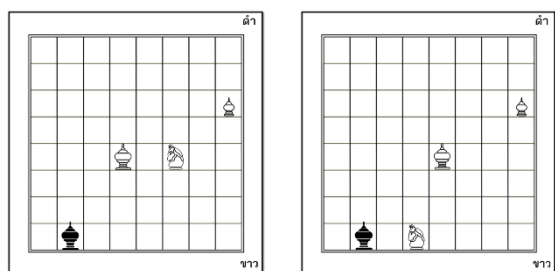
2.1.2 ฐานข้อมูลปลายกระดานรูปแบบมวยเม็ด

งานวิจัยนี้ได้ทำการสร้างฐานข้อมูลปลายกระดานของหมากรุกไทยที่มีชื่อเรียกว่ามวยเม็ด รวมตัวหมากบนกระดานทั้งสิ้น 4 ตัว ประกอบด้วย ขุน 2 ตัว (หนีและไล่) + ม้า 1 ตัว + เม็ดหรือเบี้ยหางย 1 ตัว ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จากคอมพิวเตอร์โดยหลักการสมมาตร [14] สามารถทำให้ทราบว่า มีตำแหน่งเริ่มต้นที่ได้จากการสร้างฐานข้อมูลปลายกระดานจำนวน 59,146 ตำแหน่งที่สามารถทำให้เกิดการชนะได้ (ฝ่ายไล่เป็นฝ่ายเดินก่อน) นั่นคือตำแหน่งที่ฝ่ายไล่และฝ่ายหนีเดินได้ดีที่สุด และเมื่อทำการกระจาย

ตำแหน่งเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ทั้งหมดของกระดาน ผลปรากฏว่ามีจำนวนตำแหน่งทั้งหมดเป็น 472,900 ตำแหน่งที่เข้ารูปชนะได้ และมีจำนวน 11,457,116 ตำแหน่ง ที่เข้ารูปเสมอ (เสมอเพราะกฎการนับศักดิ์หมากของหมากรุกไทย คือ 64 ครั้ง) จากตำแหน่งเริ่มต้นที่เป็นไปได้จะถูกกติกาทั้งสิ้นจำนวน 11,930,016 ตำแหน่ง สามารถแสดงผลลัพธ์ได้ดังตารางที่ 1 ซึ่งในขณะเดียวกันจำนวนครั้งที่สามารถทำให้เกิดการชนะที่นานที่สุดเป็น 36 ครั้ง (นับเฉพาะฝ่ายไล่เดินเพียงฝ่ายเดียว) สามารถดูตัวอย่างได้ดังรูปที่ 2

ตารางที่ 1 ผลลัพธ์ของจำนวนครั้งที่ฝ่ายไล่ใช้เดินเพื่อชนะของจำนวนตำแหน่งที่สามารถเกิดขึ้นได้บนกระดาน จากการสร้างฐานข้อมูลปลายกระดานในรูปแบบมวยเม็ด

ครั้ง	ตำแหน่ง	ครั้ง	ตำแหน่ง	ครั้ง	ตำแหน่ง
1	67	13	1,823	25	3,469
2	30	14	2,724	26	2,930
3	49	15	2,623	27	2,941
4	182	16	2,753	28	2,518
5	217	17	2,380	29	2,096
6	745	18	2,185	30	1,515
7	683	19	1,871	31	969
8	1,990	20	2,232	32	1,302
9	879	21	2,139	33	964
10	1,906	22	2,251	34	412
11	1,449	23	3,080	35	27
12	2,302	24	3,437	36	6
				รวม	59,146



ก) ตัวอย่างที่ 1

ข) ตัวอย่างที่ 2

รูปที่ 2 ตัวอย่าง 2 จาก 6 ตำแหน่ง ในกรณีที่ฝ่ายไล่และฝ่ายหนีเดินดีที่สุด โดยที่ฝ่ายไล่เป็นฝ่ายเริ่มเดินก่อนและสามารถทำให้เกิดการชนะที่นานที่สุด คือ 36 ครั้ง

2.2 ปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence)

ปัญญาประดิษฐ์ หรือ Artificial Intelligence (AI) คือ เครื่องจักร (Machine) ที่มีฟังก์ชันที่มีความสามารถในการทำความเข้าใจ เรียนรู้องค์ความรู้ต่าง ๆ อาทิเช่น การรับรู้ การเรียนรู้ การให้เหตุผล และการแก้ปัญหาต่าง ๆ เป็นต้น ซึ่ง AI ก็ถูกแบ่งออกเป็นหลายระดับตามความสามารถหรือความฉลาด [15] โดยวัดจากความสามารถในการให้เหตุผล การพูด และทัศนคติของ AI ตัวนั้น ๆ เมื่อเปรียบเทียบกับมนุษย์อย่างเรา ๆ หรือเรียกว่า ขั้นตอนวิธีหรืออัลกอริทึม (Algorithm) [16]

2.2.1 อัลฟาเบตา (Alpha-Beta)

ชื่อของ Alpha-Beta มาจากสองตัวแปรในอัลกอริทึม โดยที่อัลกอริทึมนี้เหมาะสำหรับการเล่นเกมที่แข่งขันกันระหว่างผู้เล่น 2 คน ประเภทการวางหมากหรือเดินหมากผลัดกันคนละ 1 ตัว เช่น เกมหมากกรุก หมากล้อม เป็นต้น ซึ่ง Alpha-Beta เป็นการปรับปรุงมาจาก Minimax เพื่อที่จะช่วยลดจำนวนในการค้นหาตำแหน่งต่าง ๆ ที่ไม่จำเป็น ทำให้มีประสิทธิภาพที่ดีกว่าการค้นหาแบบ Minimax [17]

2.2.2 Quiescence Search

Quiescence search (QS) เป็นอัลกอริทึมที่ใช้ใน Minimax เหมาะสำหรับใช้ในการเล่นเกมเชิงตรรกะที่มีผู้เล่นสองคน [18] เช่น หมากกรุก หมากฮอส หมากล้อม เป็นต้น สำหรับอัลกอริทึม QS มีจุดประสงค์คือการประเมินการค้นหาค่าสำหรับโหนดที่ไม่เสถียร [19] กล่าวคือในเกมหมากกรุกที่ตำแหน่งนั้น ๆ มีโอกาสที่จะมีการกินกันเกิดขึ้น ฟังก์ชันนี้จะเลื่อนการประเมินออกไปจนกว่าตำแหน่งนั้น ๆ จะไม่มีการกินกันเกิดขึ้น

2.2.3 โปรแกรมหมากกรุกไทย Prop

โปรแกรมหมากกรุกไทยโปรอาร์พีได้ถูกดัดแปลงมาจากโปรแกรมหมากกรุกสากล Stockfish [3] โดยพัฒนาจาก Fishtest ของ official-stockfish ซึ่งทีมงาน Redghost ได้ปรับปรุงค่าข้อมูลในช่วงปลายกระดานเพื่อให้เป็นโปรแกรมหมากกรุกไทยที่สมบูรณ์แบบมากยิ่งขึ้น ปัจจุบัน (ค.ศ. 2021) นักหมากกรุกไทยระดับสุดยอดเซียนของประเทศไทยยังไม่มีใครที่สามารถเอาชนะโปรแกรมหมากกรุกไทย Prop ได้

2.2.4 ฮิวริสติก (Heuristic)

เพื่อการขึ้นนำให้ปัญญาประดิษฐ์ค้นหาตำแหน่งที่จะนำไปสู่การรุกจน [20] นับว่าเป็นความฉลาดที่ได้กำหนดขึ้น จึงจำเป็นต้องมีฮิวริสติกเพื่อประกอบการตัดสินใจเลือกเดินตำแหน่งต่าง ๆ ให้มีโอกาสที่จะทำให้เกิดการรุกจนได้ [21] ซึ่งได้ออกแบบจากการพิจารณาของฐานข้อมูลปลายกระดาน (มวยเม็ด) ร่วมกับตำแหน่งที่มีแนวโน้มเกิดขึ้นจริงในเกมหมากกรุกไทย เพื่อโอบต้อนขุนฝ่ายหนีที่อยู่ในตำแหน่งเสมอ 11,457,116 ตำแหน่ง ให้เข้าไปสู่ในตำแหน่งที่แพ้ 472,900 ตำแหน่งได้ โดยตัวหมากที่เหลือนบนกระดานจะต้องประกอบไปด้วย ฝ่ายไล่มี ขุน 1 ตัว, ม้า 1 ตัว, เม็ดหรือเบี้ยหาง 1 ตัว และฝ่ายหนีเหลือ ขุนเพียงตัวเดียว

สำหรับค่ามากที่ได้กำหนดเพื่อให้ความสำคัญของตัวหมาก เพื่อประกอบการตัดสินใจในการเลือกเดินตัวหมากในตาเดินนั้น ๆ ซึ่งได้กำหนดให้ตัวหมากขุน, ม้า และ เม็ด คือ 10000, 1000 และ 100 คะแนนตามลำดับ โดยได้พิจารณาให้ขุนของทั้งสองฝ่ายมีคะแนนที่เท่ากันเนื่องจากในเกมหมากรุกไทยการยึดพื้นที่ที่ดีที่สุดคือการใช้ขุน ดังนั้นเราจึงกำหนดคะแนนของขุนให้มีค่ามากที่สุด คือ 10000 คะแนน รองลงมาเป็นคะแนนของม้า คือ 1000 คะแนน เพราะว่าม้าในเกมหมากรุกไทย สามารถยึดพื้นที่ได้ดีกว่าเม็ด กล่าวคือม้าสามารถคุมพื้นที่ได้มากที่สุด คือ 8 ช่อง แต่เม็ดคุมพื้นที่ได้มากที่สุด คือ 4 ช่อง ทั้งนี้การใช้งานตัวหมากม้าให้มีประสิทธิภาพสูงสุดในการยึดพื้นที่จะต้องใช้งานร่วมกันกับตัวหมากขุนของฝ่ายเดียวกันให้มีความสัมพันธ์กัน และสุดท้ายเป็นคะแนนของเม็ด คือ 100 คะแนน เนื่องจากเม็ดสามารถคุมพื้นที่ได้น้อยกว่าขุนและม้า คือ เม็ดสามารถคุมพื้นที่ได้ 4 ช่อง เราจึงกำหนดคะแนนของเม็ดให้มีค่าน้อยที่สุด เพื่อให้คอมพิวเตอร์ตัดสินใจเลือกเดินเม็ดเป็นลำดับสุดท้าย

จากการออกแบบของค่าหมากที่กล่าวมาทั้งหมดเหมาะสำหรับเฉพาะการไล่หมากปลายกระดาน กล่าวคือคู่ต่อสู้หรือฝ่ายหนึ่งเหลือขุนเพียงตัวเดียวเพราะเป็นการออกแบบค่าหมากที่ไม่สามารถกินแลกตัวหมากกันได้ โดยสามารถสรุปได้ว่าช่วงคะแนนของตัวหมากทุกตัวไม่ควรมีค่าคะแนนที่น้อยจนเกินไปเพื่อทำให้คอมพิวเตอร์สามารถตัดสินใจได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีข้อแนะนำว่าควรใช้คะแนนของตัวหมากทุกตัวให้มีค่าคะแนนตั้งแต่ 100 คะแนนขึ้นไป ซึ่งคะแนนของขุนควรมีค่ามากที่สุด รองลงมาคือม้าและเม็ดตามลำดับ (คะแนนของขุนมากกว่าม้า และคะแนนของม้ามากกว่าเม็ด) โดยมีระยะห่างของค่าคะแนนระหว่างตัวหมากแต่ละตัวให้เห็นได้อย่างชัดเจน

โดยการออกแบบคะแนนของฮิวริสติกต่าง ๆ ได้กำหนดไว้ 5 รูปแบบดังนี้

- 1) ค่าระยะห่างระหว่างขุนฝ่ายไล่และฝ่ายหนี
- 2) ค่าตารางฮิวริสติกของขุนฝ่ายหนี
- 3) ค่าตารางฮิวริสติกของขุนฝ่ายไล่
- 4) ค่าตารางฮิวริสติกของม้าฝ่ายไล่
- 5) ค่าตารางฮิวริสติกของเม็ดฝ่ายไล่

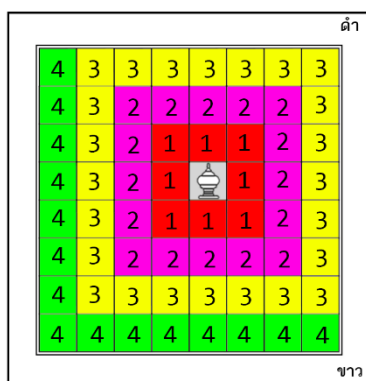
ใน 5 รูปแบบ มีความสำคัญที่แตกต่างกันออกไป ซึ่งในเกมหมากรุกไทยการไล่รูปแบบมวยเม็ดจะสามารถเป็นผู้ชนะได้ก็ต่อเมื่อฝ่ายหนีเดินขุนเข้าไปอยู่ในมุมที่เม็ดหรือเบี้ยหงายตรงมุม (เม็ดหรือเบี้ยหงายสามารถเดินเข้าไปอยู่ในตามุมได้) ซึ่งจะมีเพียง 2 มุมจากทั้งหมด 4 มุมเท่านั้น ดังนั้นการให้คะแนนของฮิวริสติกของรูปแบบมวยเม็ดจะต้องมีการออกแบบค่าคะแนนที่แตกต่างกับการไล่ศักดิ์หมากในรูปแบบอื่น ๆ ที่เห็นได้อย่างชัดเจน โดยเฉพาะค่าคะแนนของฮิวริสติกรูปแบบที่ 2 (ค่าตารางฮิวริสติกของขุนฝ่ายหนี) หรือพูดในเชิงภาษานักหมากรุก คือ ค่าตารางฮิวริสติกของเม็ดหรือเบี้ยหงายที่ตรงมุมและไม่ตรงมุม โดยจะต้องออกแบบค่าตารางฮิวริสติกที่ไม่เหมือนกับการไล่ศักดิ์หมากในรูปแบบอื่น ๆ เนื่องจากการไล่ในรูปแบบอื่น ๆ เช่น ขุน+โคน 2 ตัว ขุน+เรือ ฯลฯ สามารถทำให้เกิดการรุกจนได้ทั้ง 4 มุมของกระดาน (สามารถรุกจนได้ทุกมุม) และในส่วนค่าตารางฮิวริสติกรูปแบบที่ 1, 3, 4 และ 5 ที่ได้ออกแบบไว้ได้มีแนวคิดคล้ายกับการไล่ศักดิ์หมากในรูปแบบอื่น ๆ คือต้องการยึดพื้นที่ให้ขุนฝ่ายหนีมีตาเดินที่น้อยลง รวมถึงการเดินตัวหมากของฝ่ายไล่ในแต่ละตัวไปยังตำแหน่งที่สามารถเดินได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ อีกทั้งเป็นตำแหน่งที่สำคัญเมื่อถ้าเกิดขึ้นจริงบนเกมหมากรุกไทยแล้วผู้เล่นส่วนใหญ่จะเลือกเดินไปในตำแหน่งนั้น ๆ โดยเรียงความสำคัญของคะแนนที่ได้ออกแบบบนค่าตารางฮิวริสติกยังมีค่าผลรวมของคะแนนที่มาก คอมพิวเตอร์มีโอกาสสูงกว่าที่จะตัดสินใจเลือกเดินไปยังตำแหน่งที่มีผลรวมของคะแนนที่น้อย

รูปแบบที่ 1

ค่าฮิวริสติกของระยะห่างระหว่างขุนฝ่ายไล่และฝ่ายหนี

แนวคิดในการออกแบบ

เนื่องจากการขีดพื้นที่ที่ดีที่สุดคือการใช้ขุน เพราะฉะนั้นแล้วระยะทางระหว่างขุนฝ่ายไล่และฝ่ายหนี [22] ที่อยู่ห่างกันจึงสามารถนำมาสร้างเป็นค่าฮิวริสติกเพื่อประกอบการตัดสินใจเลือกเดินในตำแหน่งนั้น ๆ โดยใช้ค่าระยะห่างระหว่างขุนฝ่ายไล่และฝ่ายหนีคูณด้วย 10 เพื่อใช้คำนวณในการค้นหาค่าตอบนั้น ๆ สามารถแสดงค่าตัวเลขได้ดังรูปที่ 3



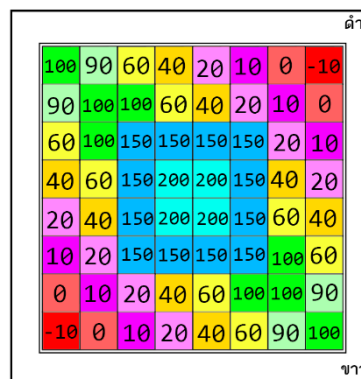
รูปที่ 3 ระยะห่างระหว่างขุนบนกระดานหมากรุก

รูปแบบที่ 2

ค่าตารางฮิวริสติกของขุนฝ่ายหนี

แนวคิดในการออกแบบ

ค่าตารางฮิวริสติกนี้ นับว่าเป็นหัวใจของรูปแบบ มวยเมืง กล่าวคือฝ่ายไล่ต้องการให้ขุนฝ่ายหนี หนีไปอยู่ที่ เมืงตรงมุม (สามารถเดินไปอยู่ในมุมได้) จึงสามารถสร้างค่าตารางฮิวริสติกที่มีค่าตัวเลขมากกว่าในทุก ๆ ตาราง สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4



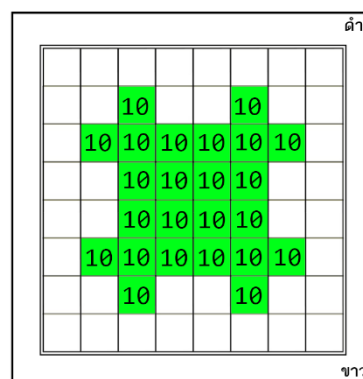
รูปที่ 4 ค่าตัวเลขบนกระดานที่ได้ออกแบบในฮิวริสติกของขุนฝ่ายหนี

รูปแบบที่ 3

ค่าตารางฮิวริสติกของขุนฝ่ายไล่

แนวคิดในการออกแบบ

ตาเดินของขุนสามารถเลือกเดินได้สูงสุด 8 ช่องที่อยู่ล้อมรอบตัวขุนได้ เพราะฉะนั้นการออกแบบค่าตารางของขุนจึงเน้นตำแหน่งกลางกระดาน (Center) เป็นหลักสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5



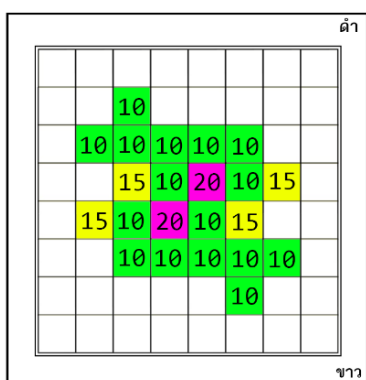
รูปที่ 5 ค่าตัวเลขบนกระดานที่ได้ออกแบบในฮิวริสติกของขุนฝ่ายไล่

รูปแบบที่ 4

ค่าตารางฮิวริสติกของม้าฝ่ายใต้

แนวคิดในการออกแบบ

ตาเดินของม้าสามารถเลือกเดินได้สูงสุด 8 ตา เพราะฉะนั้นการออกแบบค่าตารางของม้าจึงเน้นตำแหน่ง กลางกระดาน (Center) เป็นหลัก ซึ่งกำหนดให้ค่าตัวเลขใน ตารางส่วนใหญ่มีค่าเป็น 10 และในขณะที่การเน้นตำแหน่ง ของม้าที่สามารถทำให้ขุนของฝ่ายหนีอยู่ในที่มืดตรงมุม ได้ จึงออกแบบค่าตัวเลขให้เรียงลำดับตามความสำคัญและ มีค่ามากกว่า 10 คือ 15 และ 20 ตามลำดับ สามารถแสดงได้ ดังรูปที่ 6



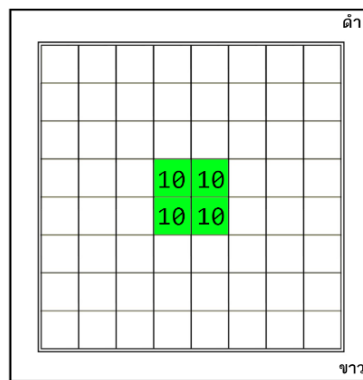
รูปที่ 6 ค่าตัวเลขบนกระดานที่ได้ออกแบบในฮิวริสติกของม้าฝ่ายใต้

