



ISSN 0125-1724

วิศวกรรม  
ลาดกระบัง

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

LADKRABANG ENGINEERING JOURNAL

ปีที่ 37 ฉบับที่ 3

กรกฎาคม – กันยายน 2563

1. การตรวจสอบกราฟน้ำนองสูงสุดที่ออกแบบอาคารน้ำล้น และกราฟปฏิบัติการน้ำนองสำหรับเขื่อน  
เก็บกักน้ำอุบลรัตน์ 1  
สุณิรัตน์ รัตนถาวร และ ณัฐ มาแจ้ง
2. ระบบสายอากาศสวิตช์ลำคลื่นด้วยกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบแมลงหิวี่ปรับปรุง 10  
รัตติญา แก้วดวงตา และ ชูวงศ์ พงศ์เจริญพาณิชย์
3. การออกแบบสายอากาศแท่งอาร์เอฟไอดีย่านความถี่เอชเอฟ สำหรับใช้งานกับของเหลว  
ในบรรจุภัณฑ์ 19  
พรนิวัฒน์ กุมารภาส สัญชัย เอียดปราบ ธัชชัย พุ่มพวง และ ชูวงศ์ พงศ์เจริญพาณิชย์
4. Green Synthesis and Characterization of Carbon Nanotubes from Water Hyacinth  
Via Chemical Vapor Deposition. 28  
Suparat Sasrimuang Oranat Chuchuen and Apichart Artnaseaw
5. สายอากาศโมโนโพลบาร์ร่งขนาดกะทัดรัดสามแถบความถี่สำหรับประยุกต์ใช้งาน  
WLAN/WiMAX. 34  
สมภาพ พิมพ์พล และ รังสรรค์ วงศ์สรณ์

## “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 การอ้างอิงบทความให้ใช้หมายเลขประจำเอกสารหรือบทความที่อ้างอิง 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.คมสัน มาลีสี

### หัวหน้ากองบรรณาธิการ

ศาสตราจารย์ ดร.วรงค์ ตั้งศรีรัตน์

### กองบรรณาธิการ

นายทงศักดิ์ ใจชื่นแสน

ออกแบบปก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นภศูล วงษ์วานิช

นางสาวชนัญชิตา นอบน้อม

นายสถาพร พงษ์ประยูร

ติดต่อประสานงานและสมาชิกสัมพันธ์

จัดทำต้นฉบับ Artwork

พิสูจน์อักษร และรูปเล่ม

### จัดทำหน้าโดย

คณะวิศวกรรมศาสตร์

นางสาวชนัญชิตา นอบน้อม

นางอาทิสดา ขาววิจิตร

โทร. 02-329-8317



# 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.สรวิทย์ สุจิตตรจ

สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน)

ศาสตราจารย์ ดร.โมนาย ไกรฤกษ์

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร-

ลาดกระบัง

ศาสตราจารย์ ดร.วัลลภ สุระกำพลธร

วิทยาลัยนวัตกรรมการผลิตขั้นสูง

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร-

ลาดกระบัง

รองศาสตราจารย์ ดร. กอบชัย เดชหาญ

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร-

ลาดกระบัง



# วิศวกรรมลาดกระบัง

Faculty of Engineering King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

วันที่ 20 มีนาคม 2563

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 ผู้เขียนบทความสามารถเสนอรายชื่อผู้ทรงคุณวุฒิที่เชี่ยวชาญในสาขาที่ท่านส่งมา จำนวน 2 ท่าน โดยแนบมาพร้อมแบบฟอร์มการส่งบทความด้วยทุกครั้ง

จึงเรียนมาเพื่อโปรดทราบ จักขอบพระคุณยิ่ง

ขอแสดงความนับถือ

(ศ.ดร.วรพงศ์ ตั้งศรีรัตน์)

หัวหน้ากองบรรณาธิการ

# การตรวจสอบกราฟน้ำนองสูงสุดที่ออกแบบอาคารน้ำล้น และกราฟปฏิบัติการน้ำนองสำหรับเขื่อนเก็บกักน้ำอุบลรัตน์

## Investigation of Spillway Design Flood Hydrographs and Flood Operation Rule Curve for Ubol Ratana Storage Dam

สุณีรัตน์ รัตนถาวร\* และ ณัฐ มาแจ้ง

ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Suneerath Rattanatavon\* and Nat Marjang

Water Resources Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University

\*Corresponding author E-mail: suneerath.r@gmail.com

Received: June 16, 2020 Revised: July 30, 2020 Accepted: July 31, 2020

### บทคัดย่อ

เขื่อนอุบลรัตน์ เป็นเขื่อนเก็บกักน้ำที่สร้างปิดกั้นลำน้ำพอง ก่อสร้างแล้วเสร็จในปี พ.ศ.2509 และมีการปรับปรุงเนื่องจากอุทกภัยครั้งใหญ่แล้วเสร็จในปี พ.ศ.2530 จากข้อจำกัดของสถิติข้อมูลอุทกนิยามวิทยาและอุทกวิทยาที่ใช้ศึกษาในอดีต และเขื่อนได้มีการก่อสร้างมาเป็นเวลานานกว่า 50 ปี ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงปัจจัยต่างๆที่ใช้ในการออกแบบกราฟน้ำนองสูงสุด เช่นการใช้ประโยชน์ที่ดินและสภาพภูมิอากาศ มีการเปลี่ยนแปลงไป จึงควรทำการศึกษาเพื่อตรวจสอบกราฟน้ำนองสูงสุดที่ออกแบบอาคารน้ำล้นและกราฟปฏิบัติการน้ำนองของเขื่อนเก็บกักน้ำอุบลรัตน์ ซึ่งผลการศึกษาการเคลื่อนตัวของน้ำหลากผ่านทางระบายน้ำล้นที่คาบความถี่ของการเกิดต่างๆ โดยใช้ระดับน้ำสูงสุดในอ่างอยู่ที่ +183.50 เมตร (รทก.) ซึ่งเป็นระดับคันกั้นน้ำ อำเภอโนนสัง จังหวัดหนองบัวลำภู และเป็นจุดที่ได้รับผลกระทบจากปริมาณน้ำในเขื่อนเก็บกักน้ำอุบลรัตน์โดยตรง จากการศึกษาพบว่าเขื่อนเก็บกักน้ำอุบลรัตน์ มีความสามารถในการรองรับปริมาณน้ำนองสูงสุดที่ไหลผ่านเขื่อนได้ที่คาบความถี่ของการเกิด 2-200 ปี สำหรับปริมาณน้ำหลากที่คาบความถี่ของการเกิด 500-10,000 ปี เมื่อกำหนดเงื่อนไขระดับน้ำเริ่มต้นที่สันอาคารระบายน้ำล้นที่ระดับ +182.00 เมตร (รทก.) และปล่อยน้ำเมื่อระดับน้ำเกินกว่า +182.00 เมตร (รทก.) พบว่าปริมาณน้ำนองสูงสุดที่ไหลเข้าเขื่อนเก็บกักน้ำอุบลรัตน์ทำให้ปริมาณน้ำในอ่างเก็บน้ำเพิ่มสูงขึ้นระดับเก็บกักสูงสุดของเขื่อน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องกำหนดให้ที่คาบความถี่ของการเกิด 500 ปี พร่องน้ำในช่วงฤดูน้ำหลาก อยู่ที่ระดับ +180.50 เมตร (รทก.) และควบคุมการเปิดประตูระบายน้ำ ด้วยอัตราส่วนความสูงการเปิดประตูต่อความสูงน้ำเหนือระดับเก็บกักปกติ ( $d/\Delta h$ ) ซึ่งหมายถึงความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำในอ่างเก็บน้ำที่อยู่เหนือทางระบายน้ำล้น เทียบกับความสูงในการเปิดประตูน้ำเพื่อระบายน้ำให้ทันในช่วงเวลาที่มีคลื่นน้ำท่วมไหลเข้าสู่อ่างเก็บน้ำ ที่ระดับ +180.50 ถึง +183.50 เมตร (รทก.) เท่ากับ 4 ที่คาบความถี่ของการเกิด 1,000 ปี พร่องน้ำในช่วงฤดูน้ำหลาก อยู่ที่ระดับ +180.00 เมตร (รทก.) ปล่อยน้ำเมื่อระดับน้ำเกินกว่า +181.50 เมตร (รทก.) และควบคุมการเปิดประตูระบายน้ำ (Spillway) ที่ระดับ +180.00 ถึง +183.50 เมตร (รทก.) ด้วยอัตราส่วน  $d/\Delta h$  เท่ากับ 5 และที่คาบความถี่ของการเกิด 10,000 ปี พร่องน้ำในช่วงฤดูน้ำหลาก อยู่ที่ระดับ +177.00 เมตร (รทก.) ปล่อยน้ำเมื่อระดับน้ำเกินกว่า +180.50 เมตร (รทก.) และควบคุมการเปิดประตูระบาย

(Spillway) ที่ระดับ +177.00 ถึง +183.50 เมตร (รทก.) ด้วยอัตราส่วน  $d/\Delta h$  เท่ากับ 2 และเพิ่มการติดตั้ง Barrier 1.20 เมตร เพื่อให้สามารถรองรับปริมาณน้ำหลากที่ไหลผ่านเขื่อนอุบลรัตน์ได้อย่างปลอดภัย

**คำสำคัญ:** กราฟน้ำนองสูงสุด กราฟปฏิบัติการน้ำนอง เขื่อนเก็บกักน้ำอุบลรัตน์

## Abstract

Ubol Ratana storage dam was constructed on Pong River in 1966. The dam crest was increased due to the massive floods in 1987. Due to the limitation of the meteorological and hydrological previously used for the dam design and also the dam was constructed over 50 years, the factors used in spillway design flood hydrographs should be changed such as the present land use compared with those before dam construction and weather. Therefore, the spillway design flood hydrographs as well as existing flood operation rule curves for the dam should be investigated by using such updated data and information. The results of reservoir routing for the maximum water level at Ubol Ratana storage dam study is +183.50 m.(MSL.) because It is controlled by the height of Noonsang Dike located at the upstream area. The results of flood routing at return period 2-200 years show that the existing controlling of spillway gates is enough to manage the flood hydrographs. For the flood hydrographs at return period 500-10,000 years with the initial water level at the spillway crest, +182.00 m.(MSL.), and start to release water when the water level exceeds +182.00 m.(MSL.), the results revealed that the peak of water level in the reservoir are higher than the maximum storage level. Therefore, the flood hydrograph at return period 500 years must start to release water in flood season at the minimum reservoir water level +180.50 m.(MSL.) The opening of spillway gates at the level of +180.50 to +183.50 m.(MSL.) will be controlled to open with the ratio  $d/\Delta h$  equal to 4. For the return period 1,000 years. It must start to release water in flood season at the minimum reservoir water level equal to +180.00 m.(MSL.) and start to release water when the water level exceeds +181.50 m.(MSL.) The opening of spillway gates at the level of +180.00 to +183.50 m.(MSL.) will be controlled to open with the ratio  $d/\Delta h$  equal to 5. For the return period 10,000 years. It must start to release water in flood season at the minimum reservoir water level equal to +177.00 m.(MSL.) and start to release water when the water level exceeds +180.50 m.(MSL.) The opening of spillway gates at the level of +177.00 to +183.50 m.(MSL.) will be controlled to open with the ratio  $d/\Delta h$  equal to 2 and the Noonsang dike crest must be installed a barrier height of 1.20 meters

**Keywords:** Flood Hydrographs, Flood Operation Rule Curve, Ubol Ratana Storage Dam

## 1. บทนำ

เขื่อนอุบลรัตน์เป็นเขื่อนกักเก็บน้ำอเนกประสงค์ขนาดใหญ่แห่งที่สองของประเทศไทยต่อจากเขื่อนภูมิพล สร้างปิดกั้นแม่น้ำพอง และมีความสำคัญสำหรับประเทศไทยก่อสร้างแล้วเสร็จในปี พ.ศ. 2509 ตั้งอยู่ที่ อำเภออุบลรัตน์ จังหวัดขอนแก่น เป็นเขื่อนหินทิ้งแกนดินเหนียวมีวัตถุประสงค์เพื่อใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้า พลังน้ำ การชลประทาน การบรรเทาอุทกภัย การคมนาคม

การประมง และอื่นๆ เมื่อปี พ.ศ.2530 ได้มีการปรับปรุงเขื่อน ผลเนื่องมาจากการเกิดอุทกภัยครั้งใหญ่ แต่ระดับของกันกั้นน้ำ อ.โนนสัง จ.หนองบัวลำภู ยังคงอยู่ที่ระดับเดิม คือ +183.50 เมตร(รทก.) (รวมระยะเผื่อ) หากระดับน้ำเกินกว่าระดับดังกล่าวนี้ จะทำให้เกิดอุทกภัยทั่วพื้นที่เกิดความเสียหายเป็นจำนวนมาก การศึกษานี้จะทำการวิเคราะห์ให้ระดับเก็บกักสูงสุดอยู่ที่ +183.50 เมตร (รทก.) เพื่อป้องกันการเกิดอุทกภัย ต้องมีการจัดการ

ระดับน้ำเก็บกักและปริมาณน้ำในอ่างอย่างเหมาะสม ในช่วงฤดูน้ำหลาก ทั้งนี้เนื่องจากหลักการของการเก็บกักน้ำจะพยายามให้อ่างเก็บน้ำเต็มถึงระดับเก็บกักที่ออกแบบไว้เสมอ แต่การบรรเทาอุทกภัยทางด้านท้ายน้ำ จะพยายามให้อ่างเก็บน้ำมีปริมาณความจุสำรองเหลือที่ว่างอยู่เสมอเพื่อที่จะรองรับปริมาณน้ำที่ไหลเข้าสู่อ่าง ซึ่งเมื่อมีการใช้ประโยชน์ปริมาณของอ่างเก็บน้ำร่วมกัน ทั้งวัตถุประสงค์ของการเก็บกักน้ำและการบรรเทาอุทกภัยมีความขัดแย้งกัน จึงจำเป็นต้องมีข้อกำหนดในการปฏิบัติการระดับน้ำและปริมาณของอ่างเก็บน้ำ (Flood Operation Rule Curve) ให้เหมาะสมไม่เช่นนั้น หากปล่อยให้ระดับน้ำในอ่างอยู่สูง และมีปริมาณน้ำนองที่มีปริมาณมากไหลเข้ามาในอ่าง อาจทำให้ปริมาณน้ำเกินความจุของอ่างเก็บน้ำ และต้องมีการเร่งระบายน้ำออกไปยังด้านท้ายน้ำ ซึ่งอาจส่งผลให้เกิดอุทกภัยได้ นอกจากนี้ยังเป็นการเสี่ยงในการระบายน้ำออก และอาจก่อให้เกิดความเสียหายต่อตัวเขื่อนได้ จึงเห็นควรให้มีการศึกษาการจัดการน้ำในอ่างเก็บน้ำ ทบทวน และสร้างกราฟน้ำนองสูงสุดที่ใช้ในการออกแบบอาคารน้ำล้น และหาแนวทางในการจัดการน้ำและบรรเทาอุทกภัยอย่างมีประสิทธิภาพและมีความเหมาะสมมากที่สุด

## 2. วิธีการดำเนินงาน

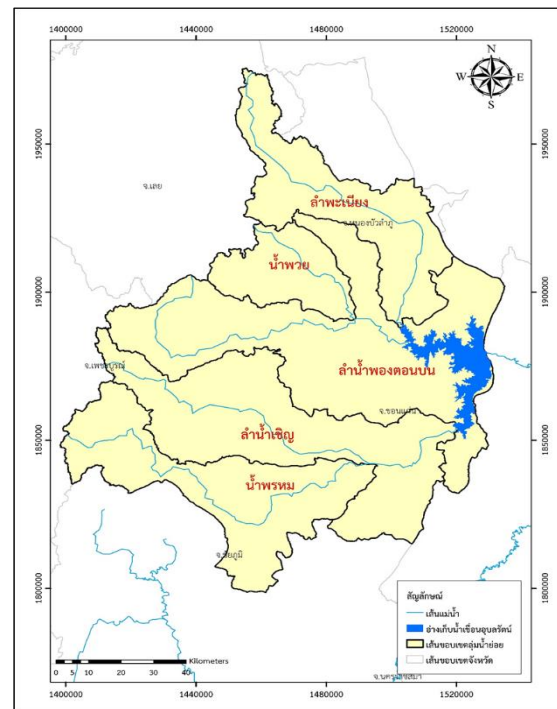
การศึกษาวิจัยในครั้งนี้มีวิธีการ และขั้นตอนการดำเนินการศึกษา ที่สำคัญดังต่อไปนี้