รูปแบบที่ 5

ค่าตารางฮิวริสติกของเม็ดฝ่ายใต้

แนวคิดในการออกแบบ

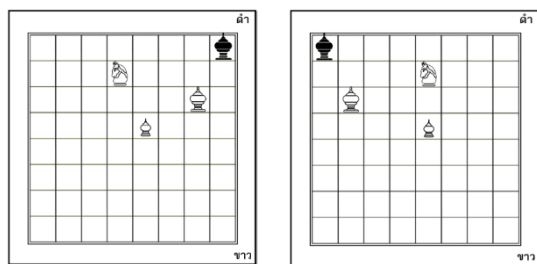
เม็ดมีความสำคัญรองจากขุนและม้า เนื่องจากมุม พื้นที่ได้น้อยกว่า ทำให้การออกแบบค่าตารางฮิวริสติกของ เม็ดให้ความสำคัญเป็นลำดับสุดท้าย โดยเน้นไปที่ตำแหน่ง กลางกระดาน (Center) เป็นหลัก สามารถแสดงได้ ดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 ค่าตัวเลขบนกระดานที่ได้ออกแบบในฮิวริสติกของเม็ดฝ่ายใต้

สำหรับการนำค่าตารางฮิวริสติกที่ได้ออกแบบไป ใช้สำหรับงานวิจัยนี้ กล่าวคือเมื่อตัวหมากทุกตัวทั้งฝ่ายใต้ และฝ่ายหนีอยู่ตำแหน่งใด ๆ บนกระดาน ค่าของตัวเลขใน ตารางฮิวริสติกที่ได้ออกแบบจะนำมาคิดคำนวณเพื่อ ตัดสินใจสำหรับการเดินในครั้งนั้น ๆ โดยที่การตัดสินใจ เลือกเดินจะมาจากการนำค่าคะแนนทั้งหมดมารวมกัน ซึ่งถ้ามีค่าคะแนนที่มาก โปรแกรมหมากรุกก็จะมีโอกาสที่ จะเลือกเดินไปยังตำแหน่งนั้น ๆ ได้มากกว่าผลรวมที่มีค่า คะแนนที่น้อย แต่ทั้งนี้จะต้องพิจารณาค่าคะแนนของอีก ฝ่ายหนึ่งด้วย

สำหรับการให้คะแนนของค่าตารางฮิวริสติก สามารถดูตัวอย่างการคิดค่าคะแนนฮิวริสติกได้ดังรูปที่ 8



ก) ตัวอย่างที่ 1

ข) ตัวอย่างที่ 2

รูปที่ 8 ตัวอย่างการคิดค่าคะแนนฮิวริสติกที่ได้ออกแบบไว้ จากตำแหน่งต่าง ๆ

ตัวอย่างการคิดค่าคะแนนฮิวริสติกจาก 5 รูปแบบ

โดยกำหนดให้ ม้า = 1000, เม็ด = 100

- 1) ค่าระยะห่างระหว่างขุนฝ่ายไล่และฝ่ายหนี
- 2) ค่าตารางฮิวริสติกของขุนฝ่ายหนี
- 3) ค่าตารางฮิวริสติกของขุนฝ่ายไล่
- 4) ค่าตารางฮิวริสติกของม้าฝ่ายไล่
- 5) ค่าตารางฮิวริสติกของเม็ดฝ่ายไล่

จากตัวอย่างที่ 1

รวม 5 รูปแบบ คือ $-20 + 10 + 10 + 0 + 10 = 10$ คะแนน

คิดคำนวณเพื่อแสดงผล คือ $1100 + 10 = 1110$ คะแนน

จากตัวอย่างที่ 2

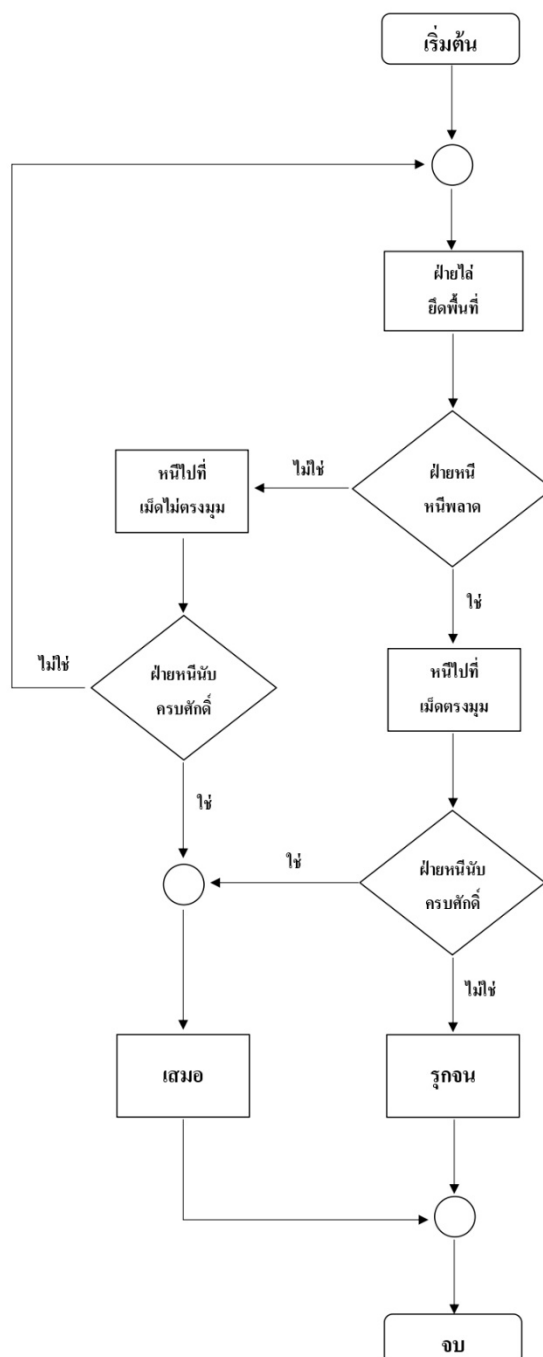
รวม 5 รูปแบบ คือ $-20 - 100 + 10 + 0 + 10 = -100$ คะแนน

คิดคำนวณเพื่อแสดงผล คือ $1100 - 100 = 1000$ คะแนน

3. การทดลองและผลการทดลอง

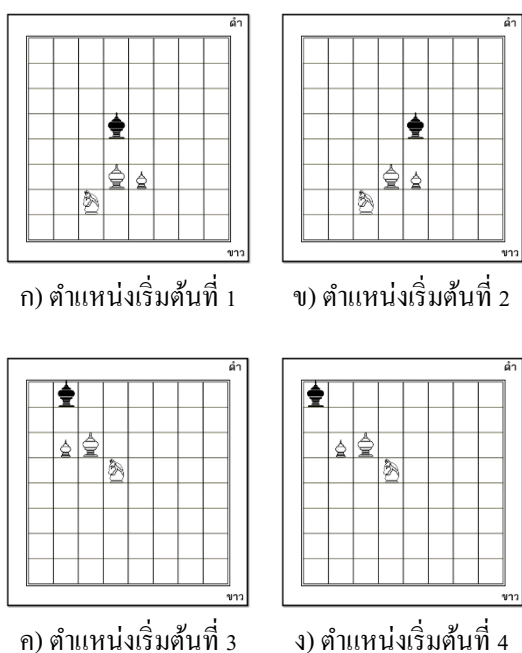
การทดลองของปัญญาประดิษฐ์ถูกพัฒนาด้วย ภาษา JavaScript บน Notebook (ASUS) Intel(R) Core(TM) i7-9750H CPU @ 2.60GHz และ RAM 16.0 GB ด้วย วิธีการอัลฟาเบตา (Alpha-Beta pruning) โดยใช้วิธีค้นหาคำตอบด้วยวิธีการค้นหาในแนวลึกแบบวนเพิ่มความลึก (Iterative Deepening Depth-First Search) เพื่อโอบล้อมขุนฝ่ายหนีที่อยู่ในตำแหน่งเสมอ (11,457,116 ตำแหน่ง)

ให้เข้าไปสู่การชนะได้ โดยสามารถแสดงแผนภาพลำดับการทำงานของปัญญาประดิษฐ์หมากรุกไทยในการได้รูปแบบมวยเม็ด (Flowchart) ได้ดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 แผนภาพลำดับการทำงานของปัญญาประดิษฐ์หมากรุกไทยในการได้รูปแบบมวยเม็ด

สำหรับตำแหน่งเริ่มต้นในการไล่เราได้กำหนดไว้ 4 ตำแหน่ง ซึ่งแต่ละตำแหน่งนั้นเป็นตำแหน่งที่เสมอ (อยู่ใน 11,457,116 ตำแหน่งที่สามารถเสมอได้) ซึ่งหากฝ่ายหนึ่งเดินได้อย่างถูกต้องผลลัพธ์จะออกมาเสมอกัน โดยได้กำหนดการทดลองแต่ละตำแหน่งเริ่มต้นอย่างละ 25 กระดาน (ฝ่ายไล่เป็นฝ่ายเดินก่อน) รวมทั้งสิ้น 100 กระดาน เพื่อบันทึกผลลัพธ์ที่เกิดขึ้น สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 10



รูปที่ 10 ตำแหน่งเริ่มต้นที่ใช้ในการทดสอบการไล่ทั้ง 4 ตำแหน่ง รวมทั้งสิ้น 100 กระดาน

สำหรับการทดลองนี้ เป็นการทดสอบค่าฮิวริสติกที่ได้ออกแบบไว้ 5 รูปแบบที่ได้นำเสนอข้างต้น โดยได้ทำการทดลองหาความลึกที่เหมาะสม ในการกำหนดให้ทำการไล่กับโปรแกรมหมากรุกไทย SeniorSoft ThaiChess Master V3 ที่ความลึก 6-12 อย่างละ 100 กระดาน เพื่อหาระดับความลึกที่เหมาะสม ผลปรากฏว่าความลึกที่ 10 มีอัตราชนะที่มากกว่าความลึกที่ 6-9 อย่างเห็นได้ชัดเจน และใช้เวลาได้เหมาะสมกว่าความลึกที่ 11-12 ที่ใช้เวลานานเกินไป ดังนั้นจึงเลือกใช้ค่าความลึกที่ 10 ในการทดลอง เพื่อทำการเปรียบเทียบกับวิธีการอื่น ๆ

โดยมีวิธีการเปรียบเทียบการไล่ด้วยกันทั้งหมด 3 วิธี คือ 1) วิธี Quiescence Search 2) โปรแกรมหมากรุกไทย Prop (ดัดแปลงมาจาก Stockfish) และ 3) ผู้เล่นที่เคยได้รับรางวัลจากการแข่งขันระดับชาติ ซึ่งทำการเปรียบเทียบโดยการไล่โปรแกรมหมากรุกไทย SeniorSoft ThaiChess Master V3 วิธีละ 100 กระดาน (ตำแหน่งเริ่มต้นในการไล่ 4 ตำแหน่ง อย่างละ 25 กระดาน) และบันทึกข้อมูลเพื่อทำการเปรียบเทียบทั้ง 4 ด้าน ได้แก่ 1) อัตราการรุกจน 2) จำนวนตาเดินเฉลี่ยที่ใช้รุกจนใน 1 กระดาน 3) เวลาเฉลี่ยที่ใช้สำหรับการเดินใน 1 ตาเดิน (โดยคิดจาก 10, 15 และ 20 ตาเดินแรก) และ 4) เวลาเฉลี่ยที่ใช้สำหรับการรุกจนใน 1 กระดาน

3.1 ด้านอัตราการรุกจน

การทดสอบเพื่อหาอัตราการรุกจนใน 100 กระดาน (ตำแหน่งเริ่มต้นในการไล่ 4 ตำแหน่ง อย่างละ 25 กระดาน) ด้วยการไล่โปรแกรมหมากรุกไทย SeniorSoft ThaiChess Master V3 ผลปรากฏว่าวิธีการของวิจัยนี้และวิธี Quiescence Search มีอัตราการรุกจนที่ 100 เปอร์เซ็นต์ โดยที่ ผู้เล่นที่เคยได้รับรางวัลจากการแข่งขันระดับชาติ และ โปรแกรมหมากรุกไทย Prop มีอัตราการรุกจนที่ 91 และ 76 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ สามารถแสดงผลที่ได้ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลลัพธ์ที่ได้จากการทดสอบทั้ง 4 วิธีในด้านอัตราการรุกจนที่เกิดขึ้น

วิธีที่ใช้ทดสอบ	อัตราการรุกจน (เปอร์เซ็นต์)
งานวิจัยนี้	100
Quiescence Search	100
Prop	76
ผู้เล่นระดับชาติ	91

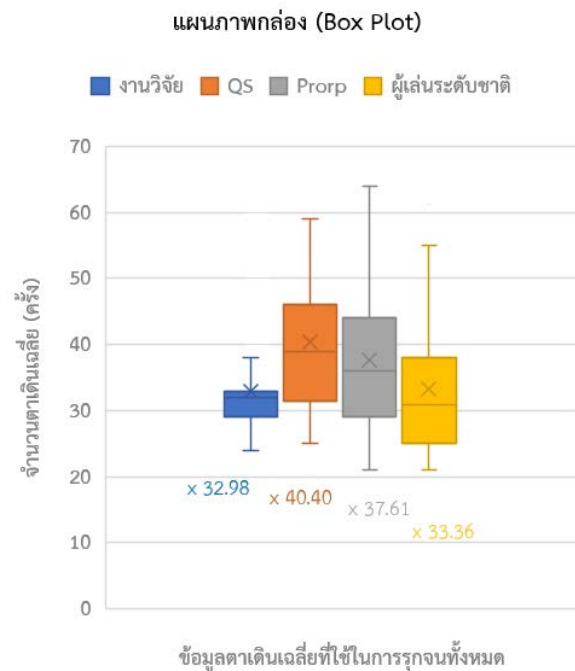
3.2 ด้านจำนวนตาเดินเฉลี่ยที่ใช้รูกจนใน 1 กระดาน

การทดสอบแต่ละวิธีเพื่อบันทึกข้อมูลของจำนวนตาเดินเฉลี่ยที่ใช้รูกจนใน 1 กระดาน เราจะอ้างอิงถึงกฎการนับศักดิ์หมากในหมากรุกไทย กล่าวคือการนับศักดิ์หมากจะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อทั้ง 2 ฝ่ายไม่มีเบี้ยคว่ำเหลืออยู่บนกระดานและฝ่ายเป็นรองเหลือขุนเพียงตัวเดียว ซึ่งจะเริ่มนับรวมตัวหมากทั้งหมดของทั้งสองฝ่ายที่มีอยู่บนกระดาน จากนั้นให้เริ่มนับจำนวนตาเดินต่อจากนั้น โดยที่ฝ่ายเป็นรองเป็นผู้นำเพียงฝ่ายเดียว ในกรณีถ้าฝ่ายเป็นรองสามารถนับได้ถึง 64 ตาเดิน (ศักดิ์ของม้า 1 ตัว) และฝ่ายไล่ไม่สามารถทำให้เกิดการรูกจนได้ จะถือว่าผลการแข่งขันในเกมนั้น ๆ เสมอกันทันที

สำหรับการทดสอบในด้านนี้ เราจะนำเฉพาะจำนวนกระดานที่ฝ่ายไล่สามารถทำการรูกจน (ชนะ) มาคิดคำนวณเพื่อหาจำนวนตาเดินเฉลี่ยที่ใช้ใน 1 กระดาน ซึ่งผลการทดสอบที่เกิดขึ้นนั้นชี้ให้เห็นว่าวิธีการของงานวิจัยนี้ใช้จำนวนตาเดินเฉลี่ยน้อยที่สุด คือ 33 ครั้ง รองลงมาเป็นวิธีการไล่ของผู้เล่นที่เคยได้รับรางวัลจากการแข่งขันระดับชาติที่ 34 ครั้ง สำหรับโปรแกรมหมากรุกไทย Prop ใช้จำนวน 38 ครั้ง และวิธี Quiescence Search ใช้จำนวนตาเดินที่มากที่สุด คือ 41 ครั้ง สามารถแสดงผลลัพธ์ได้ดังตารางที่ 3 และแสดงข้อมูลแผนภาพกล่องของข้อมูลได้ดังรูปที่ 11

ตารางที่ 3 ผลลัพธ์ที่ได้จากการทดสอบทั้ง 4 วิธีในด้านจำนวนตาเดินเฉลี่ยที่ใช้รูกจนใน 1 กระดาน

วิธีที่ทดสอบ	จำนวนตาเดินเฉลี่ยที่ใช้ต่อ 1 เกม (ครั้ง)
งานวิจัยนี้	33
Quiescence Search	41
Prop	38
ผู้เล่นระดับชาติ	34



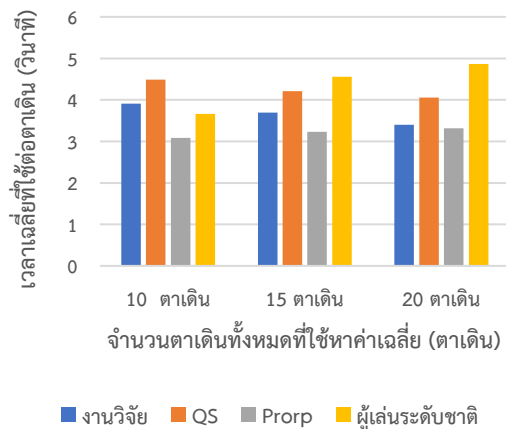
รูปที่ 11 กราฟแสดงแผนภาพกล่องสำหรับข้อมูลของฝ่ายไล่ที่ใช้จำนวนตาเดินในการรูกจนทั้งหมดของทุกวิธี

3.3 ด้านเวลาเฉลี่ยที่ใช้สำหรับการเดินใน 1 ตาเดิน

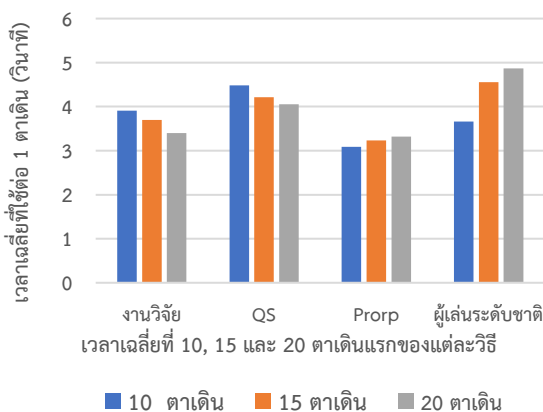
ในทุก ๆ วิธีที่ใช้เวลาในการไล่ โดยให้ความสนใจไปที่เวลาที่ใช้สำหรับการเดินใน 1 ตาเดิน ซึ่งได้นำข้อมูลของตาเดินที่ 10, 15 และ 20 ตาเดินแรกมาคิดคำนวณและบันทึกข้อมูล เนื่องจากการไล่บางกระดานของทุก ๆ วิธีที่ใช้ในการทดสอบจะใช้จำนวนตาเดินในการรูกจนที่ไม่เท่ากัน เราจึงนำเฉพาะ 10, 15 และ 20 ตาเดินแรกเพื่อกำหนดให้มีการใช้ตาเดินที่เท่ากันและนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ดูแนวโน้มของแต่ละวิธีที่ใช้ทดสอบนั้นว่าใช้เวลาที่เพิ่มมากขึ้นหรือน้อยลงในการทดสอบไล่คู่ต่อสู้ด้วยจำนวนตาเดินที่มากขึ้น ซึ่งสามารถคำนวณได้จากการนำจำนวนเวลาทั้งหมดของ 10, 15 และ 20 ตาเดินแรกในการไล่ 100 กระดานมารวมกัน แล้วหารด้วยจำนวนตาเดินที่ใช้ไปทั้งหมด คือ 1000, 1500 และ 2000 ตามลำดับ

ซึ่งผลปรากฏว่าเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการไล่ต่อ 1 กระดาน ใน 10, 15 และ 20 ตาเดินแรกของงานวิจัยนี้ คือ 3.908, 3.695 และ 3.400 วินาทีตามลำดับ สำหรับ

วิธี Quiescence Search ใช้เวลา 4.484, 4.212 และ 4.053 วินาที ตามด้วยโปรแกรมหมากรุกไทย Prop ใช้เวลา 3.086, 3.230 และ 3.316 วินาที และการไล่ของผู้เล่นที่เคยได้รับรางวัลจากการแข่งขันระดับชาติ ใช้เวลา 3.659, 4.556 และ 4.869 วินาที สามารถแสดงผลลัพธ์ได้ดังรูปที่ 12 และรูปที่ 13



รูปที่ 12 กราฟแสดงการเปรียบเทียบข้อมูลของจำนวนเวลาเฉลี่ยที่ใช้ใน 1 ตาเดิน โดยคิดค่าเฉลี่ยจากการเดินจำนวน 10, 15 และ 20 ตาเดินแรกในแต่ละวิธี



รูปที่ 13 กราฟแสดงข้อมูลของจำนวนเวลาเฉลี่ยที่ใช้ใน 1 ตาเดิน โดยคิดค่าเฉลี่ยจากการเดินจำนวน 10, 15 และ 20 ตาเดินแรกในแต่ละวิธี

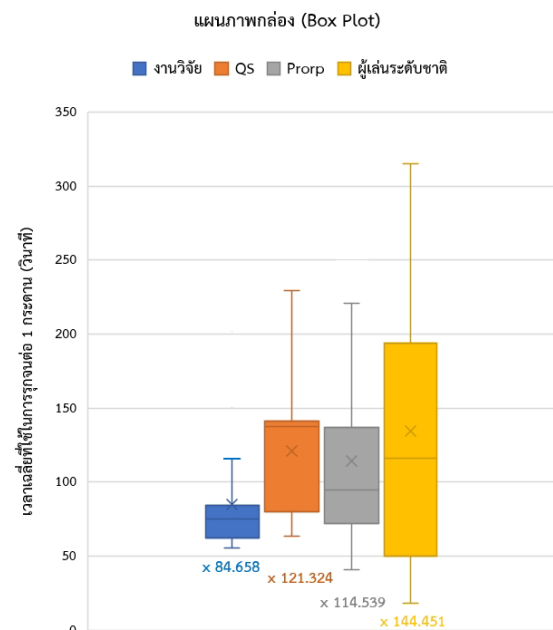
3.4 ด้านเวลาเฉลี่ยที่ใช้สำหรับการรูกอนใน 1 กระดาน

การบันทึกข้อมูลจำนวนกระดานที่แต่ละวิธีสามารถทำการรูกอนได้ สามารถคำนวณได้จากการนำเวลา

ทั้งหมดของกระดานที่รูกอนมารวมกันแล้วหารด้วยจำนวนกระดานที่รูกอนทั้งหมด ซึ่งผลลัพธ์ที่ออกมา คือ งานวิจัยนี้ใช้เวลาเฉลี่ย 84.658 วินาทีต่อกระดาน สำหรับวิธี Quiescence Search ใช้เวลาเฉลี่ย 121.324 วินาทีต่อกระดาน ในส่วนโปรแกรมหมากรุกไทย Prop ใช้เวลาเฉลี่ย 114.539 วินาทีต่อกระดาน และการไล่ของผู้เล่นที่เคยได้รับรางวัลจากการแข่งขันระดับชาติ ใช้เวลาเฉลี่ย 144.451 วินาทีต่อกระดาน สามารถแสดงผลลัพธ์ได้ดังตารางที่ 4 และรูปที่ 14

ตารางที่ 4 ผลลัพธ์ที่ได้จากการทดสอบทั้ง 4 วิธีในด้านเวลาเฉลี่ยที่ใช้สำหรับการรูกอนใน 1 กระดาน

วิธีที่ใช้ทดสอบ	เวลาเฉลี่ยที่ใช้ต่อกระดาน (วินาที)
งานวิจัยนี้	84.658
Quiescence Search	121.324
Prop	114.539
ผู้เล่นระดับชาติ	144.451



รูปที่ 14 กราฟแสดงแผนภาพกล่องสำหรับข้อมูลของฝ่ายไล่ที่ใช้เวลาเฉลี่ยในการรูกอนทั้งหมดของทุกวิธี

4. สรุปผลและข้อเสนอแนะ

4.1 สรุปผลการทดลอง

จากงานวิจัยนี้สรุปได้ว่าถ้าในเกมหมากกรุกไทย เหลือรูปแบบมวยเม็ด (ฝ่ายไล่มี ขุน 1 ตัว, ม้า 1 ตัว, เม็ด หรือเบี้ยหาย 1 ตัว และฝ่ายหนีมี ขุน 1 ตัว) ถ้าในกรณีที่ฝ่ายไล่เริ่มเดินก่อน จะมีตำแหน่งที่สามารถทำให้เกิดการรุกจน (ชนะ) ได้ 472,900 ตำแหน่ง จากตำแหน่งที่ถูกกติกาทั้งหมด 11,930,016 ตำแหน่ง ซึ่งถ้าตำแหน่งเริ่มต้นอยู่นอกเหนือ 472,900 ตำแหน่ง แล้วฝ่ายหนีเดินได้ถูกต้องทุกตาเดินจะทำให้ฝ่ายไล่ไม่สามารถทำการรุกจนได้ (ตามกฎหมายการนับศักดิ์หมากของหมากกรุกไทย คือ 64 ครั้ง และถือว่าเสมอกันไปในที่สุด)

สำหรับค่าตารางอิวิริสติกของงานวิจัยที่ได้ ออกแบบเพื่อใช้สำหรับการไล่รูปแบบมวยเม็ดนี้ จากการทดสอบโปรแกรมหมากกรุกไทย SeniorSoft ThaiChess Master V3 ใน 100 กระดาน โดยได้กำหนดตำแหน่งเริ่มต้นที่ใช้สำหรับการไล่ 4 ตำแหน่ง ซึ่งทำการทดสอบการไล่ตำแหน่งละ 25 กระดาน สำหรับการทดลองเพื่อหาความลึกเหมาะสมที่ใช้ในการค้นหาในช่วงความลึกที่ 6-12 ผลคือความลึกที่ 10 มีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้ทดสอบมากที่สุด

ในการทดสอบเพื่อทำการเปรียบเทียบกับวิธีต่าง ๆ ผลปรากฏว่าวิธีของงานวิจัยนี้มีผลลัพธ์ที่ดี ได้แก่ 1) มีอัตราการรุกจน 100.00% 2) จำนวนครั้งเฉลี่ยที่ใช้ในการรุกจน คือ 33 ครั้ง 3) เวลาเฉลี่ยใน 1 ตาเดินที่นับเฉพาะการเดิน 10, 15 และ 20 ครั้ง คือ 3.908, 3.695 และ 3.400 วินาที ตามลำดับ และ 4) เวลาเฉลี่ยที่ใช้รุกจนต่อ 1 เกม คือ 84.658 วินาที

4.2 ข้อเสนอแนะ

สำหรับผู้สนใจสร้างปัญญาประดิษฐ์หมากกรุกไทย สามารถที่จะนำค่าตารางอิวิริสติกที่ได้จากการออกแบบของงานวิจัยนี้ไปต่อยอดได้ โดยข้อจำกัดของงานวิจัยนี้มีอยู่ 2 ด้าน คือ 1) ด้านเวลาที่ใช้หาคำตอบ และ

2) ด้านความลึกในการค้นหาคำตอบที่สั้นเกินไป กล่าวคืองานวิจัยนี้เมื่อใช้ความลึกในการค้นหาที่มากกว่าความลึกที่ 10 จะต้องใช้เวลาเฉลี่ยในการเดิน 1 ครั้ง มากกว่า 10 วินาที ซึ่งไม่เหมาะสมในการนำมาใช้คิดคำนวณเพราะเป็นการใช้เวลาที่มากเกินไป ดังนั้นถ้าผู้พัฒนาสามารถสร้างอัลกอริทึมที่สามารถลดระยะเวลาในการค้นหาคำตอบได้ส่งผลให้งานนั้น ๆ สามารถที่จะเพิ่มค่าความลึกในการค้นหาให้มีค่ามากกว่า 10 และถ้าทำการค้นหาคำตอบแล้วผลลัพธ์ที่ได้มีแนวโน้มสูงที่จะมีประสิทธิภาพดีกว่างานวิจัยนี้อย่างแน่นอน

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] V. Janko and M. Guid, Development of a program for playing progressive chess, in: Advances in Computer Games (ACG 2015), in: Lecture Notes in Computer Science, Vol. 9525, pp. 122–134, Springer, 2015.
- [2] W. Saletan, "Chess Bump: The triumphant teamwork of humans and computers," 11 May 2007. [Online]. Available: <https://slate.com/technology/2007/05/the-triumphant-teamwork-of-humans-and-computers.html>. [Accessed 15 January 2020].
- [3] "CCRL 40/15," 11 January 2010. [Online]. Available: computerchess.org.uk. [Accessed 13 January 2020].
- [4] R. Gralla, "Kramnik plays Makruk Thai," 2004. [Online]. Available: <https://www.chessvariants.com/oriental.dir/thaikramnik.html>. [Accessed 10 July 2020].
- [5] D.B. Pritchard and J.D. Beasley, The Classified Encyclopedia of Chess Variants, J. Beasley, UK, 2007.
- [6] SiamSport, "SiamSport," 22 October 2017. [Online]. Available: <https://www.siamsport.co.th/column/detail/68156>. [Accessed 29 January 2020].
- [7] M. Guid, M. Mořina, A. Sadikov and I. Bratko, "Deriving Concepts and Strategies from Chess Tablebases," Advances in Computer Games 12th

- International Conference ACG 2009, Pamplona, Spain, 2009.
- [8] O. Marckel, "Alpha-beta Pruning in Chess Engines," Minnesota, USA, 2017.
- [9] M. Luštrek, M. Gams and I. Bratko, "Is real-valued minimax pathological?," Elsevier, Vol. 170, No. 6, pp. 620-642, 2006.
- [10] E. A. Heinz, "Endgame Databases and Efficient Index Schemes for Chess," ICCA Journal, Vol. 22, No. 1, pp. 22-32, 1999.
- [11] A. Castelli, S. Progressivi and M. Eccellenti, (in Italian; "Progressive Chess. Excellent Checkmates"), Macerata-Italy, 1996.
- [12] A. Castelli, S. progressivi and F. di Partita, (in Italian; "Progressive Chess. Endgames"), Macerata-Italy, 1997.
- [13] G. M. Haworth, "Chess Endgame News: 7-man 'Syzygy' DTZ 50 EGTs," ICGA journal, Vol. 40, No. 10, pp. 1-2, 2019.
- [14] G. Breda, KRK Chess Endgame Database Knowledge Extraction and Compression, Darmstadt Germany, 2006.
- [15] L. Kocsis and C. Szepesvári, Bandit based Monte-Carlo planning, in: Machine Learning: ECML 2006, Springer, pp. 282-293, 2006.
- [16] D. E. Knuth and R. W. Moore, "Artificial Intelligence," Elsevier, Vol. 6, No. 4, pp. 293-326, 1975.
- [17] W. B. Putra and L. Heryawan, "Applying alpha-beta algorithm in a chess engine," Jurnal Teknosains, Vol. 6, No. 1, pp. 37-43, 2017.
- [18] G. Schrufer, "A Strategic Quiescence Search," ICCA Journal, Vol. 12, No. 1, pp. 3-9, 1989.
- [19] M. H. Winands, "Quiescence Search for Stratego," The 21st Benelux Conference on Artificial Intelligence, Eindhoven, 2009.
- [20] J. Schaeffer, "The History Heuristic," ICCA Journal, Vol. 6, No. 3, pp. 16-19, 1983.
- [21] V. Janko and M. Guid, "A program for Progressive chess," Elsevier, Vol. 644, No. 1, pp. 76-91, 2016.
- [22] D. M. J. Tax, R. Duin and D. D. Ridder, Classification, Parameter Estimation and State Estimation: An Engineering Approach Using MATLAB, John Wiley & Sons, USA, 2004.

**การออกแบบสายอากาศแพทช์วงแหวนรูปวงกลม
บนพื้นผิวอภิวัดคุณสมบัติเรโซเนเตอร์วงแหวนแยก
สำหรับการประยุกต์ใช้งานสองย่านความถี่**

**Design of Circular Ring Patch Antenna on Split-Ring
Resonator Metasurface for Dual-Band Applications**

จินนัทธ เหมเมือง^{1,*} ชูวงศ์ พงศ์เจริญพานิชย์¹

¹ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

Jinnattha Hemmuang^{1,*} Chuwong Phongcharoenpanich¹

¹Department of Telecommunications Engineering, School of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

***Corresponding Author E-mail:** jinnattha.hemmuang@gmail.com

Received: May 18, 2021 **Revised:** June 11, 2021 **Accepted:** June 14, 2021

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการออกแบบพื้นผิวอภิวัดคุณสมบัติ (Metasurface) โดยใช้พื้นผิวเลือกความถี่ (Frequency Selective Surface : FSS) แบบเรโซเนเตอร์วงแหวนแยกชนิดแถบหยุดสำหรับการประยุกต์ใช้งานร่วมกับสายอากาศแพทช์วงแหวนเพื่อปรับปรุงอัตราขยายให้รองรับการใช้งานในย่านความถี่ ISM (Industrial, Scientific and Medical Band) ที่ย่านความถี่ 2.45 GHz และ 5.8 GHz โดยโครงสร้างทั้งสองถูกออกแบบบนวัสดุฐานรองชนิด FR-4 หนา 1.6 mm ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก 4.3 สายอากาศมีขนาด 30×45 mm และพื้นผิวอภิวัดคุณสมบัติมีขนาด 82×82 mm สายอากาศถูกวางไว้ด้านบนพื้นผิวอภิวัดคุณสมบัติที่ระยะห่าง 12 mm จากผลการจำลองของอัตราขยายที่ย่านความถี่ 2.45 GHz และ 5.8 GHz จากเดิมมีค่าเท่ากับ 1.70 dBi และ 4.01 dBi เมื่อปรับปรุงสายอากาศอัตราขยายมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 5.66 dBi และ 9.02 dBi ตามลำดับ โดยสายอากาศมีแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นทิศทางเดียว (Unidirectional Pattern)

คำสำคัญ: สายอากาศแพทช์วงแหวน พื้นผิวเลือกความถี่ ย่านความถี่ ISM

Abstract

This article presents the design of a metasurface using Frequency Selective Surface on a bandstop split-ring resonator to work with a ring patch antenna to enhance the gain that is operated along the ISM band of 2.45 GHz and 5.8 GHz. Both structures have been designed on FR-4 substrate with thickness of 1.6 mm and dielectric constant of 4.3. The ring patch antenna and the metasurface have the size of 30 mm×45 mm and 82 mm×82 mm, respectively. The antenna located above the metasurface with the spacing of 12 mm. The simulation results of gain at 2.45 GHz and 5.8 GHz was 1.70 dBi and 4.01 dBi. When the antenna gain was improved, the gain was increased to 5.66 dBi and 9.02 dBi, respectively. The radiation pattern of the proposed antenna is unidirectional beam.

Keywords: Ring patch antenna, Frequency selective surface (FSS), ISM band

1. บทนำ

ในปัจจุบันระบบสื่อสารไร้สายได้รับความนิยมใช้งานกันอย่างแพร่หลาย ส่งผลให้จำนวนผู้ใช้งานเพิ่มขึ้น จึงทำให้ช่องสัญญาณและอัตราขยายของสายอากาศรองรับการใช้งานได้ไม่เพียงพอ โดยสายอากาศแพตช์ได้รับความนิยมเช่นเดียวกัน เนื่องจากมีคุณสมบัติเด่นหลายประการเมื่อเทียบกับสายอากาศชนิดอื่น อาทิเช่น มีน้ำหนักเบา ขนาดกะทัดรัด ต้นทุนต่ำ ง่ายต่อการวิเคราะห์และการประดิษฐ์ จึงมีความเหมาะสมที่จะนำมาประยุกต์ใช้งานกับระบบสื่อสารไร้สาย อย่างไรก็ตามสายอากาศแพตช์ยังมีข้อบกพร่องบางประการคือ อัตราขยายต่ำและแบนด์วิดท์แคบ [1] ซึ่งมีการศึกษาบางส่วนในการหาวิธีพัฒนาหรือลดข้อบกพร่องเหล่านี้ [2,3] ซึ่งหนึ่งในวิธีการปรับปรุงข้อบกพร่องคือการใช้ตัวสะท้อนคลื่นหยุดแถบความถี่ที่ขึ้นอยู่กับพื้นผิวเลือกความถี่ (Frequency Selective Surface : FSS)

พื้นผิวเลือกความถี่คืออภิวัดในรูปแบบสองมิติที่มีคุณสมบัติเป็นตัวกรองความถี่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถออกแบบให้มีคุณสมบัติเช่นเดียวกับตัวกรองความถี่ทั่วไป โดยเฉพาะพื้นผิวเลือกความถี่ชนิดแถบหยุด ซึ่งสามารถนำมาใช้เป็นแผ่นสะท้อนให้กับสายอากาศแพตช์วงแหวนทำให้อัตราขยายของสายอากาศเพิ่มสูงขึ้นและความกว้างแถบความถี่เพิ่มขึ้น [4] เมื่อพิจารณาพื้นผิวเลือกความถี่ชนิดแถบหยุดเทียบกับแผ่นโลหะสะท้อน โดยทั้งสองมีข้อแตกต่างกันคือพื้นผิวเลือกความถี่ชนิดแถบหยุดสามารถออกแบบให้สะท้อนคลื่นมากกว่าหนึ่งย่านความถี่ได้ ซึ่งเหมาะสมกับการใช้งานกับสายอากาศหลายย่านความถี่มากกว่าแผ่นโลหะสะท้อน เนื่องจากคุณสมบัติของแผ่นโลหะสะท้อนมีขนาดสัมประสิทธิ์การสะท้อนเท่ากับ 1 และเฟสการสะท้อนเท่ากับ 180° เมื่อนำมาทำงานร่วมกับสายอากาศจะทำให้แต่ละความถี่จะถูกจำกัดด้วยระยะห่างระหว่างสายอากาศกับแผ่นโลหะสะท้อนส่งผลให้แผ่นโลหะสะท้อนสามารถตอบสนองได้เพียงย่านความถี่เดียว

บทความนี้จึงนำเสนอการออกแบบสายอากาศแพตช์วงแหวนที่ทำงานร่วมกับพื้นผิวเลือกความถี่ชนิดแถบหยุดที่สามารถทำงานในย่านความถี่ ISM

(Industrial, Scientific and Medical Band) ที่ย่านความถี่ 2.45 (2.401-2.495) GHz และ 5.8 (5.15-5.895) GHz

2. การออกแบบและโครงสร้างสายอากาศ

จากการจำลองโดยโปรแกรม CST Studio Suit 2017 เริ่มต้นจากการออกแบบสายอากาศแพตช์วงแหวนให้สามารถทำงานได้ที่ย่านความถี่ 2.45 GHz และ 5.8 GHz จากนั้นออกแบบพื้นผิวเลือกความถี่ชนิดแถบหยุดที่สามารถทำงานได้ในย่านความถี่ 2.45 GHz และ 5.8 GHz เช่นเดียวกันเพื่อนำมาวางไว้ทางด้านหลังของตัวสายอากาศแพตช์วงแหวนเพื่อปรับปรุงอัตราขยายและแบนด์วิดท์ โดยโครงสร้างทั้งสองถูกออกแบบบนวัสดุฐานรองชนิด FR-4 ที่มีความหนา 1.6 mm ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric constant : ϵ_r) เท่ากับ 4.3 และมีขนาดโดยรวมเท่ากับ $82 \times 82 \times 15.34$ mm

2.1 การออกแบบสายอากาศแพตช์วงแหวน

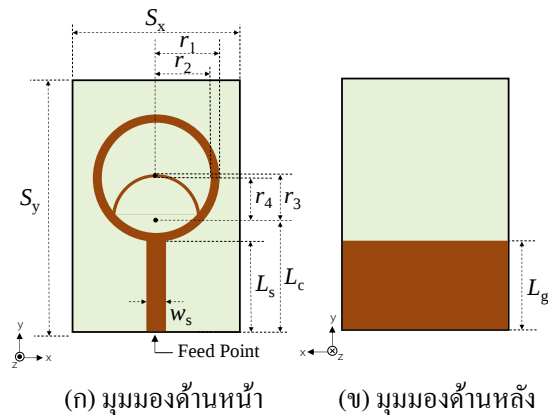
สายอากาศแพตช์วงแหวนที่ออกแบบมีพื้นฐานมาจากสายอากาศแพตช์วงกลมซึ่งรัศมีของแพตช์วงกลมสามารถคำนวณได้สมการดังต่อไปนี้ [5]

$$r_1 = \frac{F}{\left\{ 1 + \frac{2h}{\pi \epsilon_r F} \left[\ln \left(\frac{\pi F}{2h} \right) + 1.7726 \right] \right\}^{1/2}} \quad (1)$$

เมื่อ

$$F = \frac{8.791 \times 10^9}{f_r \sqrt{\epsilon_r}}$$

โดยที่ f_r คือความถี่เรโซแนนซ์และ h คือความหนาของวัสดุฐานรอง ซึ่งโครงสร้างของสายอากาศแพตช์วงแหวนแสดงในรูปที่ 1 โดยเส้นไมโครสตริปถูกนำมาใช้เป็นโครงสร้างการป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศแพตช์วงแหวนที่มีอิมพีแดนซ์ด้านเข้า (Input impedance) ใกล้ 50Ω ขนาดและพารามิเตอร์ของสายอากาศแพตช์วงแหวนแสดงดังตารางที่ 1