### 2.1 การเก็บรวบรวมข้อมูล

ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษา ประกอบด้วย ข้อมูลรายละเอียดทางกายภาพ ข้อมูลภูมิอากาศ ข้อมูลจากสถิติน้ำฝน และข้อมูลจากสถิติน้ำท่า ที่ตั้งอยู่ในพื้นที่ศึกษา บริเวณเขื่อนอุบลรัตน์

2.1.1 ข้อมูลรายละเอียดทางกายภาพเป็นข้อมูลที่วัดและคำนวณได้จากแผนที่ภูมิประเทศมาตราส่วน 1:50,000 ของกรมแผนที่ทหาร สำหรับลุ่มน้ำย่อย ประกอบด้วย 5 ลุ่มน้ำย่อย ได้แก่ ลำน้ำพองตอนบน น้ำพวย ลำพะเนียง น้ำพรหม และลำน้ำเชิญ ซึ่งลุ่มน้ำย่อยขนาดพื้นที่ตั้งแต่ 896.113 ถึง 4,067.845 ตารางกิโลเมตร แสดงแผนที่ลุ่มน้ำย่อยในพื้นที่ศึกษา ดังรูปที่ 1

2.1.2 ข้อมูลภูมิอากาศเป็นข้อมูลทางอุตุนิยมวิทยาจาก 7 สถานีตรวจอากาศของกรมอุตุนิยมวิทยา



รูปที่ 1 การแบ่งลุ่มน้ำย่อยของลุ่มน้ำชีบริเวณพื้นที่ศึกษา

2.1.3 ข้อมูลจากสถิติน้ำฝน ประกอบด้วย ข้อมูลปริมาณฝนสูงสุดช่วงเวลา 1 ถึง 7 วัน จากสถานีวัดน้ำฝน 20 สถานี ข้อมูลการแพร่กระจายของปริมาณฝนสูงสุด 24 ชั่วโมง ของกรมชลประทาน แฟกเตอร์การสูญเสียปริมาณฝนตามขนาดพื้นที่ และแฟกเตอร์การผันแปรของแฟกเตอร์การลดปริมาณน้ำฝนตามขนาดพื้นที่

2.1.4 ข้อมูลจากสถิติน้ำท่า รวบรวมสถานีวัดน้ำท่าบริเวณพื้นที่ศึกษา จำนวน 5 สถานี นำมาวิเคราะห์ข้อมูลปริมาณน้ำท่าเฉลี่ย วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำท่ารายปีเฉลี่ย กับพื้นที่รับน้ำ และวิเคราะห์ข้อมูลปริมาณการไหลสูงสุดรายปี

### 2.2 การวิเคราะห์ข้อมูล

การวิเคราะห์ข้อมูลด้านอุทกวิทยาน้ำนองสูงสุด ประกอบด้วย การวิเคราะห์ที่สำคัญ ดังต่อไปนี้

2.2.1 การวิเคราะห์กราฟหนึ่งหน่วยน้ำท่า สำหรับข้อมูลน้ำฝนจะทำการวิเคราะห์ โดยหาความสัมพันธ์ระหว่าง  $t_p$  กับ  $LL/\sqrt{S}$  และ  $q_p/A$  กับ  $t_p$  โดยอาศัยวิธีวิเคราะห์ถดถอยในรูปสมการยกกำลัง

ทำการเปลี่ยนกราฟหนึ่งหน่วยน้ำทำตัวแทนของแต่ละสถานีให้เป็นกราฟหนึ่งหน่วยน้ำทำไร่มีติ และนำเอากราฟหนึ่งหน่วยน้ำทำไร่มีติทั้งหมดมาหาตัวแทนของกราฟหนึ่งหน่วยน้ำทำไร่มีติของกลุ่มน้ำย่อย จากนั้นนำข้อมูลพารามิเตอร์ลุ่มน้ำ-ลำน้ำ ของกลุ่มน้ำย่อยต่างๆ ที่ได้ทำการแบ่งไว้แล้ว มาประยุกต์ใช้กับสมการเพื่อหาค่าพารามิเตอร์กราฟหนึ่งหน่วยน้ำทำ คือ ปริมาณการไหลสูงสุด ( $q_p$ ) เวลาที่เกิดปริมาณการไหลสูงสุด ( $t_p$ ) และช่วงเวลาของกราฟหนึ่งหน่วยน้ำทำ ( $t_c$ ) ของแต่ละลุ่มน้ำย่อยและนำมาประยุกต์ใช้ จะได้กราฟหนึ่งหน่วยน้ำทำของแต่ละลุ่มน้ำย่อย

2.2.2 การวิเคราะห์กราฟน้ำนองสูงสุดจากข้อมูลน้ำฝนวิเคราะห์โดยนำเอาข้อมูลปริมาณฝนสูงสุดรายปีช่วงเวลา 1-7 วัน มาทำการวิเคราะห์แจกแจงความถี่โดยวิธีกัมเบลเพื่อให้ได้ปริมาณฝนสูงสุดที่รอบปีการเกิดต่างๆ จากนั้นหาค่าเฉลี่ยปริมาณฝนสูงสุดของกลุ่มน้ำย่อยโดยวิธีเฉลี่ยเรขาคณิต ซึ่งจะได้อัตราปริมาณฝนสูงสุดเฉลี่ยที่รอบปีการเกิดต่างๆ ของกลุ่มน้ำย่อยทำการเปลี่ยนข้อมูลปริมาณฝนสูงสุดให้เป็นปริมาณฝนสูงสุดแบบ Areal Rainfall ของแต่ละลุ่มน้ำย่อย จากนั้นทำการแบ่งช่วงเวลาของพายุฝนให้เท่ากับช่วงเวลาของกราฟ ประยุกต์ใช้กับกราฟหนึ่งหน่วยน้ำทำของแต่ละลุ่มน้ำย่อยจะได้กราฟน้ำทำผิวดินของกลุ่มน้ำย่อย เหนืออ่างเก็บน้ำเขื่อนอุบลรัตน์ และนำไปเปรียบเทียบกับปริมาณน้ำนองสูงสุดจากข้อมูลน้ำทำที่ได้จากวิธี Regional Analysis

2.2.3 การวิเคราะห์กราฟน้ำนองสูงสุดที่จุดควบคุมต่างๆ

จากข้อมูลกราฟน้ำนองสูงสุดของกลุ่มน้ำย่อย ที่รอบปีการเกิดต่างๆ เหนือเขื่อนอุบลรัตน์ที่ได้ออกแบบไว้ นำมาวิเคราะห์การเคลื่อนตัวตามลำน้ำ (River Routing) โดยใช้ข้อมูลลักษณะทางกายภาพของลำน้ำที่คลื่นน้ำท่วมไหลผ่าน และทำการรวมเข้ากับกราฟน้ำท่วมสูงสุดของกลุ่มน้ำย่อยตามจุดควบคุม (Combining) ซึ่งจะได้กราฟน้ำท่วมสูงสุดที่จุดควบคุมต่างๆ จนมาถึงเขื่อนอุบลรัตน์ที่รอบปีการเกิดซ้ำต่างๆ และทำการเคลื่อนตัวผ่านอ่างเก็บน้ำโดยใช้เทคนิคการเคลื่อนตัวของคลื่นน้ำท่วม