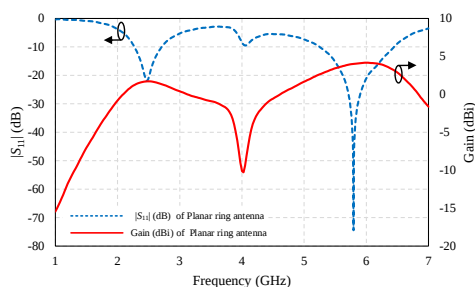
(ก) มุมมองด้านหน้า (ข) มุมมองด้านหลัง

รูปที่ 1 โครงสร้างสายอากาศแพตช์วงแหวน

ตารางที่ 1 ขนาดและพารามิเตอร์ของสายอากาศแพตช์วงแหวน

พารามิเตอร์ (Parameter)	ขนาด (Physical Size: mm)	พารามิเตอร์ (Parameter)	ขนาด (Physical Size: mm)
S_x	30	r_4	7.5
S_y	45	w_s	3.5
r_1	11.5	L_c	20
r_2	10	L_s	16.1
r_3	8	L_g	15

จากผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนและอัตราขยายของสายอากาศแพตช์วงแหวนดังแสดงในรูปที่ 2 จะเห็นได้ว่าผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนทำการพิจารณาที่ -10 dB ที่ย่านความถี่ 2.45 GHz มีค่าเท่ากับ -21.16 dB และที่ย่านความถี่ 5.8 GHz มีค่าเท่ากับ -50.55 dB และอัตราขยายมีค่าเท่ากับ 1.70 dBi และ 4.01 dBi ตามลำดับ

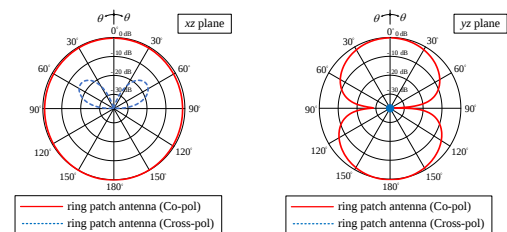


รูปที่ 2 ผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน

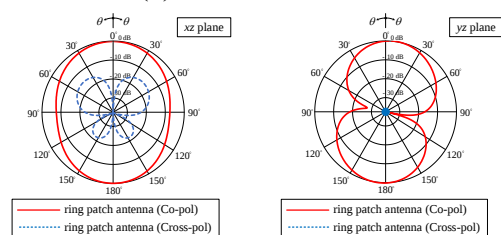
และอัตราขยายของสายอากาศแพตช์วงแหวน

การจำลองแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นแบบนอร์มัลไลซ์ (Normalized radiation pattern) ของสายอากาศแพตช์วงแหวนในระนาบ xz และ yz

ที่ย่านความถี่ 2.45 GHz และ 5.8 GHz ดังแสดงในรูปที่ 3 จากผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นแบบนอร์มัลไลซ์ของสายอากาศแพตช์วงแหวนมีแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นแบบรอบทิศทาง (Omnidirectional radiation pattern)



(ก) ความถี่ 2.45 GHz



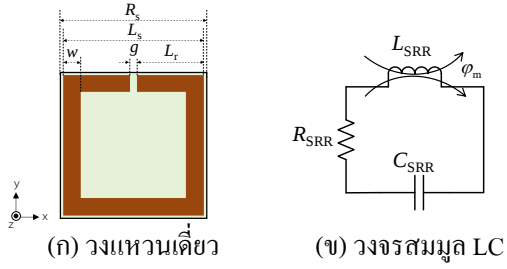
(ข) ความถี่ 5.8 GHz

รูปที่ 3 ผลการจำลองแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นแบบนอร์มัลไลซ์ของสายอากาศแพตช์วงแหวน

2.2 การออกแบบพื้นผิวเลือกความถี่

ในหัวข้อนี้ได้ออกแบบโครงสร้างของพื้นผิวเลือกความถี่ชนิดแถบหุขรูปแบบบ่วงสี่เหลี่ยม 2 บ่วง ซึ่งการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของรูปร่างองค์ประกอบของพื้นผิวเลือกความถี่แสดงในเอกสารอ้างอิงที่ [6] โดยจะสังเกตเห็นได้ว่าบ่วงสี่เหลี่ยมมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าแบบอื่น ๆ ในด้านความเสถียรเชิงมุม ระดับโพลาไรซ์ไขว้ ความกว้างแถบความถี่และการแยกแบนด์ขนาดเล็ก ดังนั้นบทความนี้ได้ออกแบบพื้นผิวเลือกความถี่ชนิดแถบหุขเนื่องจากต้องการให้พื้นผิวเลือกความถี่สามารถทำการสะท้อนคลื่นที่ย่านความถี่ 2.45 GHz และ 5.8 GHz โดยประเภทและการตอบสนองของพื้นผิวเลือกความถี่แสดงในเอกสารอ้างอิงที่ [7]

พื้นผิวเลือกความถี่ที่นำเสนอถูกบรรจุด้วยโครงสร้างเรโซเนเตอร์แบบวงแหวนแยก (Split Ring Resonators: SRRs) ที่มีขนาดมิติ 3×3 cell ซึ่งโครงสร้างเรโซเนเตอร์แบบวงแหวนเดี่ยวของเรโซเนเตอร์แบบวงแหวนแยกแสดงดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 โครงสร้างวงแหวนเดี่ยวของเรโซเนเตอร์
แบบวงแหวนแยก

โดยความถี่เรโซแนนซ์วงแหวนเดี่ยวของเรโซเนเตอร์แบบวงแหวนแยกสามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้ [8]

$$f_{SRR} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{SRR}C_{SRR}}} \quad (2)$$

เมื่อ L_{SRR} คือค่าความเหนี่ยวนำของวงแหวนเดี่ยว และ C_{SRR} คือค่าความประจุสมมูลซึ่ง L_{SRR} และ C_{SRR} สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$L_{SRR} = \frac{\mu_0\pi L_m^2}{h} \quad (3)$$

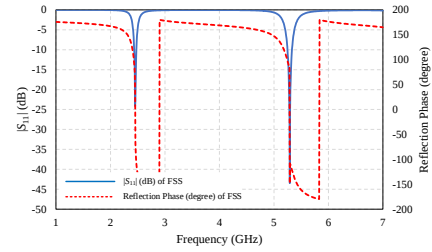
$$C_{SRR} = \frac{\epsilon_0 hw}{g} \quad (4)$$

โดยที่ $L_m = L_s/2 - w/2$ และ μ_0 คือค่าความซาบซึมแม่เหล็กในอวกาศว่างมีค่าเท่ากับ $4\pi \times 10^{-7}$ H/m ϵ_0 คือค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าในอวกาศว่างมีค่าเท่ากับ $1/36\pi \times 10^9$ F/m และ h คือความหนาของวัสดุฐานรองมีค่าเท่ากับ 1.6 mm

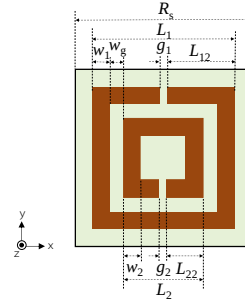
ดังนั้นการคำนวณพารามิเตอร์ทางโครงสร้างเรโซเนเตอร์แบบวงแหวนแยกของย่านความถี่ 2.45 GHz จากรูปที่ 4 เมื่อ $L_s = 20$ mm $w = 2.5$ mm และ $g = 1$ mm จะได้ $L_{SRR(2.45 \text{ GHz})} = 0.19 \mu\text{H}$ และ $C_{SRR(2.45 \text{ GHz})} = 0.03 \text{ pF}$ นำไปแทนค่าในสมการที่ (2) $f_{SRR(2.45 \text{ GHz})} = 2.11 \text{ GHz}$ และเมื่อทำการคำนวณหาการประมาณค่าโครงสร้างเรโซเนเตอร์แบบวงแหวนแยกของย่านความถี่ 5.8 GHz เมื่อ $L_s = 11$ mm $w = 2.5$ mm และ $g = 1$ mm จะได้ $L_{SRR(5.8 \text{ GHz})} = 0.04 \mu\text{H}$ และ $C_{SRR(5.8 \text{ GHz})} = 0.03 \text{ pF}$ เมื่อ นำไปแทนค่าในสมการที่ (2) $f_{SRR(5.8 \text{ GHz})} = 4.59 \text{ GHz}$

จากนั้นได้นำค่าพารามิเตอร์ที่กำหนดมาทำการจำลองผลเพื่อดูเฟสการสะท้อนและค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของหน่วยเซลล์พื้นผิวเลือกความถี่ดังแสดงใน

รูปที่ 5 จากผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่ -10 dB มีการตอบสนองที่ย่านความถี่ 2.45 GHz และ 5.29 GHz มีค่าเท่ากับ -24.16 dB และ -43.47 dB ตามลำดับ ซึ่งผลการจำลองมีผลใกล้เคียงกับผลคำนวณทางทฤษฎี ซึ่งโครงสร้างหน่วยเซลล์ของพื้นผิวเลือกความถี่แสดงดังรูปที่ 6 ขนาดและพารามิเตอร์เริ่มต้นของหน่วยเซลล์พื้นผิวเลือกความถี่ดังแสดงในตารางที่ 2



รูปที่ 5 ผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนและเฟสการสะท้อนของหน่วยเซลล์พื้นผิวเลือกความถี่



รูปที่ 6 โครงสร้างของหน่วยเซลล์พื้นผิวเลือกความถี่

ตารางที่ 2 ขนาดและพารามิเตอร์เริ่มต้นของหน่วยเซลล์พื้นผิวเลือกความถี่

พารามิเตอร์ (Parameter)	ขนาด (Physical Size: mm)	พารามิเตอร์ (Parameter)	ขนาด (Physical Size: mm)
R_s	25	w_1	2.5
L_1	20	w_2	2.5
L_{12}	9.5	w_g	2
L_2	11	g_1	1
L_{22}	5	g_2	1

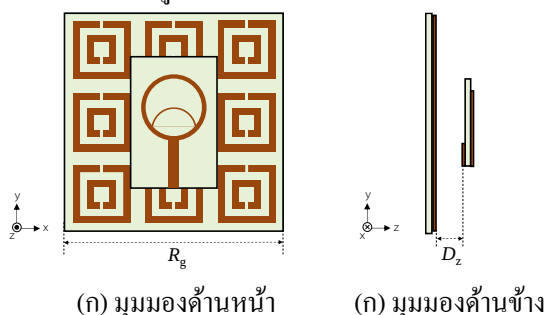
2.3 การออกแบบพื้นผิวเลือกความถี่ที่ทำงานร่วมกับสายอากาศแพตช์วงแหวน

2.3.1 ระยะห่างระหว่างสายอากาศแพตช์วงแหวนกับพื้นผิวเลือกความถี่

ในหัวข้อนี้เป็นการออกแบบพื้นผิวเลือกความถี่ที่ทำงานร่วมกับสายอากาศแพดช่วงแหวน จากรูปที่ 6 แสดงผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนและเฟสการสะท้อนที่ย่านความถี่ 2.45 GHz และ 5.29 GHz มีค่าเฟสการสะท้อนเท่ากับ 38.903° และ -148.36° ตามลำดับ เมื่อทราบค่าเฟสการสะท้อนจึงทำการหาระยะห่างระหว่างสายอากาศแพดช่วงแหวนกับพื้นผิวเลือกความถี่ได้จากสมการดังต่อไปนี้ [9]

$$D_z = \frac{\phi_r (\text{rad}) \cdot c}{2 \times 360 \times f \times 10^{-3}} \quad (5)$$

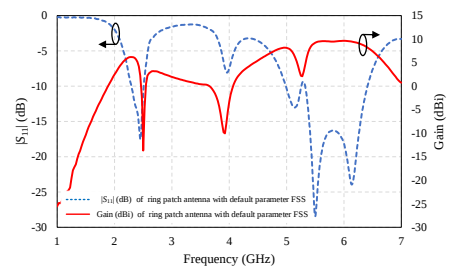
โดยที่ D_z คือระยะห่างระหว่างสายอากาศแพดช่วงแหวนกับพื้นผิวเลือกความถี่ ϕ_r คือค่าเฟสการสะท้อน c คือความเร็วแสงและ f คือความถี่เรโซแนนซ์ เมื่อนำค่าเฟสการสะท้อนมาคำนวณในสมการที่ (5) จะได้ D_z ที่ความถี่ 2.45 GHz มีค่าเท่ากับ 6.14 mm และที่ความถี่ 5.29 GHz มีค่าเท่ากับ 11.68 mm จากนั้นทำการหาค่าเฉลี่ย D_z ของทั้งสองความถี่จะมีค่าประมาณ 9 mm โดยในลำดับถัดไปจะใช้ระยะห่างระหว่างสายอากาศแพดช่วงแหวนกับพื้นผิวเลือกความถี่ที่ระยะ 9 mm ในการปรับปรุงพารามิเตอร์ต่าง ๆ โดยโครงสร้างสายอากาศแพดช่วงแหวนที่ทำงานร่วมกับพื้นผิวเลือกความถี่แสดงดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 โครงสร้างสายอากาศแพดช่วงแหวนทำงานร่วมกับพื้นผิวเลือกความถี่

รูปที่ 8 แสดงผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนและอัตราขยายของสายอากาศแพดช่วงแหวนที่ทำงานร่วมกับพื้นผิวเลือกความถี่ที่มีค่าพารามิเตอร์เริ่มต้น จากผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนพิจารณาที่ -10 dB ที่ย่านความถี่ 2.45 GHz มีค่าเท่ากับ -17.50 dB มีความกว้างแถบความถี่ตั้งแต่ความถี่ 2.29 GHz ถึง 2.51 GHz และค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน

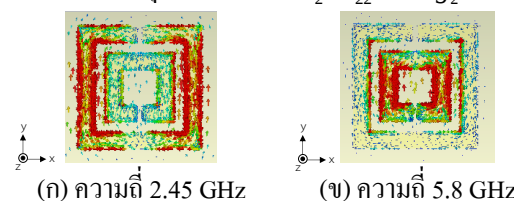
ที่ย่านความถี่ 5.8 GHz มีค่าเท่ากับ -16.28 dB มีความกว้างแถบความถี่ตั้งแต่ความถี่ 5.32 GHz ถึง 6.41 GHz และอัตราขยายที่ความถี่ 2.45 GHz และ 5.8 GHz มีค่าเท่ากับ 2.26 dBi และ 9.49 dBi จากผลการจำลองจะเห็นได้ว่าอัตราขยายของความถี่ 2.45 GHz ยังคงมีอัตราขยายต่ำและความกว้างแถบความถี่ในย่านความถี่ 5.8 GHz ยังไม่สามารถครอบคลุมแถบความถี่ที่ต้องการใช้งาน



รูปที่ 8 ผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนและอัตราขยายของสายอากาศแพดช่วงแหวนทำงานร่วมกับพื้นผิวเลือกความถี่ที่มีค่าพารามิเตอร์เริ่มต้น

2.3.2 การปรับปรุงพารามิเตอร์ของพื้นผิวเลือกความถี่

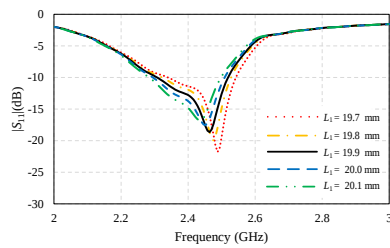
จากรูปที่ 9 แสดงผลการจำลองของการกระจายกระแสเชิงพื้นผิว (Surface current distributions) ของหน่วยเซลล์พื้นผิวเลือกความถี่ที่ความถี่ 2.45 GHz และ 5.8 GHz จากรูปที่ 9 (ก) ความเข้มของการกระแสเกิดขึ้นที่บริเวณบ่วงสี่เหลี่ยมบ่วงนอกและรูปที่ 9 (ข) ความเข้มของการกระแสเกิดขึ้นที่บริเวณบ่วงสี่เหลี่ยมบ่วงใน ดังนั้นจากผลการจำลองจะทำให้ทราบการตอบสนองของแต่ละความถี่และทราบตำแหน่งที่สามารถปรับปรุงพารามิเตอร์ได้ ซึ่งที่ความถี่ 2.45 GHz สามารถปรับปรุงพารามิเตอร์ L_1 L_{12} และ g_1 ที่ความถี่ 5.8 GHz สามารถปรับปรุงพารามิเตอร์ L_2 L_{22} และ g_2



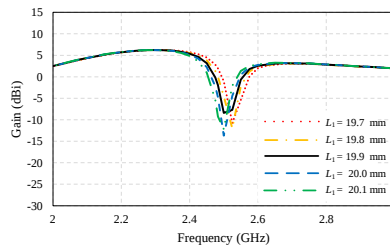
รูปที่ 9 ผลการจำลองการกระจายกระแสเชิงพื้นผิวของหน่วยเซลล์พื้นผิวเลือกความถี่

รูปที่ 10 แสดงผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนและอัตราขยายของการปรับปรุงพารามิเตอร์ L_1 จากผลการจำลองสังเกตเห็นว่าเมื่อ L_1 เท่ากับ 19.9 mm อัตราขยายที่ความถี่ 2.45 GHz มีค่าเพิ่มขึ้นจาก

2.26 dBi เป็น 3.17 dBi ถึงแม้ว่าค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนจะมีการแมตช์ที่ลดลงเพียงเล็กน้อย อยู่ที่ -17.43 dB



(ก) ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน

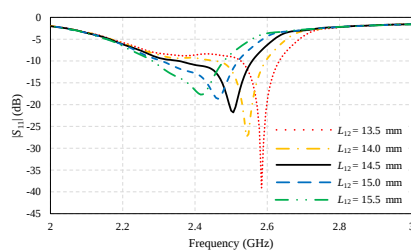


(ข) อัตราขยาย

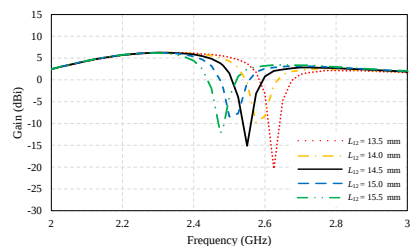
รูปที่ 10 ผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน

และอัตราขยายของการปรับปรุงพารามิเตอร์ L_1

รูปที่ 11 แสดงผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนและอัตราขยายของการปรับปรุงพารามิเตอร์ L_{12} จากผลการจำลองสังเกตเห็นว่าเมื่อ L_{12} เท่ากับ 14.5 mm อัตราขยายที่ความถี่ 2.45 GHz มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 3.17 dBi เป็น 4.85 dBi ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนมีการแมตช์ที่ลดลงอยู่ที่ -12.05 dB



(ก) ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน

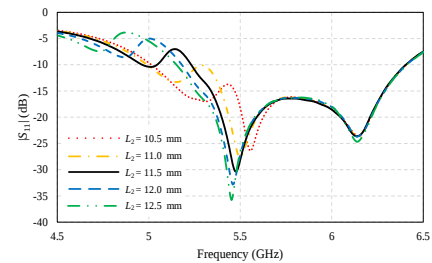


(ข) อัตราขยาย

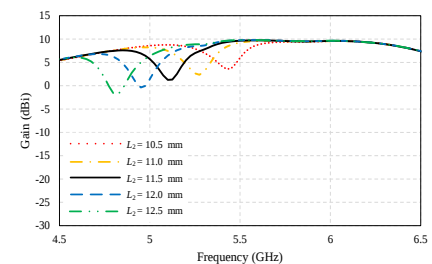
รูปที่ 11 ผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน

และอัตราขยายของการปรับปรุงพารามิเตอร์ L_{12}

รูปที่ 12 แสดงผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนและอัตราขยายของการปรับปรุงพารามิเตอร์ L_2 จากผลการจำลองสังเกตเห็นว่าเมื่อเพิ่มขนาด L_2 ส่งผลให้แถบความถี่ของย่านความถี่ 5.8 GHz กว้างขึ้นเมื่อ L_2 เท่ากับ 11.5 mm โดยมีความกว้างแถบความถี่ตั้งแต่ความถี่ 5.23 GHz ถึง 6.40 GHz และมีอัตราขยายที่ความถี่ 5.8 GHz เท่ากับ 9.53 dBi



(ก) ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน

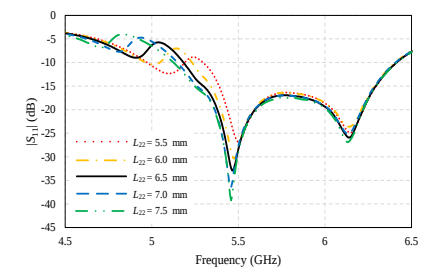


(ข) อัตราขยาย

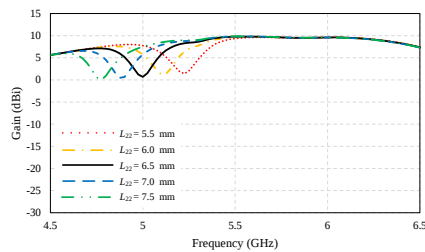
รูปที่ 12 ผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน