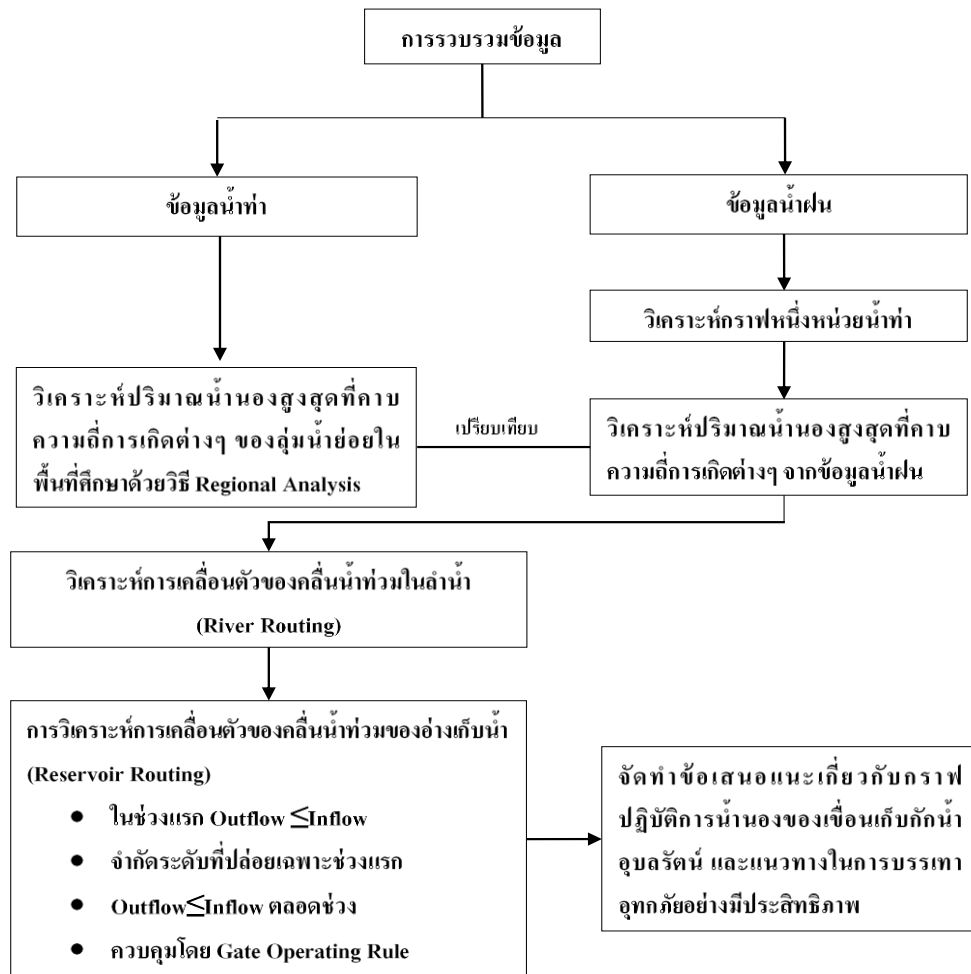
ผ่านอ่างเก็บน้ำ (Reservoir Routing) โดยใช้ข้อมูลคุณลักษณะทางกายภาพของเขื่อนอุบลรัตน์ และเงื่อนไขการจัดการอ่างเก็บน้ำที่ใช้ในปัจจุบันและศึกษาเพิ่มเติมเพื่อการจัดเตรียมข้อเสนอแนะเกี่ยวกับกราฟปฏิบัติการน้ำนองและการบริหารจัดการเขื่อนอุบลรัตน์ จากผลการศึกษากราฟน้ำท่วมที่จุดควบคุมต่าง ๆ นำมาเปรียบเทียบกับเงื่อนไขการจัดการน้ำในปัจจุบัน แล้วจัดเตรียมข้อเสนอแนะเกี่ยวกับกราฟปฏิบัติการน้ำนองและการบริหารจัดการเขื่อนอุบลรัตน์ และแนวทางในการบรรเทาอุทกภัยอย่างมีประสิทธิภาพ แสดงดังรูปที่ 2 แผนผังขั้นตอนวิธีการศึกษา

### 3. ผลการศึกษา

การศึกษานี้เป็นการศึกษากราฟน้ำนองสูงสุดที่ออกแบบอาคารน้ำล้น และกราฟปฏิบัติการน้ำนองในอ่างเก็บน้ำเขื่อนอุบลรัตน์ เป็นการวิเคราะห์ปริมาณน้ำที่ไหลลงอ่างเก็บน้ำของกลุ่มน้ำย่อยที่อยู่ในพื้นที่รับน้ำทั้งหมดของเขื่อน ซึ่งประกอบด้วย 5 ลุ่มน้ำย่อย คือ ลำพะเนียง ลำน้ำพองตอนบน ลำน้ำเชิญ น้ำพวย และน้ำพรหม โดยมีพารามิเตอร์ของกลุ่มน้ำย่อยประกอบด้วยพื้นที่รับน้ำฝน (A) ความยาวตามลำน้ำ (L) ความยาวตามลำน้ำสายใหญ่จากจุดออกจนถึงจุดไกลสุดบนลำน้ำที่ใกล้จุดศูนย์ถ่วงของกลุ่มน้ำมากที่สุด ( $L_c$ ) และ ความลาดเทเฉลี่ยของลำน้ำสายใหญ่ (S) แสดงดังตารางที่ 1

จากข้อมูลพารามิเตอร์ลุ่มน้ำลำน้ำของสถานีวัดน้ำท่าต่างๆ นำมาหาความสัมพันธ์ระหว่าง  $t_p$  กับ  $LL_c/\sqrt{S}$  และ  $q_p/A$  กับ  $t_p$  ดังแสดงในตารางที่ 2 มาแทนค่าสมการความสัมพันธ์ จะได้พารามิเตอร์กราฟหนึ่งหน่วยน้ำทำของกลุ่มน้ำย่อย เมื่อนำไปประยุกต์ใช้กับกราฟหนึ่งหน่วยน้ำทำแบบไม่มีหน่วยตัวแทนของกลุ่มน้ำชี้ จะได้กราฟหนึ่งหน่วยน้ำทำของกลุ่มน้ำย่อยเหนือเขื่อน ดังแสดงในรูปที่ 3 เมื่อทำการวิเคราะห์ปริมาณน้ำนองสูงสุดสำหรับแต่ละคาบความถี่ของการเกิด โดยประยุกต์ใช้กราฟหนึ่งหน่วยน้ำทำ ของแต่ละลุ่มน้ำย่อยกับปริมาณน้ำฝนสูงสุดช่วงเวลา 1-7 วัน โดยใช้วิธีแจกแจงความน่าจะเป็นลำน้ำ





รูปที่ 2 แผนผังขั้นตอนวิธีการศึกษา

แบบกัมเบล (Gumbel Distribution) ที่รอบปีการเกิดต่างๆ ตัวอย่าง ปริมาณน้ำฝนสูงสุดช่วงเวลา 1 - 7 วัน ของ พองตอนบน แสดงดังตารางที่ 3 และปริมาณฝนส่วนเกิน ที่รอบปีการเกิดต่างๆ แสดงดังตารางที่ 4

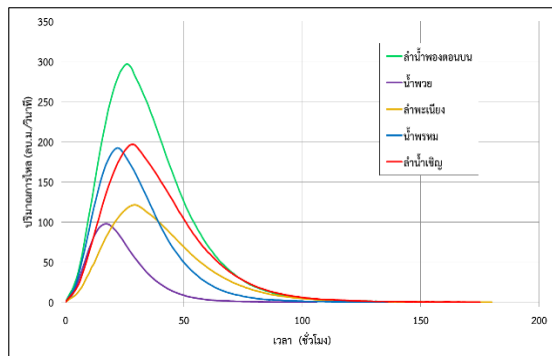
ตารางที่ 1 พารามิเตอร์กราฟหนึ่งหน่วยน้ำท่าของกลุ่มน้ำย่อย

| รหัสสถานี | ชื่อลุ่มน้ำ   | พื้นที่  | L      | L <sub>c</sub> | Slope  |
|-----------|---------------|----------|--------|----------------|--------|
|           |               | (ตร.กม.) |        |                |        |
| 0409      | ลำน้ำพองตอนบน | 4,067.85 | 129.47 | 64.73          | 0.0195 |
| 0410      | น้ำพวย        | 896.11   | 89.06  | 44.53          | 0.0139 |
| 0411      | ลำพะเนียง     | 1,875.27 | 127.72 | 63.86          | 0.0132 |
| 0412      | น้ำพรหม       | 2,253.91 | 140.73 | 70.37          | 0.0427 |
| 0413      | ลำน้ำชี       | 2,931.75 | 141.45 | 70.72          | 0.0217 |

ทำการแบ่งปริมาณฝนสูงสุดช่วงเวลา 1 ถึง 7 วัน ออกเป็น ช่วงย่อย (Increment) ให้มีช่วงเท่ากับ ช่วงเวลา (Duration) ของกราฟหนึ่งหน่วยน้ำท่าทำการจัดเรียงลำดับช่วงย่อยของปริมาณฝนส่วนเกินโดยกำหนดให้วันที่มีปริมาณฝน สูงสุดมากที่สุดตรงกลาง จากนั้นได้นำมาคำนวณกราฟน้ำนองสูงสุดสำหรับแต่ละคาบความถี่ของการเกิดด้วยการประยุกต์กราฟหนึ่งหน่วยน้ำท่ากับปริมาณฝนส่วนเกินทุกช่วงย่อยเรียงที่ลำดับแล้วและรวมเข้าด้วยกันก็จะได้กราฟน้ำนองของน้ำท่าผิวดิน (Direct Runoff)

ตารางที่ 2 พารามิเตอร์ลุ่มน้ำลำน้ำของสถานีวัดน้ำท่า

| ลำดับ | รหัสสถานี | ชื่อสถานี    | A<br>(ตร.กม.) | $t_p$<br>(ชม.) | $LL_c\sqrt{S}$ | $q_p/A$ |
|-------|-----------|--------------|---------------|----------------|----------------|---------|
| 1     | E.5       | บ้านเขว      | 4,207         | 78             | 223,895.88     | 0.003   |
| 2     | E.29      | บ้านผานกเค้า | 949           | 26             | 88,947.28      | 0.01    |
| 3     | E.32A     | บ้านหนองโอ   | 2,867         | 52             | 179,494.24     | 0.004   |
| 4     | E.54      | บ้านแก่งยาว  | 1,548         | 52             | 126,392.44     | 0.003   |
| 5     | E.60      | บ้านโคกพะวงด | 205           | 12             | 19,524.74      | 0.013   |
| 6     | E.70      | บ้านกุดก่าง  | 2,647         | 60             | 203,084.72     | 0.003   |
| 7     | E.72      | บ้านเขียง    | 323           | 12             | 19,975.83      | 0.015   |



รูปที่ 3 กราฟหนึ่งหน่วยน้ำท่าของกลุ่มน้ำย่อย

ตารางที่ 3 ปริมาณฝนสูงสุด 1-7 วัน ที่รอบปีการเกิดต่างๆ

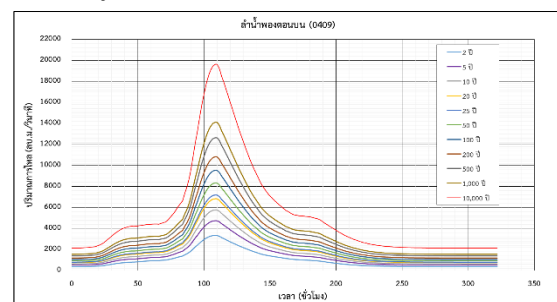
| ปริมาณฝน<br>สูงสุด (วัน) | รอบปีการเกิด (Tr) |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|--------------------------|-------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                          | 2                 | 5      | 10     | 20     | 25     | 50     | 100    | 200    | 500    | 1,000  |
| 1                        | 84.48             | 113.09 | 132.02 | 150.19 | 155.95 | 173.70 | 191.32 | 208.87 | 232.03 | 249.53 |
| 2                        | 110.97            | 145.26 | 167.96 | 189.74 | 196.64 | 217.92 | 239.04 | 260.09 | 287.85 | 308.84 |
| 3                        | 127.60            | 164.70 | 189.27 | 212.83 | 220.31 | 243.33 | 266.19 | 288.96 | 319.01 | 341.71 |
| 4                        | 139.87            | 178.45 | 204.00 | 228.50 | 236.27 | 260.21 | 283.98 | 307.65 | 338.89 | 362.50 |
| 5                        | 152.19            | 192.97 | 219.97 | 245.86 | 254.08 | 279.39 | 304.51 | 329.54 | 362.56 | 387.52 |
| 6                        | 165.27            | 209.45 | 238.71 | 266.77 | 275.67 | 303.09 | 330.30 | 357.42 | 393.20 | 420.23 |
| 7                        | 175.47            | 222.81 | 254.16 | 284.22 | 293.76 | 323.14 | 352.31 | 381.36 | 419.70 | 448.67 |

ตารางที่ 4 ปริมาณฝนส่วนเกิน 1-7 วัน ที่รอบปีการเกิดต่างๆ

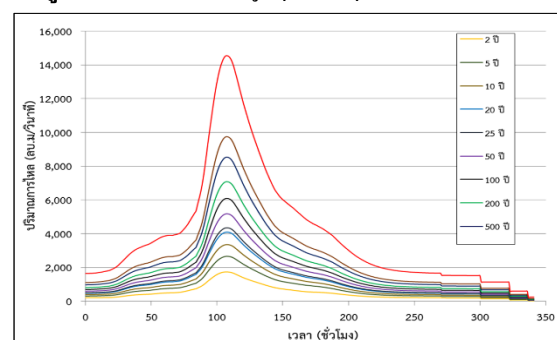
| ปริมาณฝน<br>ส่วนเกิน (วัน) | รอบปีการเกิด (Tr) |      |      |       |       |       |       |       |       |       |
|----------------------------|-------------------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                            | 2                 | 5    | 10   | 20    | 25    | 50    | 100   | 200   | 500   | 1,000 |
| 1                          | 28.5              | 41.2 | 50.5 | 60.2  | 63.4  | 73.8  | 84.8  | 96.5  | 113.1 | 126.5 |
| 2                          | 37.5              | 52.9 | 64.3 | 76.1  | 80.0  | 92.6  | 106.0 | 120.2 | 140.3 | 156.6 |
| 3                          | 43.1              | 60.0 | 72.5 | 85.3  | 89.6  | 103.4 | 118.0 | 133.6 | 155.5 | 173.3 |
| 4                          | 47.2              | 65.0 | 78.1 | 91.6  | 96.1  | 110.6 | 125.9 | 142.2 | 165.2 | 183.8 |
| 5                          | 51.4              | 70.3 | 84.2 | 98.6  | 103.3 | 118.7 | 135.0 | 152.3 | 176.7 | 196.5 |
| 6                          | 55.8              | 76.3 | 91.4 | 107.0 | 112.1 | 128.8 | 146.5 | 165.2 | 191.7 | 213.1 |
| 7                          | 59.2              | 81.2 | 97.3 | 114.0 | 119.5 | 137.3 | 156.2 | 176.3 | 204.6 | 227.5 |

จากนั้นทำการบวกด้วยปริมาณการไหลพื้นฐาน (Base Flow) จะได้กราฟน้ำนองสูงสุดที่คาบความถี่การเกิดต่างๆของกลุ่มน้ำย่อย แสดงตัวอย่างกราฟน้ำนองสูงสุดของกลุ่มน้ำพองตอนบน ดังรูปที่ 4

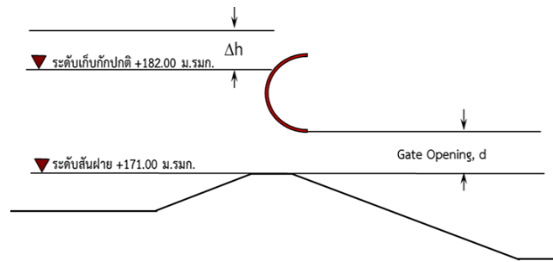
จากนั้นทำการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของน้ำหลากในลำน้ำ (River Routing) ผ่านจุดควบคุมในลำน้ำบริเวณพื้นที่ศึกษาจะได้กราฟน้ำนองสูงสุดที่ไหลเข้าเขื่อนอุบลรัตน์ที่คาบความถี่ของการเกิดต่างๆดังแสดงในรูปที่ 5 และเมื่อวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของน้ำหลากผ่านอ่างเก็บน้ำ (Reservoir Routing) ด้วยเทคนิค Routing and Combining โดยใช้ข้อมูลคุณลักษณะทางกายภาพของเขื่อนและเงื่อนไขการจัดการอ่างเก็บน้ำที่ใช้ในปัจจุบันการศึกษาในครั้งนี้จึงกำหนดเงื่อนไขควบคุมการไหลของ Gate โดย Gate Operation Rule Curve เมื่อใช้ระดับน้ำสูงสุด คือ +183.50 เมตร(รทก.) เป็นเกณฑ์ในการวิเคราะห์จากการศึกษาเมื่อกำหนดเงื่อนไขระดับน้ำเริ่มต้นที่สันอาคารระบายน้ำล้นที่ระดับ +182.00 เมตร(รทก.) และปล่อยน้ำเมื่อระดับน้ำเกินกว่า +182.00 เมตร(รทก.) พบว่าเขื่อนอุบลรัตน์มีความสามารถในการรองรับปริมาณน้ำนองสูงสุดที่ไหลผ่านเขื่อนได้ที่คาบความถี่ของการเกิด 2-200 ปี ซึ่งกำหนดเงื่อนไขการควบคุมการเปิดประตูระบายน้ำ (Spillway) ด้วยอัตราส่วน  $d/\Delta h$  ดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 4 กราฟน้ำนองสูงสุดของกลุ่มน้ำพองตอนบน