และอัตราขยายของการปรับปรุงพารามิเตอร์ L_2

รูปที่ 13 แสดงผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนและอัตราขยายของการปรับปรุงพารามิเตอร์ L_{22} จากผลการจำลองสังเกตเห็นว่าเมื่อ L_{22} เท่ากับ 6.5 mm ส่งผลให้ความกว้างแถบความถี่กว้างขึ้นตั้งแต่ความถี่ 5.19 GHz ถึง 6.41 GHz และมีอัตราขยายที่ความถี่ 5.8 GHz เท่ากับ 9.54 dBi



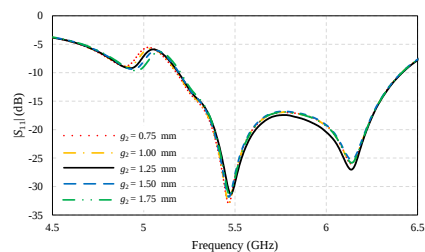
(ก) ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน



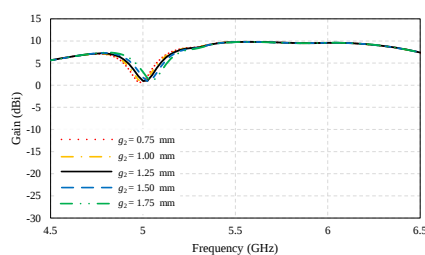
(ข) อัตราขยาย

รูปที่ 13 ผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนและอัตราขยายของการปรับปรุงพารามิเตอร์ L_{22}

รูปที่ 14 แสดงผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนและอัตราขยายของการปรับปรุงพารามิเตอร์ g_2 จากผลการจำลองสังเกตเห็นได้ว่าเมื่อ g_2 เท่ากับ 1.25 mm ส่งผลให้ความกว้างแถบความถี่กว้างขึ้นตั้งแต่ความถี่ 5.18 GHz ถึง 6.21 GHz และอัตราขยายที่ความถี่ 5.8 GHz เท่ากับ 9.57 dBi ซึ่งความกว้างแถบความถี่สามารถครอบคลุมแถบความถี่ที่ต้องการใช้งาน



(ก) ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน

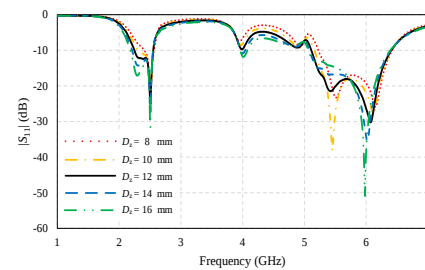


(ข) อัตราขยาย

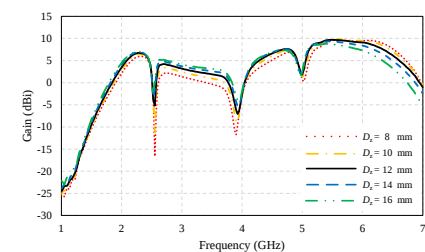
รูปที่ 14 ผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนและอัตราขยายของการปรับปรุงพารามิเตอร์ g_2

เมื่อได้คุณสมบัติที่เหมาะสม ลำดับถัดไปทำการคำนวณหาระยะห่างระหว่างสายอากาศแพทช์วงแหวนกับพื้นผิวเลือกความถี่ที่ถูกปรับปรุงพารามิเตอร์ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (5) จากผลการคำนวณระยะห่างระหว่างสายอากาศแพทช์วงแหวนกับพื้นผิวเลือกความถี่ที่ถูกปรับปรุงพารามิเตอร์มีค่าเท่ากับ 16 mm จึงทำการจำลองผลเปรียบเทียบกับระยะห่างอื่น ดังแสดงในรูปที่ 15 จากผลการจำลองเมื่อเพิ่มขนาดพารามิเตอร์

D_z ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนทั้งสองย่านความถี่มีการแมตช์ที่ดีขึ้นและอัตราขยายที่ย่านความถี่ 2.45 GHz มีค่าเพิ่มขึ้น แต่ในส่วนของอัตราขยายที่ย่านความถี่ 5.8 GHz มีอัตราขยายที่ลดลง ดังนั้นบทความนี้จึงเลือก D_z ที่มีขนาดเท่ากับ 12 mm เพื่อให้ได้คุณสมบัติของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนและอัตราขยายของทั้งสองย่านความถี่มีคุณสมบัติที่เหมาะสมมากที่สุด



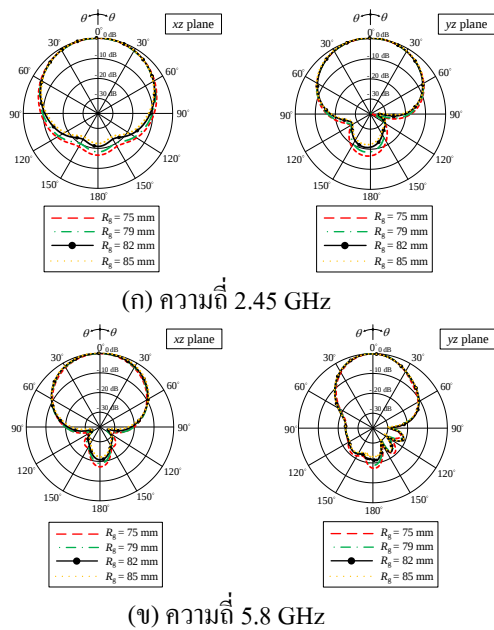
(ก) ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน



(ข) อัตราขยาย

รูปที่ 15 ผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนและอัตราขยายของการปรับปรุงพารามิเตอร์ D_z

ลำดับถัดมาได้จำลองการเพิ่มขนาดระนาบกราวด์ให้กับพื้นผิวเลือกความถี่เพื่อทำการลดค่าคลื่นด้านหลัง (Back lobe) โดยการปรับปรุงพารามิเตอร์ R_g จากเดิมพารามิเตอร์ R_g มีขนาดเท่ากับ 75 mm โดยบทความนี้ทำการจำลองผลการปรับปรุงพารามิเตอร์ R_g ที่มีขนาดเท่ากับ 75 79 82 และ 85 mm ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 16 จากผลการจำลองพารามิเตอร์ R_g ที่มีขนาดเท่ากับ 82 mm มีขนาดที่เหมาะสมที่สุด จากเดิมอัตราส่วนลำคลื่นด้านหน้าต่อลำคลื่นด้านหลัง (Front-to-back ratio) ที่ความถี่ 2.45 GHz และ 5.8 GHz มีค่าเท่ากับ 17.48 dB และ 18.98 dB ตามลำดับ เมื่อทำการปรับปรุงพารามิเตอร์ R_g ให้มีค่าเท่ากับ 82 mm ส่งผลให้อัตราส่วนลำคลื่นด้านหน้าต่อลำคลื่นด้านหลังที่ความถี่ 2.45 GHz และ 5.8 GHz มีค่าเท่ากับ 20.18 dB และ 20.42 dB ตามลำดับ



รูปที่ 16 ผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบนอร์มัลไลซ์ของการปรับปรุงพารามิเตอร์ R_g

3. สายอากาศที่น่าสนใจ

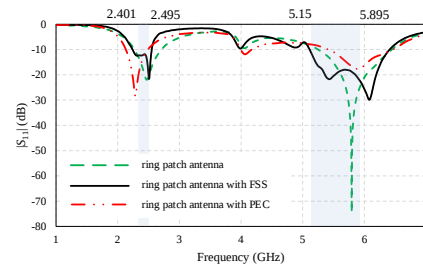
จากการปรับปรุงพารามิเตอร์ของพื้นผิวเลือกความถี่ในหัวข้อที่ผ่านมา ขนาดและพารามิเตอร์ของสายอากาศที่น่าสนใจแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ขนาดและพารามิเตอร์ของสายอากาศที่น่าสนใจ

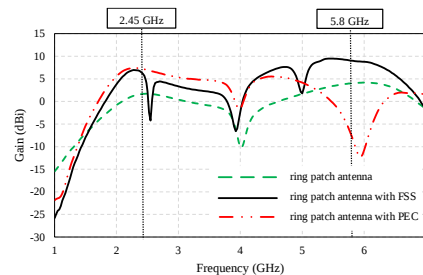
พารามิเตอร์ (Parameter)	ขนาด (Physical Size: mm)	พารามิเตอร์ (Parameter)	ขนาด (Physical Size: mm)
S_x	30	R_g	82
S_y	45	D_z	12
r_1	11.5	L_1	19.9
r_2	10	L_{12}	9.45
r_3	8	L_2	11.5
r_4	7.5	L_{22}	5.125
w_s	3.5	w_1	2.7
L_c	20	w_2	2.5
L_s	16.1	w_g	1.5
L_g	15	g_1	1
R_s	25	g_2	1.25

รูปที่ 17 เป็นการแสดงผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนและอัตราขยายของสายอากาศที่น่าสนใจจากรูปที่ 17 (ก) ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนพิจารณาที่ -10 dB ที่ความถี่ 2.45 GHz มีค่าเท่ากับ -12.06 dB

และที่ความถี่ 5.8 GHz มีค่าเท่ากับ -18.90 dB จากรูปที่ 17 (ข) อัตราขยายที่ความถี่ 2.45 GHz และ 5.8 GHz มีค่าเท่ากับ 5.66 dBi และ 9.02 dBi ตามลำดับ จะสังเกตเห็นว่าความกว้างแถบความถี่ที่ย่านความถี่ 5.8 GHz ของสายอากาศแพตช์วงแหวนที่ทำงานร่วมกับพื้นผิวเลือกความถี่มีแถบความถี่ที่กว้างกว่าสายอากาศแพตช์วงแหวนแบบตัวเดี่ยวและสายอากาศแพตช์วงแหวนที่ทำงานร่วมกับแผ่นโลหะสะท้อน ถึงแม้ว่าอัตราขยายที่ความถี่ 2.45 GHz ของสายอากาศแพตช์วงแหวนที่ทำงานร่วมกับแผ่นพื้นผิวเลือกความถี่จะมีอัตราขยายที่ต่ำกว่าสายอากาศแพตช์วงแหวนที่ทำงานร่วมกับแผ่นโลหะสะท้อน แต่ถึงอย่างไรอัตราขยายที่ความถี่ 5.8 GHz ก็ยังคงมีอัตราขยายที่สูงกว่าสายอากาศทั้งสอง



(ก) ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน

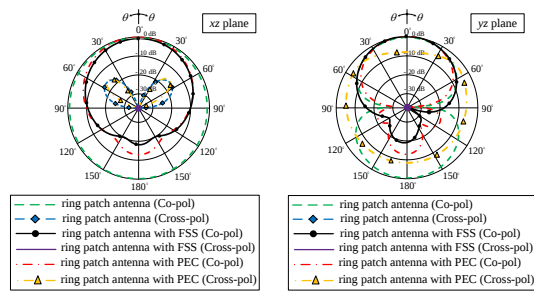


(ข) อัตราขยาย

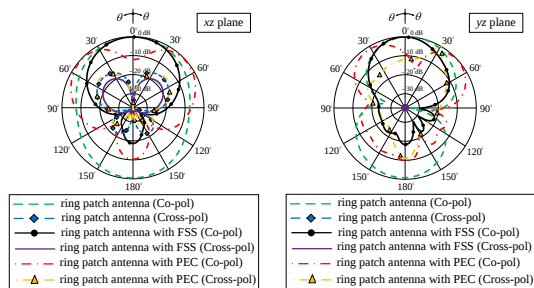
รูปที่ 17 ผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน

และอัตราขยายของสายอากาศที่น่าสนใจ

รูปที่ 18 เป็นการแสดงผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบนอร์มัลไลซ์ของสายอากาศที่น่าสนใจในระนาบ xz และ yz ที่ความถี่ 2.45 GHz และ 5.8 GHz จากผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่น่าสนใจเป็นแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นทิศทางเดียว (Unidirectional pattern) ซึ่งอัตราส่วนลำคลื่นด้านหน้าต่อลำคลื่นด้านหลัง ที่ความถี่ 2.45 GHz และ 5.8 GHz มีค่าเท่ากับ 20.18 dB และ 20.42 dB ตามลำดับโดยมีกำลังงานของคลื่นสูงสุดในทิศทาง 0°



(ก) ความถี่ 2.45 GHz



(ข) ความถี่ 5.8 GHz

รูปที่ 18 ผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น
แบบนอร์มัลไลซ์ของสายอากาศที่นำเสนอ

4. สรุป

บทความนี้นำเสนอการออกแบบพื้นผิววงรีวิศุโดยใช้ตัวสะท้อนคลื่นหุ้ดแถบความถี่ที่ขึ้นอยู่กัพื้นผิวเลือกความถี่สำหรับการประยุกต์ใช้งานร่วมกับสายอากาศแพตช์วงแหวนเพื่อปรับปรุงอัตราขยายที่รองรับการใช้งานในย่านความถี่ ISM โดยย่านความถี่ 2.45 GHz สามารถครอบคลุมได้ตั้งแต่ความถี่ 2.24 GHz ถึง 2.55 GHz และที่ย่านความถี่ 5.8 GHz ครอบคลุมตั้งแต่ความถี่ 5.11 GHz ถึง 6.41 GHz จากผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนเมื่อพิจารณาที่ -10 dB ที่ย่านความถี่ 2.45 GHz มีค่าเท่ากับ -12.06 dB และที่ย่านความถี่ 5.8 GHz มีค่าเท่ากับ -18.90 dB โดยอัตราขยายของความถี่ 2.45 GHz และ 5.8 GHz มีค่าเท่ากับ 5.66 dBi และ 9.02 dBi ตามลำดับ ซึ่งอัตราส่วนกลับคลื่นด้านหน้าต่อคลื่นด้านหลังมีค่าเท่ากับ 20.18 dB และ 20.42 dB ตามลำดับโดยมีกำลังงานของคลื่นสูงสุดในทิศทาง 0°

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] C.A. Balanis, Antenna Theory Analysis and Design, John Wiley and Sons, U.S.A., New York, 2005.
- [2] B. Yildirim and B. A. Cetiner, "Enhanced Gain Patch Antenna With a Rectangular Loop Shaped Parasitic

Radiator," IEEE Antennas and Wireless propagation letters, Vol. 7, pp.229-232, March 2008.

- [3] S.G. Zhou and J.Y. Li, "Low-Profile and Wideband Antenna," IEEE Antennas and Wireless propagation letters, Vol. 10., No. 3, pp.373-376, April 2011.
- [4] R. S. Anwar, L. Mao and H. Ning, "Frequency Selective Surfaces: A Review," Applied Sciences, Vol. 8, No. 9, pp.1-46, September 2018.
- [5] N. Supreeratitukul, S. Jantori, P. Boontamchau and U. Torteanchai, "Design of Circular Monopole Antenna using a Ground Plane Modifications for LTE and UWB Applications," International Conference on Information, Communication and Networks, China, pp. 6-10, 2019.
- [6] M. Raspopoulos and S. Stavrou, "Frequency Selective Buildings Through Frequency Selective Surfaces," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 59, No. 8, pp. 2998-3005, August 2011.
- [7] J. T. Murugan, T. R. S. Kumar, P. Salill and C. Venkatesh, "Dual Frequency Selective Transparent Front Doors for Microwave Oven with Different Opening Areas," Progress In Electromagnetics Research Letters, Vol. 52, pp.11-16, February 2015.
- [8] M. Ameen, S. Kalraiya and R. K. Chaudhary, "Coplanar Waveguide-fed Electrically Small Dual-Polarized Short-ended Zeroth-Order Resonating Antenna Using Ω -Shaped Capacitor and Single-Split Ring Resonator for GPS/WiMAX/WLAN/C-band applications," International Journal of RF and Microwave Computer- Aided Engineering, Vol. 29, No. 12, pp.1-15, August 2019
- [9] C. Ratnaratorn, C. Mahatthanajaturapat and P. Akkaraekthalin, "Gain Enhancement for Multiband Antenna with Frequency Selective Fractal Surface Reflector," Asia-Pacific Microwave Conference, Japan, pp.714-716, 2014.

การศึกษาปัจจัยในการคัดเลือกถนนขององค์กรปกครอง ส่วนท้องถิ่นที่เชื่อมระหว่างจังหวัด

Identifying the Factors to Determine Inter-provincial Local Roads

ณัฐวุฒิ เสียงแจ้ว^{1,*} วีระเกษม สวนพกา¹ และ เหมือนมาศ วิเชียรสินธุ์¹

¹ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Nattawut Seangjaew^{1,*} Weerakaset Suanpaga¹ and Muanmas Wichiensin¹

¹Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University

*Corresponding Author E-mail : nattawut.best@hotmail.com

Received: May 28, 2021 Revised: June 25, 2021 Accepted: June 26, 2021

บทคัดย่อ

ถนนที่อยู่ในความรับผิดชอบของหน่วยงานองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นส่วนใหญ่มักไม่ได้รับการซ่อมบำรุงอย่างทั่วถึงเนื่องจากขาดงบประมาณในการซ่อมบำรุง ขณะเดียวกันองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นยังได้รับการช่วยเหลือทางวิชาการด้านงานทางจากกรมทางหลวงชนบท ทั้งนี้ กรมทางหลวงชนบทเป็นหน่วยงานที่ได้รับมอบหมายภารกิจในการพัฒนาโครงข่ายสายรองที่สำคัญและให้มีโครงสร้างสมบูรณ์ เชื่อมโยงกับทางหลวงพิเศษ หรือทางหลวงแผ่นดิน หรือทางหลวงสัมปทาน หรือทางหลวงชนบท หรือทางหลวงท้องถิ่น และเชื่อมโยงระหว่างภูมิภาคสู่จังหวัดหรือจังหวัดสู่จังหวัด ซึ่งสามารถตีความได้ว่าถนนขององค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นที่มีลักษณะเป็นโครงข่ายดังกล่าวสามารถได้รับการพัฒนาโดยหน่วยงานส่วนกลางได้ อย่างไรก็ตามกรมทางหลวงชนบทมีงบประมาณที่จำกัด จึงไม่สามารถเข้าไปพัฒนา ก่อสร้าง และซ่อมบำรุงได้ทุกสายทาง ผู้วิจัยจึงทำการศึกษาโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหาปัจจัยในการคัดเลือกถนนขององค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นที่เชื่อมระหว่างจังหวัด เพื่อนำทางหลวงท้องถิ่นไปพัฒนาต่อขยายให้เป็นโครงข่ายสายรองที่สำคัญ โดยการประยุกต์ใช้วิธีการบวนการวิเคราะห์ตามลำดับชั้น (Analytic Hierarchy Process : AHP) ในการวิเคราะห์หาค่าถ่วงน้ำหนัก โดยการศึกษาได้ประเมินค่าถ่วงน้ำหนักผ่านการสัมภาษณ์ผู้เชี่ยวชาญจากกรมทางหลวงชนบท จำนวน 10 ตัวอย่าง จากผลการวิเคราะห์พบว่าค่าถ่วงน้ำหนักของปัจจัยหลัก 3 ด้าน ได้แก่ ปัจจัยด้านวิศวกรรม ปัจจัยด้านเศรษฐกิจและปัจจัยด้านสังคม มีค่าเท่ากับร้อยละ 28.04, 35.66 และ 36.30 ตามลำดับ สำหรับปัจจัยรองที่อยู่ภายใต้ปัจจัยหลักด้านวิศวกรรม ได้แก่ 1.1) ปริมาณจราจร 1.2) ความเหมาะสมของขนาดถนนกับปริมาณจราจรที่เพิ่มขึ้น 1.3) การเชื่อมต่อระหว่างถนนสายหลัก 1.4) ระยะทางตลอดสายทาง มีค่าเท่ากับร้อยละ 6.40, 7.12, 11.94 และ 2.58 ตามลำดับ ปัจจัยรองที่อยู่ภายใต้ปัจจัยหลักด้านเศรษฐกิจ ได้แก่ 2.1) ถนนสามารถเข้าถึงแหล่งสถานที่ท่องเที่ยว 2.2) ถนนสามารถเข้าถึงแหล่งพื้นที่เกษตรกรรม 2.3) ถนนสามารถเข้าถึงแหล่งโรงงานอุตสาหกรรม 2.4) ถนนสามารถเชื่อมโยกับคมนาคมระบบอื่นๆ มีค่าเท่ากับร้อยละ 9.55, 5.91, 8.22 และ 11.97 ตามลำดับ และปัจจัยรองที่อยู่ภายใต้ปัจจัยหลักด้านสังคม ได้แก่ 3.1) การเข้าถึงพื้นที่ชุมชน 3.2) ครุภัณฑ์ที่ได้รับผลประโยชน์ 2 ข้างทาง 3.3) การเข้าถึงการบริการขั้นพื้นฐานของรัฐ(โรงพยาบาล โรงเรียน สถานที่ราชการ และวัด) มีค่าเท่ากับร้อยละ 13.30, 8.04 และ 14.96 ตามลำดับ ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการจัดลำดับความสำคัญในการคัดเลือกสายทางขององค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นที่เชื่อมระหว่างจังหวัด

คำสำคัญ: การวิเคราะห์ตามลำดับชั้น โครงข่ายสายรอง ทางหลวงชนบท ทางหลวงท้องถิ่น

Abstract

Roads belong to the Local Government Organizations (LGOs) are usually inadequately maintained due to their owners' lack of funding. Meanwhile, the Department of Rural Roads (DRR) can offer its technical assistant in roadwork-related issues. DRR is a central road authority that has a mission to develop the secondary road network. Their roads connect special roads, national roads, concession roads, rural roads, and local roads that connect regions and provinces. It can be interpreted that DRR could develop important LGO roads that are operated according to these criteria. However, DRR has a limited fiscal budget which makes it impossible to fund all those potentially important LGO roads. Hence, this study aims to establish the key indicators that can be used to identify and prioritize the inter-provincial LGO roads to be developed by DRR. Analytic Hierarchy Process (AHP) is employed for the identification of the weightings. The sources of information used to determine weightings are based on interviews with 10 experts within the DRR. The results of the analysis revealed that the weights of the three main factors were engineering factors, economic factors and social factors. The values were 28.04, 35.66 and 36.30, respectively. The secondary factors that were under the main engineering factors were 1.1) traffic volume, 1.2) The suitability of the road size and the increased traffic volume, 1.3) Connection between main roads, 1.4) distance along the way. The values are equal to 6.40, 7.12, 11.94 and 2.58, respectively. Secondary factors under the main economic factors are 2.1) Road access to tourist attractions, 2.2) Road access to agricultural areas, 2.3) Roads can access industrial factories, 2.4) Roads can be linked to other transport systems. The values were 9.55%, 5.91, 8.22 and 11.97, respectively, and the secondary factors under the main social factors were 3.1) access to community areas, 3.2) Households receiving both sides of the benefit, 3.3) Access to basic public services (hospitals, schools, government offices and temples) were 13.30%, 8.04 and 14.96%, respectively, which could be used to determine the LGO road priorities to become an important provincial network.