รูปที่ 5 กราฟน้ำนองสูงสุดที่ไหลเข้าเขื่อนอุบลรัตน์

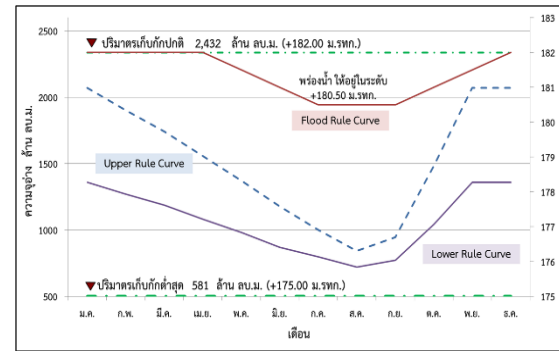


รูปที่ 6 การกำหนดเงื่อนไขการควบคุมการเปิดประตูระบายน้ำ ด้วยอัตราส่วน  $d/\Delta h$

สำหรับปริมาณน้ำหลากที่ที่คาบความถี่ของการเกิด 500–10,000 ปีเมื่อกำหนดเงื่อนไขระดับน้ำเริ่มต้นที่สันอาคารระบายน้ำล้นที่ระดับ +182.00 เมตร (รทก.) พบว่าปริมาณน้ำนองสูงสุดที่ไหลเข้าเขื่อนอุบลรัตน์ ทำให้ปริมาณน้ำในอ่างเก็บน้ำเพิ่มสูงกว่าระดับ +183.50 เมตร (รทก.) ซึ่งเป็นระดับเก็บกักสูงสุดของเขื่อน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องกำหนดให้มีการพร่องน้ำในช่วงฤดูน้ำหลากโดยคาบความถี่ของการเกิด 500 ปี พร่องน้ำในช่วงฤดูน้ำหลากอยู่ที่ระดับ +180.50 เมตร (รทก.) ปล่อยน้ำเมื่อระดับน้ำเกินกว่า +182.00 เมตร (รทก.) และควบคุมการเปิดประตูระบายน้ำ (Spillway) แสดงดังตารางที่ 5 ซึ่งผลการวิเคราะห์มีปริมาณน้ำหลากไหลเข้าสู่อ่างเก็บน้ำสูงสุด 8,536.20 ลบ.ม/วินาที มีการระบายน้ำออกประตูระบายน้ำสูงสุด 3,830.47 ลบ.ม/วินาที และกำหนดเกณฑ์ปฏิบัติการนํ้านองของเขื่อนอุบลรัตน์ (Flood Operation Rule Curve) ที่คาบความถี่ของการเกิด 500 ปี ได้ดังรูปที่ 7

ตารางที่ 5 การควบคุมการเปิดประตูระบายน้ำ (Spillway) ด้วยอัตราส่วน  $d/\Delta h$  ที่คาบความถี่ของการเกิด 500 ปี

| ระดับควบคุมการเปิดประตูน้ำ |       | เงื่อนไขการเปิดบาน |     |
|----------------------------|-------|--------------------|-----|
| จากระดับ                   | ถึง   |                    |     |
| 180.5                      | 181.1 | $d/\Delta h$       | 4:1 |
| 181.1                      | 181.7 | $d/\Delta h$       | 4:1 |
| 181.7                      | 182.3 | $d/\Delta h$       | 4:1 |
| 182.3                      | 183.9 | $d/\Delta h$       | 4:1 |
| 182.9                      | 183.5 | $d/\Delta h$       | 4:1 |

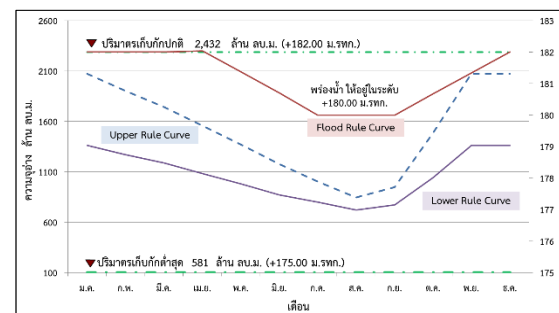


รูปที่ 7 เกณฑ์ปฏิบัติการนํ้านองของเขื่อนอุบลรัตน์ (Flood Operation Rule Curve) ที่คาบความถี่ของการเกิด 500 ปี

สำหรับคาบความถี่ของการเกิด 1,000 ปี พร่องน้ำในช่วงฤดูน้ำหลากอยู่ที่ระดับ +180.00 เมตร (รทก.) ปล่อยน้ำเมื่อระดับน้ำเกินกว่า +181.50 เมตร (รทก.) และควบคุมการเปิดประตูระบายน้ำ (Spillway) แสดงดังตารางที่ 6 ซึ่งผลการวิเคราะห์มีปริมาณน้ำหลากไหลเข้าสู่อ่างเก็บน้ำสูงสุด 9,748.45 ลบ.ม/วินาที มีการระบายน้ำออกประตูระบายน้ำสูงสุด 3,813.17 ลบ.ม/วินาที และกำหนดเกณฑ์ปฏิบัติการนํ้านองของเขื่อนอุบลรัตน์ (Flood Operation Rule Curve) ที่คาบความถี่ของการเกิด 1,000 ปี ได้ดังรูปที่ 8

ตารางที่ 6 การควบคุมการเปิดประตูระบายน้ำ (Spillway) ด้วยอัตราส่วน  $d/\Delta h$  ที่คาบความถี่ของการเกิด 1,000 ปี

| ระดับควบคุมการเปิดประตูน้ำ |       | เงื่อนไขการเปิดบาน |     |
|----------------------------|-------|--------------------|-----|
| จากระดับ                   | ถึง   |                    |     |
| 181.0                      | 181.5 | $d/\Delta h$       | 5:1 |
| 181.5                      | 182.0 | $d/\Delta h$       | 5:1 |
| 182.0                      | 182.5 | $d/\Delta h$       | 5:1 |
| 182.5                      | 183.0 | $d/\Delta h$       | 5:1 |
| 183.0                      | 183.5 | $d/\Delta h$       | 5:1 |



รูปที่ 8 เกณฑ์ปฏิบัติการนํ้านองของเขื่อนอุบลรัตน์ (Flood Operation Rule Curve) ที่คาบความถี่ของการเกิด 1,000 ปี

และสำหรับคาบความถี่ของการเกิด 10,000 ปี พร่องน้ำในช่วงฤดูน้ำหลากอยู่ที่ระดับ +177.00 เมตร (รทก.) ปล่อยน้ำเมื่อระดับน้ำเกินกว่า +180.50 เมตร (รทก.) และควบคุมการเปิดประตูระบายน้ำ (Spillway) ดังตารางที่ 7 ซึ่งผลการวิเคราะห์หมีปริมาณน้ำหลากไหลเข้าสู่อ่างเก็บน้ำสูงสุด 12,934.58 ลบ.ม/วินาที และมีการระบายน้ำออกประตูระบายน้ำสูงสุด 3,821.27 ลบ.ม/วินาทีที่ระดับน้ำสูงสุดอยู่ที่ +184.67 เมตร (รทก.) ซึ่งสูงกว่าระดับเก็บกักสูงสุด +183.50 เมตร (รทก.) แต่ระดับเก็บกักสูงสุดที่แท้จริงของเขื่อนอยู่ที่ +186.6 เมตร (รทก.) ระดับน้ำจึงยังไม่ล้นสันเขื่อน แต่ระดับน้ำล้นสันกันกันน้ำ อำเภอนโนสัง จึงจำเป็นต้องเพิ่มการติดตั้ง Barrier 1.20 เมตรที่คันกันน้ำ เพื่อรองรับปริมาณน้ำหลากที่ไหลผ่านเขื่อนอุบลรัตน์ และกำหนดเกณฑ์ปฏิบัติการน้ำนองของเขื่อนอุบลรัตน์ (Flood Operation Rule Curve) ที่คาบความถี่ของการเกิด 10,000 ปีได้ดังรูปที่ 9