Keywords: AHP, Secondary road network, Rural road, Local road

1. บทนำ

กรมทางหลวงชนบท (Department of Rural Roads) สังกัดกระทรวงคมนาคม มีภารกิจหลักในการเชื่อมโยงเครือข่ายถนนระหว่างทางหลวงแผ่นดิน ทางหลวงท้องถิ่น ท่าอากาศยาน สถานีรถไฟ ท่าเรือ สถานีรถโดยสาร เขตเศรษฐกิจพิเศษ และโครงการพระราชดำริเข้าด้วยกัน โดยมีเป้าหมายเพื่อพัฒนาและยกระดับมาตรฐานทางหลวงชนบท เพื่อเชื่อมโยงการคมนาคมขนส่งในด้านต่างๆ อาทิ การสัญจร การท่องเที่ยว การพัฒนาเมือง การพัฒนาด้านเขตเศรษฐกิจพิเศษ การแก้ไขปัญหาจราจร ด้วย

การสร้างทางต่อเชื่อม (Missing Link) ทางเลี้ยว (By Pass) และทางลัด (Shortcut)

พระราชบัญญัติทางหลวง พ.ศ. 2535 และแก้ไขเพิ่มเติมปี พ.ศ. 2549 มาตรา 26 และกฎกระทรวงการแบ่งส่วนราชการ กรมทางหลวงชนบท กระทรวงคมนาคม พ.ศ. 2558 ได้ให้อำนาจหน้าที่ กรมทางหลวงชนบท ในส่วนที่เกี่ยวกับทางหลวงชนบทและทางหลวงท้องถิ่น ในการกำหนดมาตรฐานและลักษณะของทางหลวง และงานทาง รวมทั้งกำหนดเขตทางหลวง ที่จอดรถ ระยะแนวคันไม้และเสาพาดสาย ตลอดจนกำกับตรวจสอบ ควบคุมทางวิชาการ

อบรมเจ้าหน้าที่ฝ่ายช่าง และจัดทำคู่มือ ให้คำปรึกษา แนะนำเกี่ยวกับงานทาง ส่งเสริมสนับสนุนด้านวิชาการงาน ทางให้แก่อปท. อีกทั้งแผนการกระจายอำนาจให้แก่องค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น ยังกำหนดให้ส่วนราชการถ่ายโอน ถนนให้แก่อปท. และให้กรมทางหลวงชนบทมีภารกิจในการเสริมสร้างความเข้มแข็งให้อปท. สามารถดำเนินการก่อสร้างและบำรุงรักษาทางได้ตามมาตรฐาน เทคนิค วิชาการ และให้มีหน้าที่จัดทำแผนพัฒนาทางหลวงท้องถิ่นที่ถ่ายโอนไป รวมถึงติดตามและประเมินผลการดำเนินการภายหลังการถ่ายโอนด้วย

ซึ่งในปัจจุบันถนนที่อยู่ในความรับผิดชอบของหน่วยงานองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นส่วนใหญ่มักไม่ได้รับการซ่อมบำรุงอย่างทั่วถึงเนื่องจากขาดงบประมาณในการซ่อมบำรุง ทั้งนี้ตามที่วางแผนปฏิบัติการกำหนดขั้นตอนการกระจายอำนาจให้องค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นฉบับที่ 3 กำหนดขอบเขตความรับผิดชอบของราชการส่วนกลางและส่วนภูมิภาค โดยในส่วนที่เกี่ยวข้องกับกรมทางหลวงชนบท ได้กำหนดให้กรมทางหลวงชนบท “พัฒนาดำเนินการก่อสร้าง บำรุง และบำรุงรักษาทางหลวงชนบท โครงข่ายสายรองที่สำคัญ และให้มีโครงสร้างสมบูรณ์ เชื่อมโยงกับทางหลวงพิเศษ หรือทางหลวงแผ่นดิน หรือทางหลวงสัมปทาน หรือทางหลวงชนบท หรือทางหลวงท้องถิ่น และเชื่อมโยงระหว่างภูมิภาคสู่จังหวัดหรือจังหวัดสู่จังหวัด” และในขอบเขตความรับผิดชอบของราชการส่วนกลาง ส่วนภูมิภาค และส่วนท้องถิ่นดำเนินการร่วมกัน ได้ระบุไว้ว่า “หากส่วนราชการต้องการทางหลวงท้องถิ่น เพื่อพัฒนาและก่อสร้างทางที่เชื่อมระหว่างจังหวัด หรือระหว่างภาค หรือระหว่างประเทศ ให้อปท. ถ่ายโอนให้เพื่อประโยชน์ส่วนรวม” เพื่อเป็นการเตรียมความพร้อมรองรับอำนาจหน้าที่ตามขอบเขตความรับผิดชอบของวางแผนปฏิบัติการฯ

ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะใช้ปัจจัยข้อมูลทางด้านต่างๆ ทั้งปัจจัยเดิมที่มีอยู่และปัจจัยเพิ่มเติม โดยประยุกต์ใช้วิธีกระบวนการวิเคราะห์ตามลำดับชั้น (Analytic Hierarchy Process : AHP) ซึ่งเป็นวิธีที่สามารถวิเคราะห์ถึงปัจจัยต่างๆ ที่มีอิทธิพลสำคัญต่อการคัดเลือกถนนขององค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นที่เชื่อมระหว่างจังหวัดและค่าถ่วงน้ำหนักของแต่ละปัจจัย นำมาประเมินเป็นค่าระดับคะแนนของแต่ละ

สายทาง เพื่อใช้ในการคัดเลือกสายทางที่มีความเหมาะสมสำหรับการพัฒนาเป็นโครงข่ายถนนของกรมทางหลวงชนบทและเพื่อนำทางหลวงท้องถิ่นไปพัฒนาต่อขยายให้เป็นโครงข่ายสายรองที่สำคัญ

2. วิธีการศึกษา

ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาและวิเคราะห์เพื่อหาน้ำหนักของปัจจัยในการคัดเลือกถนนขององค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นที่เชื่อมระหว่างจังหวัด โดยที่จะประยุกต์ใช้วิธีกระบวนการวิเคราะห์ตามลำดับชั้น (Analytic Hierarchy Process : AHP) ซึ่งมีขั้นตอนในการดำเนินการวิจัย ดังนี้

2.1 การรวบรวมปัจจัยที่ใช้ในการเลือกเป็นเกณฑ์จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาปัจจัยในการคัดเลือกถนนขององค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นที่เชื่อมระหว่างจังหวัด เป็นการศึกษาเกี่ยวกับปัจจัยต่างๆ ที่มีความเกี่ยวข้องกับการพัฒนาโครงข่ายของกรมทางหลวงชนบทและการพิจารณาคัดเลือกสายทางโดยเฉพาะกรณีสายทางที่เชื่อมระหว่างจังหวัดจากงานวิจัยต่างๆ

2.2 การคัดเลือกกลุ่มตัวอย่างและผู้เชี่ยวชาญ

ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง คือ บุคลากรที่มีส่วนเกี่ยวข้องในลักษณะงานเฉพาะด้านของกรมทางหลวงชนบท จำนวน 10 คน ซึ่งเป็นผู้เชี่ยวชาญและผู้ปฏิบัติงานที่เกี่ยวข้องกับการพิจารณาประมาณ การพิจารณาเข้ารับการบรรจุเป็นโครงข่ายถนนของกรมทางหลวงชนบท และงานสนับสนุนทางด้านวิชาการให้กับทางองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น โดยมีวิธีการหาค่าน้ำหนักเฉลี่ยของข้อมูลผู้เชี่ยวชาญทั้ง 10 ตัวอย่าง ดังสมการที่ 1

$$\text{Geometric Mean (V}_i\text{)} = (\prod_{i=1}^n x_i)^{\frac{1}{n}} \text{----- (1)}$$

2.3 การเก็บรวบรวมข้อมูล

นำแบบสอบถามไปสัมภาษณ์ผู้เชี่ยวชาญโดยในส่วนของการเปรียบเทียบความสำคัญของเกณฑ์หรือปัจจัยด้านต่างๆ นั้นจะให้ผู้เชี่ยวชาญเปรียบเทียบเกณฑ์หรือปัจจัยทีละคู่ โดยคำอธิบายส่วนตัวเลขในการระบุระดับความสำคัญของเกณฑ์หรือปัจจัยดังแสดงในตารางที่ 1

เครื่องมือที่ใช้ในการเก็บข้อมูลและวิเคราะห์ข้อมูล

เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษา เพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ที่วางไว้ ผู้ทำการศึกษา ได้คัดเลือกโปรแกรมที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลคือ Microsoft Excel ในการวิเคราะห์ข้อมูลจากการตัดสินใจจากข้อมูลที่ได้ จากวิธีการใช้แบบสอบถาม ของกลุ่มผู้เชี่ยวชาญ เพื่อวิเคราะห์ด้วยวิธีกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ (Analytical Hierarchy Process: AHP)

1. กระบวนการวิเคราะห์ตามลำดับชั้น (Analytic Hierarchy Process: AHP) เป็นเทคนิคที่ถูกนำมาใช้ในกระบวนการตัดสินใจ โดยใช้การแบ่งองค์ประกอบปัญหาออกเป็นส่วนๆ ในรูปแบบภูมิลำดับชั้น จากนั้นนำมาให้น้ำหนักของแต่ละองค์ประกอบ แล้วนำมาคำนวณค่าถ่วงน้ำหนัก เพื่อนำไปสู่การจัดลำดับค่าความสำคัญของแต่ละทางเลือก

1.1 การสลายปัญหาที่ซับซ้อน (Decomposition) ดำเนินการให้อยู่ในรูปของแผนภูมิโครงสร้างที่เป็นลำดับชั้น (Hierarchy Structure) แต่ละระดับชั้นประกอบด้วยเกณฑ์การตัดสินใจที่เกี่ยวข้องกับปัญหานั้น ระดับชั้นบนสุดเรียกว่าเป้าหมายโดยรวม ซึ่งมีเพียงปัจจัยเดียวเท่านั้นระดับชั้นที่ 2 อาจมีหลายปัจจัย ขึ้นอยู่กับจำนวนระดับชั้นทั้งหมดของแผนภูมิ ปัจจัยต่างๆ ในระดับชั้นเดียวกันต้องมีความสำคัญเท่ากัน ถ้าระดับชั้นใดมีปัจจัยที่มีความสำคัญแตกต่างกันมากควรแยกปัจจัยที่สำคัญน้อยกว่าให้ลงไปอยู่ระดับชั้นถัดไป

1.2 การหาลำดับความสำคัญ (Prioritization) ดำเนินการโดยเปรียบเทียบความสัมพันธ์ทีละคู่ (Pairwise Comparison) จากปัจจัยที่มีผลกระทบต่อนโยบายการตัดสินใจในแต่ละระดับชั้นด้วยวิธี Principle of Hierarchic Composition ผลการวินิจฉัยจะถูกแสดงออกมาในรูปแบบมาตราส่วนของระดับความสำคัญที่เป็นตัวเลข 1 ถึง 9 (แสดงในตารางที่ 1) โดยแสดงอยู่ในรูปแบบตารางเมตริกซ์ ซึ่งเป็นเครื่องมือที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการเปรียบเทียบในลักษณะเป็นคู่ หรือจับคู่ ซึ่งสามารถตรวจสอบความสอดคล้องกันของการวินิจฉัย และสามารถวิเคราะห์ความอ่อนไหวของลำดับความสำคัญเมื่อการวินิจฉัยเปลี่ยนแปลงไปได้อีกด้วย

ตารางที่ 1 มาตราส่วนในการวินิจฉัยเปรียบเทียบเป็นคู่ๆ

ระดับความสำคัญ	ความหมาย
1	ความสำคัญเท่ากัน (Equally Important)
3	สำคัญกว่าปานกลาง (Moderately More Important)
5	สำคัญกว่าอย่างเด่นชัด (Strongly More Important)
7	สำคัญกว่าอย่างเด่นชัดมาก (Very Strongly More Important)
9	สำคัญกว่าสูงสุด (Extremely More Important)
2, 4, 6, 8	สำคัญที่อยู่ระหว่างแต่ละระดับ (Intermediate Judgment Value)

1.3 การสังเคราะห์ (Synthesis) ดำเนินการโดยพิจารณาลำดับความสำคัญทั้งหมด จากการเปรียบเทียบว่าทางเลือกใดสมควรได้รับเลือก

1.4 การวิเคราะห์ความอ่อนไหวของทางเลือกที่มีต่อปัจจัยในการวินิจฉัย (Sensitive Analysis) จะดำเนินการภายหลังจากเสร็จจากกระบวนการทั้งหมด เป็นการพิจารณาว่าเมื่อข้อมูลมีการเปลี่ยนแปลงทางด้านเกณฑ์การตัดสินใจหรือปัจจัยใดปัจจัยหนึ่ง จะทำให้อันดับความสำคัญของทางเลือกมีการเปลี่ยนแปลงหรือไม่

2.4 สรุปผลปัจจัยในการคัดเลือกถนนขององค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นที่เชื่อมระหว่างจังหวัด

การสรุปผลจากการศึกษาปัจจัยในการคัดเลือกถนนขององค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นที่เชื่อมระหว่างจังหวัด ด้วยวิธีกระบวนการวิเคราะห์ตามลำดับชั้น (Analytic Hierarchy Process : AHP) ได้คำนวณน้ำหนักของปัจจัยหลักและปัจจัยรองที่จะใช้เป็นตัวแปรในการคัดเลือกสายทาง

3. ผลการศึกษาและการวิจารณ์

3.1 ผลการศึกษาหาปัจจัยหลักและปัจจัยรอง

ทำการศึกษาทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และสามารถสรุปปัจจัยที่มีความเกี่ยวข้องกับการพัฒนาโครงข่ายของกรมทางหลวงชนบทและการพิจารณาคัดเลือกสายทางโดยเฉพาะกรณีสายทางที่เชื่อมระหว่างจังหวัด เพื่อนำทางหลวงท้องถิ่นไปพัฒนาต่อยอดให้เป็นโครงข่ายสายรองที่สำคัญจากงานวิจัยต่างๆ ได้ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ปัจจัยที่มีผลต่อการพัฒนาโครงข่ายถนนทางหลวงและทางหลวงชนบทจากงานวิจัยต่างๆ

งานวิจัย	ปัจจัยที่เกี่ยวข้อง
การศึกษาเกณฑ์การคัดเลือกทางหลวงชนบท [1]	1) ปัจจัยด้านวิศวกรรมขนส่งและจราจร 2) ปัจจัยด้านเศรษฐกิจและสังคม
โครงการพัฒนาสายทางเพื่อสนับสนุนการขนส่งสินค้าอย่างหลายรูปแบบในพื้นที่ภาคเหนือตอนล่างและภาคกลางตอนบน [2]	1) กลุ่มปัจจัยโครงข่ายถนน 2) กลุ่มปัจจัยลักษณะถนน 3) กลุ่มปัจจัยความเชื่อมโยงการขนส่ง 4) กลุ่มปัจจัยแหล่งสินค้า 5) กลุ่มปัจจัยปริมาณจราจร
โครงการพัฒนาโครงข่ายการขนส่งสินค้าบนทางหลวงชนบทเพื่อรองรับการขนส่งสินค้าผ่านประตูการค้าชายแดนที่สำคัญในแต่ละภูมิภาค [3]	1) ปัจจัยมูลค่าการค้าบริเวณด้านชายแดน 2) ปัจจัยระยะทางจากด่านชายแดนถึงถนนของกรมทางหลวงชนบท 3) ปัจจัยสินค้าเกษตรกรรมและเกษตรแปรรูปในพื้นที่ที่มีการส่งออกและ/หรือนำเข้าบริเวณด้านชายแดน 4) ปัจจัยความสอดคล้องกับแผนพัฒนาเศรษฐกิจและแผนยุทธศาสตร์หลักของประเทศ 5) ปัจจัยพื้นที่โดยรอบสายทาง 6) ปัจจัยปริมาณรถบรรทุกบนสายทางที่อยู่ในรัศมี 50 กิโลเมตรจากด่านชายแดน 7) ปัจจัยจำนวนสายทางของกรมทางหลวงชนบทที่อยู่ในรัศมี 50 กิโลเมตรจากด่านชายแดน
การพิจารณาคัดเลือกแนวเส้นทางโครงการทางหลวงพิเศษระหว่างเมือง สายนครปฐม-ชะอำ [4]	1) ปัจจัยด้านวิศวกรรมและจราจร 2) ปัจจัยด้านเศรษฐกิจและการลงทุน 3) ปัจจัยด้านผลกระทบสิ่งแวดล้อม

ตารางที่ 2 ปัจจัยที่มีผลต่อการพัฒนาโครงข่ายถนนทางหลวงและทางหลวงชนบทจากงานวิจัยต่างๆ (ต่อ)

งานวิจัย	ปัจจัยที่เกี่ยวข้อง
การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการคัดเลือกสายทางในจังหวัดอุดรธานีเพื่อสนับสนุนการขนส่งสินค้า โดยรถไฟทางคู่ [5]	1) ปัจจัยด้านวิศวกรรมศาสตร์ 2) ปัจจัยด้านเศรษฐศาสตร์
โครงการจัดทำแผนการพัฒนาระบบโครงข่ายสายรอง (Feeder) เชื่อมโยงการขนส่งและโลจิสติกส์ [6]	1) ปัจจัยด้านการเชื่อมต่อและการเข้าถึง ได้แก่ ความสามารถในการเข้าถึงสถานที่สำคัญต่างๆ ในบริเวณใกล้เคียง เช่น สนามบิน สถานีรถไฟ สถานีขนส่ง ท่าเรือ แหล่งท่องเที่ยว ย่านกองเก็บตู้สินค้า (ICD) ฯลฯ เป็นต้น 2) ปัจจัยด้านปริมาณจราจรที่รองรับ ได้แก่ ข้อมูลปริมาณจราจรเฉลี่ยต่อวันตลอดทั้งปี (AADT) 3) ปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อม ให้คะแนนโดยลดทอนความสำคัญของสายทางที่ผ่านพื้นที่เขตป่าสงวนและแหล่งชุ่มน้ำ 4) ปัจจัยด้านวิศวกรรม ให้คะแนนโดยลดทอนความสำคัญ of สายทางต่อความยากในการก่อสร้าง เช่น จำนวนคลองหรือลำน้ำที่สายทางนั้นผ่าน การตรวจสอบความชันของสายทางจากเส้นชั้นความสูง ฯลฯ เป็นต้น 5) ปัจจัยด้านค่าใช้จ่ายในการดำเนินโครงการ ได้แก่ ค่าประมาณการมูลค่าในการดำเนินโครงการ
การศึกษาปัจจัยที่ใช้ในการจัดสรรงบประมาณแผ่นดินโครงการยกระดับมาตรฐานทางกรมทางหลวงชนบท [7]	1) ปัจจัยด้านวิศวกรรมศาสตร์ 2) ปัจจัยด้านเศรษฐกิจ 3) ปัจจัยด้านสังคม