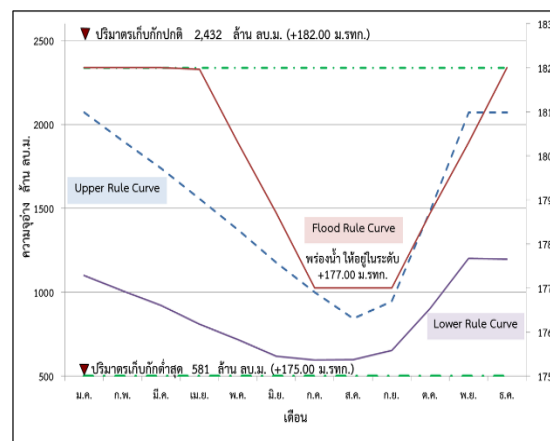
#### 4.สรุปผลการศึกษา

จากผลการศึกษาสามารถสรุปผลการศึกษาได้ดังนี้

4.1. ผลการวิเคราะห์กราฟน้ำนองสูงสุดที่ไหลเข้าสู่อ่างเก็บน้ำเขื่อนอุบลรัตน์โดยใช้หลักการของ Routing and Combining ในการคำนวณกราฟน้ำนองสูงสุดที่จุดควบคุมหรือจุดพิจารณาต่างๆ บนลำน้ำ

ตารางที่ 7 การควบคุมการเปิดประตูระบายน้ำ (Spillway) ด้วยอัตราส่วน  $d/\Delta h$  ที่คาบความถี่ของการเกิด 10,000 ปี

| ระดับควบคุมการเปิดประตูน้ำ |       | เงื่อนไขการเปิดบาน |     |
|----------------------------|-------|--------------------|-----|
| จากระดับ                   | ถึง   |                    |     |
| 177.0                      | 178.3 | $d/\Delta h$       | 2:1 |
| 178.3                      | 179.6 | $d/\Delta h$       | 2:1 |
| 179.6                      | 180.9 | $d/\Delta h$       | 2:1 |
| 180.9                      | 182.2 | $d/\Delta h$       | 2:1 |
| 182.2                      | 183.5 | $d/\Delta h$       | 2:1 |



รูปที่ 9 เกณฑ์ปฏิบัติการน้ำนองของเขื่อนอุบลรัตน์ (Flood Operation Rule Curve) ที่คาบความถี่ของการเกิด 10,000 ปี บริเวณพื้นที่ศึกษามีค่าปริมาณการไหลสูงสุดที่คาบความถี่ของการเกิดตั้งแต่ 2-10,000 ปี อยู่ในช่วง 1,738.86 ถึง 14,549.89 ลูกบาศก์เมตร/วินาที

4.2 ผลการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของคลื่นน้ำท่วมผ่านเขื่อนอุบลรัตน์ด้วยเทคนิค Routing and Combining เมื่อกำหนดเงื่อนไขระดับน้ำเริ่มต้นที่สันอาคารระบายน้ำล้นที่ระดับ +182.00 เมตร (รทก.) และปล่อยน้ำเมื่อระดับน้ำเกินกว่า +182.00 เมตร (รทก.) พบว่าเขื่อนอุบลรัตน์มีความสามารถในการรองรับปริมาณน้ำนองสูงสุดที่ไหลผ่านเขื่อนได้ที่คาบความถี่ของการเกิด 2-200 ปี

สำหรับปริมาณน้ำหลากที่คาบความถี่ของการเกิด 500-10,000 ปี จำเป็นต้องกำหนดให้ที่คาบความถี่ของการเกิด 500 ปี พร่องน้ำในช่วงฤดูน้ำหลาก อยู่ที่ระดับ +180.50 เมตร (รทก.) ที่คาบความถี่ของการเกิด 1,000 ปี พร่องน้ำในช่วงฤดูน้ำหลาก อยู่ที่ระดับ +180.00 เมตร (รทก.) ปล่อยน้ำเมื่อระดับน้ำเกินกว่า +181.50 เมตร (รทก.) และที่คาบความถี่ของการเกิด 10,000 ปี พร่องน้ำในช่วงฤดูน้ำหลาก อยู่ที่ระดับ +177.00 เมตร (รทก.) ปล่อยน้ำเมื่อระดับน้ำเกินกว่า +180.50 เมตร (รทก.) และเพิ่มการติดตั้ง Barrier 1.20 เมตรเพื่อให้สามารถรองรับปริมาณน้ำหลากที่ไหลผ่านเขื่อนอุบลรัตน์ได้อย่างปลอดภัย

## 5.เอกสารอ้างอิง

- [1] N. Marjang, Investigation of spillway design flood hydrographs and flood operation rule curve for Sirikit storage dam, M. Eng. Thesis, Kasetsart University. Bangkok. Graduate School, 1999.
- [2] T. Jaitrong, Flood. Forecasting in Ubol Ratana Reservoir by Artificial Neural Network for Flood Management, M. Eng. Thesis, Kasetsart University. Bangkok. Graduate School, 2005.
- [3] V. Taesombut, Hydrology, Department of water resources engineering Kasetsartuniversity, Bangkok, 1985.
- [4] V. Taesombut, Applied Hydrology, Department of water resources engineering Kasetsart university, Bangkok, 1988.
- [5] Royal Irrigation Department, Rainfall Intensity-Duration-Frequency curve and Distribution of maximum rainfall for 24 hours the north east of Thailand, Office of water management and Hydrology royal irrigation department, Bangkok, 2001.
- [6] Royal Irrigation Department, Unit hydrograph of river basin in Thailand, Hydrology division Office of water management and hydrology Royal irrigation department, Bangkok, 2009.
- [7] T. H. Illangasekare, Synthetic unit hydrograph for regions with inadequate hydrologic data., M. Eng. Thesis, Asian Institution of Thailand., 1974.
- [8] C. Komsatra, Flood hydrograph from small watershed., M. Eng. Thesis, Asian Institution of Thailand, 1969.

# ระบบสายอากาศสวิตช์ลำคลื่นด้วยกระบวนการหาค่าที่เหมาะสม แบบแมลงหิวปรับปรุง

## Switched Beam Antenna System with Modified Fruit Fly Optimization Algorithm

รัตติญา แก้วดวงตา และ ชูวงศ์ พงศ์เจริญพานิชย์\*

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

Rattiya Kawdungta and Chuwong Phongcharoenpanich\*

Department of Telecommunications Engineering Faculty of Engineering King Mongkut's Institute of  
Technology Ladkrabang

\*Corresponding author E-mail: chuwong.ph@kmitl.ac.th

Received: June 5, 2020 Revised: July 21, 2020 Accepted: July 22, 2020

### บทคัดย่อ

ระบบสายอากาศสวิตช์ลำคลื่นถูกนำเสนอในบทความนี้เพื่อใช้สำหรับโครงข่ายท้องถิ่นไร้สายในช่วงความถี่ 2.4 ถึง 2.5 GHz โดยสายอากาศที่นำเสนอสามารถสวิตช์ลำคลื่นได้ 4 ทิศทาง ครอบคลุม 360 องศา ในระนาบมุมกวาด ระบบสายอากาศนี้ประกอบด้วย องค์ประกอบย่อยที่มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางจัดวางแบบวงกลม สวิตช์ความถี่สูง และ ส่วนประมวลผลซึ่งใช้กระบวนการหาค่าที่เหมาะสมวิธีแบบแมลงหิวปรับปรุงในการควบคุมการสวิตช์ลำคลื่นแบบอัตโนมัติเพื่อหาทิศทางที่แรงที่สุดของสัญญาณ จากผลการออกแบบและทดสอบพบว่าระบบสายอากาศสวิตช์ลำคลื่นนี้มีค่าอินพุตอิมพีแดนซ์เท่ากับ  $50 \Omega$  มีค่า  $|S_{11}|$  น้อยกว่า -10 dB ตลอดช่วงความถี่ใช้งาน สามารถควบคุมการสวิตช์ลำคลื่นด้วยความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังงานเท่ากับ 100 องศา และอัตราขยายเท่ากับ 6 dBi จากนั้นได้ทดสอบใช้งานจริงพบว่าสามารถใช้งานได้กับโครงข่ายท้องถิ่นแบบไร้สาย

**คำสำคัญ:** กระบวนการหาค่าที่เหมาะสม โครงข่ายท้องถิ่นแบบไร้สาย วิธีแบบแมลงหิว สายอากาศสวิตช์ลำคลื่น

### Abstract

This paper proposes switched beam antenna system for wireless local area network operating at 2.4 – 2.5 GHz. The proposed antenna enables switched beam of four directions cover 360 degrees in azimuth plane. This antenna system consists of unidirectional radiation pattern of element in circular array, RF switch and processing unit of MFOA optimization algorithm that is employed to find the maximum signal strength and control the RF switch. From simulated and measured results, the antenna system has an input impedance of  $50 \Omega$ ,  $|S_{11}|$  less than -10 dB along the operating frequency, and can be switchable HPBW of 100 degrees with 6 dBi gain. Finally, the prototype antenna is demonstrated that it can be used with wireless local area network.