ตารางที่ 2 ปัจจัยที่มีผลต่อการพัฒนาโครงข่ายถนนทางหลวงและทางหลวงชนบทจากงานวิจัยต่างๆ (ต่อ)

งานวิจัย	ปัจจัยที่เกี่ยวข้อง
การวางแผนและการจัดลำดับความสำคัญของถนนทางหลวงชนบทในประเทศไทย บังกลาเทศ [8]	1) ปัจจัยด้านเศรษฐศาสตร์ 2) ปัจจัยด้านสังคม 3) ปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อม
โครงการศึกษาโครงข่ายการขนส่งสินค้าของรถบรรทุกเพื่อพัฒนารูปแบบการปรับโครงสร้างและการซ่อมบำรุงถนนของกรมทางหลวงชนบท [9]	1) ปัจจัยด้านปริมาณรถบรรทุก 2) ปัจจัยด้านการเชื่อมต่อกับทางหลวงอาเซียน (AH) 3) ปัจจัยด้านการเป็นแหล่งอุตสาหกรรม 4) ปัจจัยด้านการเป็นแหล่งเกษตรกรรม

จากการพิจารณาปัจจัยต่างๆ ที่ได้แสดงในตารางที่ 2 สามารถแบ่งปัจจัยที่มีความเกี่ยวข้องกับการพัฒนาโครงข่ายของกรมทางหลวงชนบทและการพิจารณาคัดเลือกสายทางโดยเฉพาะกรณีสายทางที่เชื่อมระหว่างจังหวัด ได้เป็น 2 กลุ่ม ดังต่อไปนี้

กลุ่มที่ 1 ได้แก่ ปัจจัยด้านวิศวกรรมขนส่งและจราจร ปัจจัยโครงข่ายถนน ปัจจัยลักษณะถนนปัจจัยปริมาณจราจร ปัจจัยปริมาณรถบรรทุกบนสายทาง ปัจจัยจำนวนสายทางของกรมทางหลวงชนบท และปัจจัยด้านการเชื่อมต่อและการเข้าถึงสถานที่สำคัญต่างๆ ในบริเวณใกล้เคียง

กลุ่มที่ 2 ได้แก่ ปัจจัยด้านเศรษฐกิจและสังคม ปัจจัยความเชื่อมโยงการขนส่ง ปัจจัยแหล่งสินค้า ปัจจัยสินค้าเกษตรกรรมและเกษตรแปรรูปในพื้นที่ที่มีการส่งออกและ/หรือนำเข้า ปัจจัยความสอดคล้องกับแผนพัฒนาเศรษฐกิจและแผนยุทธศาสตร์หลักของประเทศ ปัจจัยที่พื้นที่สองข้างทางอยู่ในรัศมีของแหล่งสินค้าอุตสาหกรรมที่สำคัญ ปัจจัยด้านเขตที่ตั้งนิคมอุตสาหกรรม ปัจจัยด้านการเชื่อมต่อกับทางหลวงอาเซียน (AH) ปัจจัยด้านการเป็นแหล่งอุตสาหกรรม และปัจจัยด้านการเป็นแหล่งเกษตรกรรม

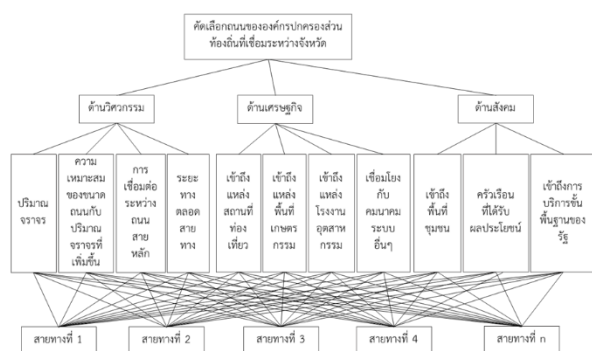
เมื่อพิจารณาปัจจัยในกลุ่มที่ 1 พบว่า เป็นปัจจัยที่มีความเกี่ยวข้องทางด้านวิศวกรรมเป็นหลักจึงพิจารณาให้ปัจจัยด้านวิศวกรรมเป็นปัจจัยหลักในกลุ่มนี้ และพิจารณาปัจจัยย่อย ได้แก่ ปัจจัยปริมาณรถบรรทุกบนสายทาง ปัจจัยการเชื่อมต่อระหว่างถนนกับสถานที่สำคัญ และปัจจัยลักษณะถนน และเมื่อพิจารณาปัจจัยในกลุ่มที่ 2 พบว่า เป็น

ปัจจัยที่มีความเกี่ยวข้องกับด้านเศรษฐกิจและด้านสังคมเป็นหลัก จึงพิจารณาให้แบ่งออกเป็นปัจจัยหลัก 2 ปัจจัย คือ ด้านเศรษฐกิจ และด้านสังคม เป็นปัจจัยหลักในกลุ่มนี้ และพิจารณาปัจจัยย่อย ได้แก่ ปัจจัยความสอดคล้องกับนโยบายขนส่งสินค้าด้านโลจิสติกส์ ปัจจัยการเข้าถึงเข้าถึงแหล่งผลิตด้านอุตสาหกรรม ปัจจัยการเข้าถึงเข้าถึงแหล่งผลิตด้านอุตสาหกรรม และปัจจัยการเข้าถึงแหล่งแปรรูปทางเกษตรกรรม

สามารถสรุปปัจจัยหลัก และปัจจัยรอง (ปัจจัยย่อย) ที่มีความเกี่ยวข้องกับการพัฒนาโครงข่ายของกรมทางหลวงชนบทและการพิจารณาคัดเลือกสายทาง โดยเฉพาะกรณีสายทางที่เชื่อมระหว่างจังหวัด ซึ่งสามารถนำไปใช้คัดเลือกถนนขององค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นที่เชื่อมระหว่างจังหวัด ดังแสดงในตารางที่ 3 และโครงสร้างการวิเคราะห์หาน้ำหนักการพิจารณาคัดเลือกถนนขององค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นที่เชื่อมระหว่างจังหวัด ด้วยวิธีการบวการวิเคราะห์แบบลำดับชั้นแสดงดังรูปที่ 1

ตารางที่ 3 ปัจจัยหลักและปัจจัยรองที่มีผลต่อการคัดเลือถนนขององค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นที่เชื่อมระหว่างจังหวัด

ปัจจัยหลัก	ปัจจัยรอง (ปัจจัยย่อย)
1.ด้านวิศวกรรม	1.1 ปริมาณจราจร 1.2 ความเหมาะสมของขนาดถนนกับปริมาณจราจรที่เพิ่มขึ้น 1.3 การเชื่อมต่อระหว่างถนนสายหลัก 1.4 ระยะทางตลอดสายทาง
2. ด้านเศรษฐกิจ	2.1 ถนนสามารถเข้าถึงแหล่งสถานที่ท่องเที่ยว 2.2 ถนนสามารถเข้าถึงแหล่งพื้นที่เกษตรกรรม 2.3 ถนนสามารถเข้าถึงแหล่งโรงงานอุตสาหกรรม 2.4 ถนนสามารถเชื่อมโยงกับคมนาคมระบบอื่นๆ
3. ด้านสังคม	3.1 การเข้าถึงพื้นที่ชุมชน 3.2 ครุภัณฑ์ที่ได้รับผลประโยชน์ 2 ข้างทาง 3.3 การเข้าถึงการบริการขั้นพื้นฐานของรัฐ (โรงพยาบาล โรงเรียน สถานที่ราชการ และวัด)



รูปที่ 1 โครงสร้างการวิเคราะห์หาค่าน้ำหนักการพิจารณาคัดเลือกถนนขององค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นที่เชื่อมระหว่างจังหวัด ด้วยวิธีกระบวนการวิเคราะห์แบบลำดับชั้น

3.2 ผลการวิเคราะห์ค่าน้ำหนักความสำคัญของแต่ละปัจจัย

ผู้วิจัยได้นำข้อมูลผลการเปรียบเทียบปัจจัยที่ได้จากแบบสอบถามซึ่งวินิจฉัยโดยผู้เชี่ยวชาญเข้าไปเป็นข้อมูลรูปแบบเมตริกซ์ ทำการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อหาเวกเตอร์ลักษณะเฉพาะ (Eigenvector) ของปัจจัยหลักและปัจจัยรอง และตรวจสอบค่าความสอดคล้อง (CR) ของปัจจัยเหล่านั้น ค่าของ Eigenvector ที่คำนวณได้เป็นค่าน้ำหนักความสำคัญของแต่ละปัจจัยค่าเกณฑ์น้ำหนักความสำคัญของแต่ละปัจจัย สามารถนำไปใช้เป็นเกณฑ์คัดเลือกถนนขององค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นที่เชื่อมระหว่างจังหวัด คัดเลือกสายทางเพื่อใช้ในการคัดเลือกสายทางที่มีความเหมาะสมสำหรับการพัฒนาเป็นโครงข่ายถนนของกรมทางหลวงชนบทและเพื่อนำทางหลวงท้องถิ่นไปพัฒนาต่อยอดให้เป็นโครงข่ายสายรองที่สำคัญต่อไป ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 สรุปค่าระดับความสำคัญของปัจจัยเกณฑ์การพิจารณาคัดเลือกถนนขององค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นที่เชื่อมระหว่างจังหวัด

เกณฑ์	ปัจจัย	ค่าระดับความสำคัญ	ค่าถ่วงน้ำหนัก (ร้อยละ)
หลัก	1.ด้านวิศวกรรม	0.280	
รอง	1.1 ปริมาณจราจร	0.228	6.40%
รอง	1.2 ความเหมาะสมของขนาดถนนกับปริมาณจราจรที่เพิ่มขึ้น	0.254	7.12%

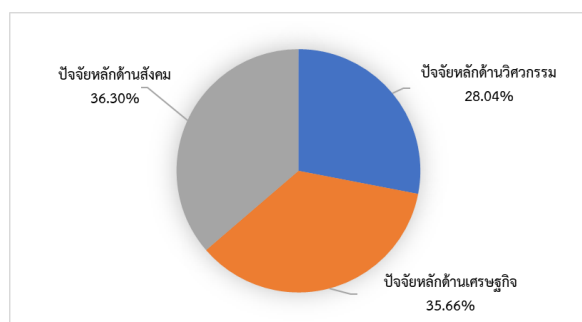
ตารางที่ 4 สรุปค่าระดับความสำคัญของปัจจัยเกณฑ์การพิจารณาคัดเลือกถนนขององค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นที่เชื่อมระหว่างจังหวัด (ต่อ)

เกณฑ์	ปัจจัย	ค่าระดับความสำคัญ	ค่าถ่วงน้ำหนัก (ร้อยละ)
รอง	1.3 การเชื่อมต่อระหว่างถนนสายหลัก	0.426	11.94%
รอง	1.4 ระยะทางตลอดสายทาง	0.092	2.58%
หลัก	2. ด้านเศรษฐกิจ	0.357	
รอง	2.1 ถนนสามารถเข้าถึงแหล่งสถานที่ท่องเที่ยว	0.268	9.55%
รอง	2.2 ถนนสามารถเข้าถึงแหล่งพื้นที่เกษตรกรรม	0.166	5.91%
รอง	2.3 ถนนสามารถเข้าถึงแหล่งโรงงานอุตสาหกรรม	0.231	8.22%
รอง	2.4 ถนนสามารถเชื่อมโยงกับคมนาคมระบบอื่นๆ	0.336	11.97%
หลัก	3. ด้านสังคม	0.363	
รอง	3.1 การเข้าถึงพื้นที่ชุมชน	0.366	13.30%
รอง	3.2 ครัวเรือนที่ได้รับผลประโยชน์ 2 ข้างทาง	0.222	8.04%
รอง	3.3 การเข้าถึงการบริการขั้นพื้นฐานของรัฐ (โรงพยาบาล โรงเรียน สถานที่ราชการ และวัด)	0.412	14.96%
รวม			100.00%

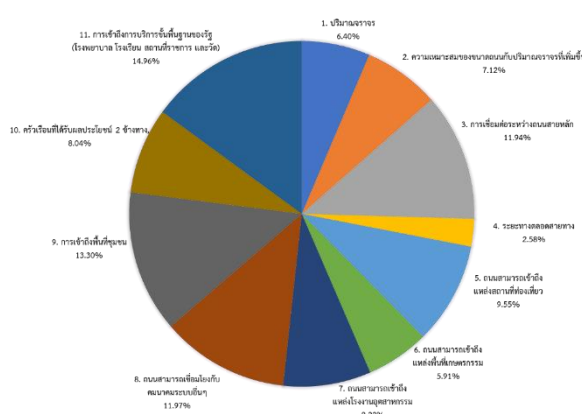
หมายเหตุ ค่าถ่วงน้ำหนัก (ร้อยละ) = [ค่าระดับความสำคัญเกณฑ์หลัก x ค่าระดับความสำคัญเกณฑ์รอง]

4. สรุป

ผลจากการศึกษาปัจจัยในการคัดเลือกลักษณะขององค์ประกอบส่วนท้องถิ่นที่เชื่อมระหว่างจังหวัด ด้วยวิธีการวิเคราะห์ตามลำดับชั้น (Analytic Hierarchy Process : AHP) ได้ค่าถ่วงน้ำหนักของปัจจัยหลักและปัจจัยรองที่จะใช้เป็นตัวแปรในการคัดเลือกลักษณะทาง ผลสรุปจะแสดงในรูปของสัดส่วนร้อยละปัจจัยหลักแสดงดังรูปที่ 2 และปัจจัยรองแสดงดังรูปที่ 3



รูปที่ 2 ค่าความถ่วงน้ำหนักของปัจจัยหลัก



รูปที่ 3 ค่าความถ่วงน้ำหนักของปัจจัยรอง

งานวิจัยนี้ทำให้ได้แนวทางการกำหนดปัจจัยและค่าถ่วงน้ำหนักในการคำนวณคะแนนเพื่อจัดลำดับความสำคัญสายทาง ผลสรุปที่ได้จากการศึกษาค่าถ่วงน้ำหนักจากรูปที่ 2 พบว่าปัจจัยหลักด้านสังคมมีค่ามากที่สุดเท่ากับร้อยละ 36.30 รองลงมาเป็นปัจจัยด้านเศรษฐกิจ มีค่าเท่ากับร้อยละ 35.66 และปัจจัยด้านวิศวกรรม มีค่าเท่ากับร้อยละ 28.04 ซึ่งจะเห็นว่าผู้เชี่ยวชาญให้ความสำคัญของปัจจัยด้านสังคมและปัจจัยด้านเศรษฐกิจใกล้เคียงกัน แต่จะให้ความสำคัญกับปัจจัยด้านวิศวกรรมน้อยสุด สำหรับปัจจัยรองที่อยู่ภายใต้ปัจจัยหลักด้านวิศวกรรมมากที่สุด คือ

การเชื่อมต่อระหว่างถนนสายหลัก มีค่าเท่ากับร้อยละ 11.94 ปัจจัยรองที่อยู่ภายใต้ปัจจัยหลักด้านเศรษฐกิจมากที่สุด คือ ถนนสามารถเชื่อมโยงกับคมนาคมระบบอื่นๆ มีค่าเท่ากับร้อยละ 11.97 และปัจจัยรองที่อยู่ภายใต้ปัจจัยหลักด้านสังคมมากที่สุด คือ การเข้าถึงการบริการขั้นพื้นฐานของรัฐ (โรงพยาบาล โรงเรียน สถานที่ราชการ และวัด) มีค่าเท่ากับร้อยละ 14.96 เมื่อพิจารณาปัจจัยรองที่อยู่ภายใต้ปัจจัยหลักด้านสังคมในเรื่องการเข้าถึงพื้นที่ชุมชนและการเข้าถึงการบริการขั้นพื้นฐานของรัฐ (โรงพยาบาล โรงเรียน สถานที่ราชการ และวัด) พบว่าค่าถ่วงน้ำหนักรวมคิดเป็นร้อยละ 28.26 คิดเป็นคะแนนมากกว่า 1 ใน 4 ของปัจจัยทั้งหมด จะเห็นได้ว่าผู้เชี่ยวชาญให้ความสำคัญกับปัจจัยดังกล่าว ซึ่งเป็นปัจจัยมีความสอดคล้องกับแผนยุทธศาสตร์กระทรวงคมนาคม ด้านที่ 1 คือ การพัฒนาระบบขนส่งขั้นพื้นฐานให้เชื่อมโยงอย่างทั่วถึง และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม และสอดคล้องกับยุทธศาสตร์กรมทางหลวงชนบท ด้านที่ 1 คือ พัฒนาโครงข่ายชนบทเข้าสู่พื้นที่ต่างๆ อย่างทั่วถึงและใช้งานอย่างปลอดภัย พร้อมทั้งส่งเสริม และสนับสนุนการพัฒนาทางหลวงท้องถิ่น (Stability) อย่างไรก็ดีตามปัจจัยรองในทุกปัจจัยมีความสำคัญเช่นกันในการกำหนดเกณฑ์การคัดเลือกลักษณะ เมื่อนำมาประยุกต์ใช้กับถนนขององค์ประกอบส่วนท้องถิ่นที่เชื่อมระหว่างจังหวัด ซึ่งปัจจัยหลักและปัจจัยรองสามารถนำมาใช้ประกอบการพิจารณาคัดเลือกความเหมาะสมของสายทางเพื่อนำทางหลวงท้องถิ่นไปพัฒนาต่อออกให้เป็นโครงข่ายสายรองที่สำคัญ อีกทั้งผลจากการวิจัยนี้สามารถนำไปใช้เป็นเกณฑ์การคัดเลือกลักษณะขององค์ประกอบส่วนท้องถิ่นที่เชื่อมระหว่างจังหวัดในทุกภูมิภาคของประเทศไทยได้

จากที่ได้กล่าวมาในข้างต้น งานวิจัยนี้นอกจากจะสามารถนำไปใช้เป็นเกณฑ์คัดเลือกลักษณะขององค์ประกอบส่วนท้องถิ่นที่เชื่อมระหว่างจังหวัด เพื่อนำทางหลวงท้องถิ่นไปพัฒนาต่อออกให้เป็นโครงข่ายสายรองที่สำคัญ ยังใช้เป็นแนวทางในการศึกษานำมาพัฒนาให้เหมาะสมกับโครงการ หรือนโยบายของรัฐบาล เพื่อให้เกิดความเหมาะสม คุ่มค่า และการพัฒนาอย่างมีประสิทธิภาพต่อไป

5. ข้อเสนอแนะ

การศึกษาปัจจัยที่ใช้ในการคัดเลือกถนนขององค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นที่เชื่อมระหว่างจังหวัด เป็นการศึกษาเพื่อต้องการหาปัจจัยและค่าถ่วงน้ำหนักที่จะใช้เป็นเกณฑ์ในการคัดเลือกและจัดลำดับความสำคัญของสายทาง เป็นการพิจารณาความคิดเห็นค่าน้ำหนักของบุคลากรของกรมทางหลวงชนบทที่มีส่วนเกี่ยวข้องในการพิจารณางบประมาณ การพิจารณาเข้ารับการบรรจุเป็นโครงข่ายถนนของกรมทางหลวงชนบท และงานสนับสนุนทางด้านวิชาการให้กับทางองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น ทำให้เกิดค่าน้ำหนักที่แตกต่างกัน เนื่องจากการเข้าถึงพื้นที่ต่างๆ ทั้งด้านเศรษฐกิจและด้านสังคม มีความแตกต่างกันตามลักษณะของพื้นที่ในแต่ละจังหวัด ดังนั้นเพื่อให้เกิดความสมบูรณ์ของงานวิจัยดังกล่าว ควรมีการแบ่งกลุ่มความคิดเห็นของผู้เชี่ยวชาญและพิจารณาข้อมูลที่มีความแตกต่างกันให้เหมาะสมกับพื้นที่ในแต่ละจังหวัด เพื่อให้เกิดความสอดคล้องของข้อมูลไปในทิศทางเดียวกัน หลังจากนั้นนำมาจัดลำดับความสำคัญของสายทางที่เชื่อมระหว่างจังหวัด

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ในสาขาวิชาวิศวกรรมโครงสร้างพื้นฐานและการบริหารรวมถึงอาจารย์พิเศษทุกท่าน ที่ได้มอบความรู้และเปิดมุมมองใหม่ๆ อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการนำไปประยุกต์ใช้ประโยชน์ต่อหน้าที่การงาน และขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ประจำโครงการปริญญาโทสาขาวิศวกรรมโครงสร้างพื้นฐานและการบริหารทุกท่านที่ได้ให้คำแนะนำต่างๆ และให้ความช่วยเหลือในการประสานงานกับโครงการตลอดระยะเวลาในการศึกษา และขอกราบขอบพระคุณเจ้าหน้าที่กรมทางหลวงชนบททุกท่านที่ให้ความอนุเคราะห์ในการตอบแบบสอบถาม และให้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์สำหรับการศึกษาในครั้งนี้

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] K. Prapananurak and W. Benja-o-ran, "Rural Roads Classification by Using Analytic Hierarchy Process,"

Naresuan University Engineering Journal, Vol.10, No.2, pp.17-28, 2015.

- [2] Department of Rural Roads, Development of rural road network to support multimodal transportation in lower northern and upper central of Thailand, Department of Rural Roads, Bangkok, 2016.
- [3] Department of Rural Roads, Development of rural road network for products transportation in bordering-area of Thailand, Department of Rural Roads, Bangkok, 2015.
- [4] C. Yoydounchai, "A Study Of Factors Affecting The Special Highway Project Between Nakhon Pathom – Cha Amet Route," Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok, 2010.
- [5] C. Rangsarikam, "A Study Of Factors Affecting The Road Selection In Udon Thani To Support Double – Track Transport," Kasem Bundit Engineering Journal, Vol.8, No.2, pp.249-265, 2018.
- [6] Department of Rural Roads, A study of development plan of feeder network system to connect the transportation and logistics, Department of Rural Roads, Bangkok, 2013.
- [7] T. Visessin, A Study of Factor for the Budget Allocation in Construction Project Department of Rural Roads, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok, 2018.
- [8] Department of Urban and Regional Planning, Planning and Prioritization of Rural Roads in Bangladesh, Inception Report, Department of Urban and Regional Planning, Bangladesh, 2016.
- [9] Department of Rural Roads, A Study of network of Freight System to develop the model of reconstruction and maintenance of roads in responsibility of department of rural roads, Department of Rural Roads, Bangkok, 2013.

คำแนะนำในการเตรียมต้นฉบับบทความ

- “บทความทางวิชาการ”** หมายความว่า บทความที่เขียนขึ้นในลักษณะวิเคราะห์ วิจัย หรือเสนอแนวความคิดใหม่ ๆ จากพื้นฐานทางวิชาการที่ได้เรียบเรียงจากผลงานทางวิชาการของตนเอง หรือของผู้อื่น หรือเป็นบทความทางวิชาการที่เขียนขึ้นเพื่อเป็นความรู้ทั่วไปสำหรับประชาชน
- “บทความวิจัย”** หมายความว่า บทความที่มีลักษณะเป็นเอกสารที่มีรูปแบบของการวิจัยตามหลักวิชาการ เช่น มีการตั้งสมมติฐาน หรือมีการกำหนดปัญหาที่ชัดเจนสมเหตุสมผล โดยจะต้องระบุถึงวัตถุประสงค์ที่ชัดเจนแน่นอน มีการค้นคว้าอย่างมีระบบ มีการรวบรวมข้อมูลพิจารณาวิเคราะห์ ตีความ และสรุปผลการวิจัยที่สามารถให้คำตอบบรรลุวัตถุประสงค์ หรือหลักการบางอย่างที่จะนำไปสู่ความก้าวหน้าทางวิชาการ หรือการนำวิชานั้นมาประยุกต์ใช้

1. การเรียงลำดับเนื้อหาบทความ

- 1.1 ชื่อเรื่อง (Title) ภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ควรสั้น กระชับ และสื่อความหมายของเรื่องที่ทำการชัดเจน
- 1.2 ชื่อ-นามสกุลของผู้เขียนใส่ทุกคน เป็นภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ระบุสถานที่ทำงาน สำหรับผู้รับผิดชอบประสานงาน (Corresponding Author)
- 1.3 บทคัดย่อ (Abstract) ภาษาไทยและภาษาอังกฤษ เป็นเนื้อความสรุปสาระสำคัญของเรื่อง วัตถุประสงค์ วิธีการศึกษา ผลการศึกษา และผลสรุป มี 1 ย่อหน้า
- 1.4 คำสำคัญ (Keyword) ภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ให้ใส่คำสำคัญ 3-5 คำ ไว้ท้ายบทคัดย่อแต่ละภาษา
- 1.5 เนื้อหา (Text) บทความวิจัยควรประกอบด้วย
 - บทนำ (Introduction) บอกความสำคัญหรือที่มาของปัญหาที่นำไปสู่การศึกษา วัตถุประสงค์ และอาจรวมวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง (Literature Review)
 - วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย (Materials and Methods) กล่าวถึงรายละเอียด การวิเคราะห์และทดลอง ที่กระชับและชัดเจน
 - ผลการทดลอง (Results) บอกผลที่พบอย่าง

ชัดเจน สมบูรณ์ และมีรายละเอียดครบถ้วน

● อภิปรายผลและสรุป (Discussion and Conclusion) อาจเขียนรวมกับผลการทดลองได้ เป็นการประเมินการตีความและการวิเคราะห์ในแง่มุมต่างๆ ของผลที่ได้ว่าเป็นไปตามวัตถุประสงค์หรือไม่ มีความสอดคล้อง หรือขัดแย้งกับผลงานของผู้อื่นอย่างไร ต้องมีการอ้างหลักการหรือทฤษฎีมาสนับสนุน หรือหักล้างอย่างเป็นเหตุเป็นผล และอาจมีข้อเสนอแนะที่จะนำผลวิจัยไปใช้ประโยชน์

1.6 กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgement) (ถ้ามี) ระบุสั้นๆ ว่าได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยและความช่วยเหลือจากที่ใดบ้าง

1.7 เอกสารอ้างอิง (References) การอ้างอิงในบทความใช้การอ้างอิงแบบตัวเลข เอกสารอ้างอิงท้ายบททุกฉบับ จะต้องมีการอ้างอิงในบทความ และมีการอ้างอิงที่ถูกต้องตามหลักวิชาการ ตามรูปแบบของ IEEE ซึ่งประกอบด้วย ชื่อผู้เขียน ชื่อหนังสือหรือชื่อบทความ ชื่อของเอกสารที่พิมพ์สำนักหรือสถานที่พิมพ์ ฉบับที่ เล่มที่ เลขหน้า และปีที่พิมพ์ ทั้งนี้การเขียนให้เป็นไปตามรูปแบบของชนิดเอกสารที่อ้างอิง ดังรูปแบบดังนี้

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

1.8 ภาคผนวก (ถ้ามี)

1.9 ตารางและรูป ต้องมีความคมชัด และให้แทรกไว้ในบทความ มีคำอธิบายสั้นๆ แต่สื่อความหมายได้สาระครบถ้วนและเข้าใจ กรณีที่เป็นตาราง ให้ระบุลำดับที่ของตาราง ใช้คำว่า "ตารางที่..." และมีคำอธิบายใส่ไว้เหนือตาราง กรณีที่เป็นรูปให้ระบุลำดับที่ของรูปใช้คำว่า "รูปที่..." และมีคำอธิบายใส่ไว้ใต้รูป

2. คำแนะนำในการเขียนและพิมพ์

2.1 คำแนะนำทั่วไป บทความต้องมีความยาวไม่เกิน 8 หน้ากระดาษ A4 พิมพ์ด้วย Microsoft Word หรือซอฟต์แวร์อื่น ที่ขนาดตัวอักษรกำหนดได้ใกล้เคียงกัน การตั้งค่าหน้ากระดาษ

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

การแบ่งส่วน (Section) ควรแบ่งเป็นสองส่วน ส่วนแรก กำหนด (format) เป็นคอลัมน์เดี่ยว และส่วนที่สองกำหนดเป็น 2 คอลัมน์ โดยระยะห่างระหว่างคอลัมน์เป็น 0.26" หรือ 0.7 ซม.

การลำดับหัวข้อของเนื้อเรื่องให้ใช้เลขกำกับบทหน้าเป็นหัวข้อหมายเลข 1 และหากมีหัวข้อย่อยให้ใช้เลขระบบทศนิยมกำกับหัวข้อย่อย และสามารถเว้นโคลนทรายละเอียดได้ที่ <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/lej>

2.2 แบบและขนาดตัวอักษร ใช้ตัวอักษรแบบ **Angsana New** สำหรับบทความภาษาไทย และให้ใช้รูปแบบตัวอักษร **Times New Roman** สำหรับบทความภาษาอังกฤษ

บทความภาษาไทย กำหนดรูปแบบดังนี้

- ขนาดของตัวอักษรให้ใช้ **Angsana New** เท่านั้น
- ชื่อเรื่องทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ
- ขนาด **26 ตัวหนา** (พิมพ์กลางหน้ากระดาษ)
- ชื่อผู้เขียนและผู้ร่วมงาน
- ขนาด **14 ตัวปกติ** (พิมพ์กลางหน้ากระดาษ)
- สถานที่ทำงาน
- ขนาด **12 ตัวปกติ** (พิมพ์กลางหน้ากระดาษ)
- คำว่า "บทคัดย่อ"
- ขนาด **16 ตัวหนา**
- คำสำคัญ (Key Words)
- ให้ใส่คำสำคัญ 3 – 5 คำ ซึ่งเกี่ยวข้องกับบทความที่นำเสนอ โดยให้จัดพิมพ์ใต้บทคัดย่อภาษาอังกฤษ
- ส่วนของเนื้อความในบทคัดย่อ
- ขนาด **14 ตัวปกติ** (พิมพ์แบบเต็มขอบ)
- ส่วนของเนื้อความทั้งหมด
- ขนาด **14 ตัวปกติ** (แบ่งเป็น 2 คอลัมน์)
- คำว่า "Abstract"
- ขนาด **16 ตัวหนา**
- ส่วนของเนื้อความใน Abstract
- ขนาด **16 ตัวปกติ** (พิมพ์แบบเต็มขอบ)
- หัวข้อใหญ่และหมายเลขประจำหัวข้อใหญ่
- ขนาด **16 ตัวหนา** (พิมพ์แบบชิดซ้าย)
- หัวข้อย่อยและหมายเลขประจำหัวข้อย่อย
- ขนาด **14 ตัวหนา**
- คำว่า "กิตติกรรมประกาศ" หรือ "Acknowledgement" ขนาด **16 ตัวหนา** (ใส่หมายเลขลำดับหัวข้อด้วย)
- คำว่า "เอกสารอ้างอิง" หรือ "Reference" ขนาด **16 ตัวหนา** (ใส่หมายเลขลำดับหัวข้อด้วย)
- สมการ หรือพจน์ทางคณิตศาสตร์ที่ซับซ้อน ควรเขียนโดยใช้ Equation Editor โดยจัดแยกบรรทัด และมีเลขกำกับอยู่ในวงเล็บเล็ก

บทความอังกฤษ กำหนดรูปแบบดังนี้

- ขนาดของตัวอักษรให้ใช้ Times New Roman เท่านั้น
- ชื่อเรื่อง
ขนาด 18 ตัวหนา (พิมพ์กลางหน้ากระดาษ)
- ชื่อผู้เขียนและผู้ร่วมงาน
ขนาด 12 ตัวปกติ (พิมพ์กลางหน้ากระดาษ)
- สถานที่ทำงาน
ขนาด 10 ตัวปกติ (พิมพ์กลางหน้ากระดาษ)
- คำว่า “Abstract”
ขนาด 12 ตัวหนา
- คำสำคัญ (Key Words)
ให้ใส่คำสำคัญ 3 – 5 คำ ซึ่งเกี่ยวข้องกับบทความที่นำเสนอ โดยให้จัดพิมพ์ได้บทความด้วยภาษาอังกฤษ
- ส่วนของเนื้อความใน “Abstract”
ขนาด 11 ตัวปกติ (พิมพ์แบบเต็มขอบ)
- ส่วนของเนื้อความทั้งหมด
ขนาด 11 ตัวปกติ (แบ่งเป็น 2 คอลัมน์)
- หัวข้อใหญ่และหมายเลขประจำหัวข้อใหญ่
ขนาด 12 ตัวหนา (พิมพ์แบบชิดซ้าย)
- หัวข้อย่อยและหมายเลขประจำหัวข้อย่อย
ขนาด 11 ตัวหนา
- คำว่า “กิตติกรรมประกาศ” หรือ “Acknowledgement” ขนาด 12 ตัวหนา (ใส่หมายเลขลำดับหัวข้อด้วย)
- คำว่า “เอกสารอ้างอิง” หรือ “Reference” ขนาด 12 ตัวหนา (ใส่หมายเลขลำดับหัวข้อด้วย)
- สมการ หรือพจน์ทางคณิตศาสตร์ที่ซับซ้อนควรเขียนโดยใช้ Equation Editor โดยจัดแยกบรรทัด และมีเลขกำกับอยู่ในวงเล็บเล็ก

3. เกณฑ์การพิจารณาบทความ

มีดังนี้ ความคิดริเริ่มสร้างสรรค์ คุณค่าทางวิชาการ ความสมบูรณ์ของเนื้อหา และโครงสร้าง ภาษาที่ใช้ ความชัดเจนของสมมุติฐาน / วัตถุประสงค์ ความชัดเจนของการนำเสนอ และการจัดระเบียบบทความ ความถูกต้องทางวิชาการ การอภิปรายผล และการอ้างอิงที่ถูกต้องตามหลักวิชาการ

บทความจะต้องได้รับการประเมินโดยผู้ทรงคุณวุฒิในสาขาวิชานั้นๆ อย่างน้อย 2 ท่าน ซึ่งกองบรรณาธิการอาจให้ผู้เขียนปรับปรุงให้เหมาะสมยิ่งขึ้น และสงวนสิทธิ์ในการตัดสินใจตีพิมพ์หรือไม่ก็ได้ และเมื่อบทความได้รับการแก้ไข (หากมี) อย่างเหมาะสม ผู้เขียนต้องส่งต้นฉบับ 1 ชุด โดยส่งเป็นไฟล์งาน .pdf และ .doc เป็น Word 2010

4. วิธีการส่งบทความเพื่อตีพิมพ์ในวารสารลาดกระบัง

บทความที่ส่ง เปิดรับทั้งจากบุคคลภายใน และภายนอกสถาบันฯ โดยบทความนั้น ต้องมีความยาวไม่เกิน 8 หน้า 2 คอลัมน์ ผู้เขียนจะต้องส่งต้นฉบับ 1 ชุด โดยหน้าแรกของบทความจะมีชื่อที่อยู่ของผู้เขียน 1 หน้า และหน้าแรกของบทความที่ไม่ระบุชื่อผู้เขียนอีก 1 หน้า รวมทั้งหมด 9 หน้า และกรุณาระบุชื่อ-นามสกุล ที่อยู่ เบอร์โทรศัพท์ และ E-mail address ใช้ชัดเจนในรูปแบบฟอร์มการส่งบทความด้วย ผู้เขียนสามารถส่งผ่านระบบวารสารออนไลน์ โดยลงทะเบียนและส่งบทความ ได้ที่ ลิงก์ <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/lej/about/submissions> ผู้ประสานงานและสถานที่ติดต่อ: นางสาวชนัญชิตา นอนน้อย งานวิจัยและนวัตกรรม (ส่วนวารสารลาดกระบัง) สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ อาคาร 6 ชั้น (ตึก A) ชั้น 2 เลขที่ 1 ซอยฉลองกรุง 1 แขวงลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520 E-mail : kmitleng.jnl@gmail.com หมายเลขติดต่อ :

โทรศัพท์(เบอร์กลาง) 02-329-8000 ต่อ 3465

โทรศัพท์สายตรง/โทรสาร : 02-327-8317

โทรศัพท์มือถือ 086-106-4414



เลขที่อ้างอิง.....

แบบฟอร์มการส่งบทความ

วันที่ส่ง.....

ชื่อบทความ (ภาษาไทย).....

ชื่อบทความ(ภาษาอังกฤษ).....

ประเภทบทความ ☐ บทความวิชาการ ☐ บทความวิจัย
Keywords (คำสำคัญ).....

ชื่อ - นามสกุล ผู้เขียน (ภาษาไทย) และ (ภาษาอังกฤษ)

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

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

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

จำนวนหน้า.....หน้า

ชื่อและที่อยู่ผู้เขียนที่สามารถติดต่อได้

ชื่อ - นามสกุล.....

ที่อยู่.....

เบอร์โทรศัพท์..... E-mail.....

**ข้าพเจ้าได้แนบบทความที่มีความถูกต้องสมบูรณ์ตามคำแนะนำรูปแบบการเขียนบทความมาพร้อมนี้
และรับรองว่า**

- ☐ ได้รับความเห็นชอบในการส่งบทความครั้งนี้จากผู้ร่วมเขียนบทความแล้ว (ถ้ามี)
- ☐ ข้าพเจ้า และผู้ร่วมเขียนบทความ (ถ้ามี) จะรับผิดชอบเกี่ยวกับลิขสิทธิ์ของต้นฉบับในทุกกรณี
- ☐ ข้าพเจ้าขอรับรองว่าบทความยังไม่เคยตีพิมพ์ หรืออยู่ระหว่างการพิจารณาเพื่อขอรับการตีพิมพ์ในวารสารอื่น

รายนามผู้ทรงคุณวุฒิ ซึ่งสามารถประเมินบทความของท่านได้ จำนวน 2 ท่าน โดยระบุชื่อ-นามสกุล
ตำแหน่งทางวิชาการ, E-mail และเบอร์โทรศัพท์ที่สามารถติดต่อได้)

1. ชื่อ-นามสกุล.....ตำแหน่งทางวิชาการ.....
E-mail :โทรศัพท์.....

2. ชื่อ-นามสกุล.....ตำแหน่งทางวิชาการ.....
E-mail :โทรศัพท์.....

ใบรับรอง

ข้าพเจ้า (นาย/นาง/นางสาว).....
ตำแหน่ง.....สถานที่ทำงาน.....
ที่อยู่.....
โทรศัพท์.....มือถือ.....โทรสาร.....
e-mail : Line :
ขอรับรองว่า(นาย/นาง/นางสาว).....
เป็นนิสิต/นักศึกษามหาวิทยาลัย.....ปีการศึกษา.....
ระดับปริญญา.....ชั้นปีที่ จริง และได้พิจารณาบทความแล้วว่ามีความเหมาะสมที่จะ
ขอเสนอเพื่อลงตีพิมพ์ในวารสารวิศวกรรมลาดกระบัง

***กรณีที่เป็นนิสิตนักศึกษา ต้องให้อาจารย์ที่ปรึกษากรอกใบรับรอง (วิทยานิพนธ์ / การศึกษาค้นคว้าอิสระ)

Ladkrabang Engineering Journal

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

Contents:

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

Frequency :

The journal is published quarterly.

Policy :

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

Manuscripts :

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

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

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

Titles : Should be given in both Thai and English.

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

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

Abstract : Should be given in both Thai and English.

Main theme : Should contain the following sections.

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

Acknowledgement : (if required)

References : Should follow the pattern given below.

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

Submission :

1. Please submit your manuscript as ONE original .pdf file. The first page of the manuscript contains the authors' names and complete affiliations. Please also duplicate the first page of the manuscript with the names and affiliations made anonymous. The total number of pages for a manuscript shall be nine (9).

2. Please clearly fill out the submission form. Authors can submit their manuscript online via the journal system at the url : <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/lej/about/submissions>

Published by :

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

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

Fax : (662) 329-8317

Advisors :

Dean School of Engineering

Assoc.Prof. Dr.Somyot Kaitwanidvilai

Editor-in-chief :

Assoc.Prof. Dr. Uma Seeboonruang

Associate Editor :

Assoc.Prof.Dr. Jakrapong Pongpeng

Editorial Staff :

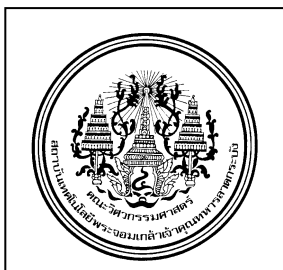
Miss.Chanunchida Nobnom

Liaise & Member Relationships

Create Original Artwork & Proofreading and Photo Books.

Mr.Thanongsak Chaichuensaen

Cover Design.



ISSN 0125-1724

วิศวกรรม
ลาดกระบัง
คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

LADKRABANG ENGINEERING JOURNAL

Volume 38 Number 2

April - June 2021

Research Papers

1. Vertical Beam Adjustable Antenna for Internet of Things Applications 1
E. Aynoi N. Nanthakusol R. Jeenawong C. Phongcharoenpanich
And S. Kawdungta
2. The Granular Lateritic soil replaced by Bottom Ash for Highway Materials 9
P. Tandulyakul and W. Chimoye
3. Heuristic method for tablebases: A Case Study of Thai chess endgame in
King-Knight-Queen-King pattern 17
T. Tudsuan and K. Jearanaitanakij
4. Design of Circular Ring Patch Antenna on Split-Ring Resonator Metasurface for
Dual-Band Applications 31
J. Hemmuang and C. Phongcharoenpanich
5. Identifying the indicators to determine inter-provincial local roads 40
N. Seangjaew W. Suanpaga and M. Wichien sin