**Keywords:** Optimization algorithm, Wireless local area network, Modified fruit fly optimization algorithm (MFOA), Switched beam antenna.

## 1. บทนำ

ในปัจจุบันเทคโนโลยีการติดต่อสื่อสารเริ่มมีความสำคัญมากในชีวิตประจำวันโดยเฉพาะเทคโนโลยีการติดต่อสื่อสารด้วยโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย (Wireless Local Area Network : WLAN) เนื่องจากเป็นเทคโนโลยีที่สามารถทำให้ผู้ใช้งานเข้าสู่ระบบเครือข่ายอินเทอร์เน็ตได้สะดวกและรวดเร็ว อีกทั้งยังมีจำนวนผู้ใช้งานเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ และเนื่องจากจำนวนผู้ใช้งานที่เพิ่มมากขึ้นนี้รวมกับสภาพแวดล้อมการใช้งานที่มักจะอยู่ภายในอาคารทำให้เกิดผลกระทบกับโครงข่ายท้องถิ่นแบบไร้สาย คือ เกิดการแทรกสอด (Interference) ของสัญญาณเป็นผลทำให้ประสิทธิภาพของระบบสื่อสารลดลง [1] จึงได้มีการพัฒนาการออกแบบสายอากาศที่มีลักษณะปรับเปลี่ยนแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นได้เพื่อช่วยแก้ปัญหาดังกล่าวเรียกว่า สายอากาศแถวลำดับปรับลำคลื่น (Adaptive Array Antenna : AAA) หรือ สายอากาศฉลาด (Smart Antenna) สายอากาศชนิดนี้จะทำการปรับเปลี่ยนแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเข้าไปยังกลุ่มผู้ใช้งานและจะปรับจุดกำลังงานศูนย์ (Null) ของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเข้าหาสัญญาณรบกวน ด้วยความสามารถนี้ทำให้ลดระดับของสัญญาณรบกวนและเพิ่มประสิทธิภาพของโครงข่ายท้องถิ่นไร้สายได้ อย่างไรก็ตามสายอากาศชนิดนี้มีความซับซ้อนทั้งทางด้านฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ที่ประกอบไปด้วยหลายส่วนจึงทำให้ราคาต้นทุนค่อนข้างสูง [1] จึงได้มีการพัฒนาสายอากาศที่สามารถปรับเปลี่ยนแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นได้อีกชนิดหนึ่งที่มีความซับซ้อนน้อยกว่าและราคาต้นทุนต่ำกว่าแต่ก็แลกด้วยความสามารถที่ลดลงกว่าเช่นกัน สายอากาศชนิดนี้เรียกว่า สายอากาศสวิตช์ลำคลื่น (Switched Beam Antenna) ซึ่งสายอากาศนี้จะมีลักษณะเป็นสายอากาศมากกว่าหนึ่งองค์ประกอบรวมอยู่ในโครงสร้างเดียวกันและใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ประเภท ฟินไดโอด (PIN Diodes) หรือ สวิตช์อาร์เอฟ (Radio Frequency Switch : RF Switch) ในการควบคุมทิศทางของลำคลื่น โดยได้มีการศึกษาและพัฒนาออกมาหลากหลายรูปแบบดังจะกล่าวในบทความวิจัยที่เกี่ยวข้องดังนี้ [1]-[9]

เริ่มจาก H. Wang และคณะ [1] ได้นำเสนอการออกแบบสายอากาศสวิตช์ลำคลื่นด้วยการใช้สายอากาศแถวลำดับจำนวน 4 องค์ประกอบจัดวางตามแนวนอนสองกลุ่ม คือ กลุ่มตรงกลางและกลุ่มด้านข้างเพื่อช่วยในการปรับรูปร่างของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นประกอบกันเป็นรูปหกเหลี่ยม โดยสามารถปรับลำคลื่นได้ทั้งหมด 6 ทิศทางและปรับรูปร่างของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นได้และในส่วนของการบ่อนสัญญาณใช้โครงข่ายการบ่อนสัญญาณของตัวเชื่อมต่อทิศทาง (Directional Coupler) และตัวหน่วงเฟส (Phase Delay) ถัดมาได้มีการออกแบบสายอากาศสวิตช์ลำคลื่นให้มีรูปร่างโค้งงอเข้ากับอุปกรณ์ที่ทำการติดตั้งได้เรียกว่า สายอากาศสวิตช์ลำคลื่นแบบคงรูป (Conformal Switched Beam Antenna) [2] มีรูปร่างเป็นทรงกระบอกสามารถสวิตช์ลำคลื่นได้ 4 ทิศทางด้วยสวิตช์อาร์เอฟเบอร์ Skyworks SKY13298-360LF ครอบคลุม 360 องศา จากรูปแบบการปรับลำคลื่นด้วยสวิตช์ความถี่สูงได้มีงานวิจัยที่นำเสนอการใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์มาควบคุมสายอากาศปรับลำคลื่นโดยใช้การส่งสัญญาณควบคุมผ่านฟินไดโอด (PIN Diodes) [3] ที่เชื่อมต่อร่วมกับโครงข่ายการบ่อนสัญญาณ พบว่าสามารถควบคุมการสวิตช์ลำคลื่นได้ 4 ทิศทาง

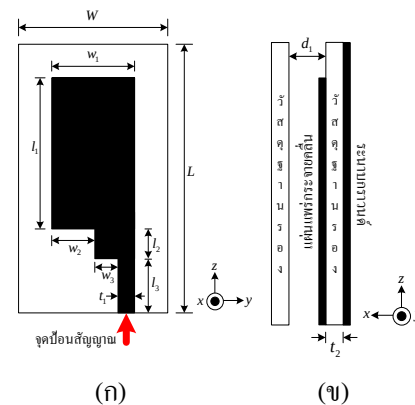
จากนั้นมีการพัฒนาการออกแบบสายอากาศสวิตช์ลำคลื่นเพื่อใช้สำหรับระบบการสื่อสารแบบไร้สายแบบต่างๆ เช่น M.-I. Lai และคณะ [4] ได้มีการนำเสนอสายอากาศแถวลำดับแบบช่องเปิด (Slot Antenna Array) จำนวน 4 องค์ประกอบวางตัวเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสควบคุมการปรับลำคลื่นด้วยฟินไดโอดเบอร์ Infineon BAR64-02V สำหรับใช้ในงานอุปกรณ์การสื่อสารดิจิทัลภายในบ้านสามารถปรับลำคลื่นได้ 8 ทิศทางครอบคลุม 360 องศา ถัดมาเป็นการนำเสนอการออกแบบสายอากาศสวิตช์ลำคลื่นเพื่อใช้ในระบบรับสัญญาณดาวเทียมแบบเคลื่อนที่นำเสนอโดย Basari และคณะ [5] ซึ่งสวิตช์ลำคลื่นด้วยวงจรสวิตช์ร่วมกับชุดหมุนและระบบนำร่องดาวเทียม ถัดมาเป็นการออกแบบเพื่อใช้ในระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่โดยนำเสนอการใช้สายอากาศยาก็แบบแผ่นมาจัดเรียงกันเป็นสายอากาศแถวลำดับเชิงเส้นติดตั้งที่สถานีฐานและทำการ

ปรับลำดับในระนาบมุมกวาด [6] อีกแนวความคิดหนึ่งที่น่าสนใจคือการออกแบบสายอากาศแถวลำดับปรับลำดับมาใช้ในโครงข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย (Wireless Sensor Network) [7] โดยตัวสายอากาศมีลักษณะเป็นวงกลม ภายในมีองค์ประกอบคล้ายกับสายอากาศขาคี จำนวน 8 องค์ประกอบและควบคุมการสวิตช์ลำดับครอบคลุมระนาบมุมกวาด 360 องศา ด้วยพินไดโอดที่ติดตั้งที่จุดป้อนสัญญาณของแต่ละองค์ประกอบ และสุดท้ายเป็นการนำเสนอการออกแบบและใช้สายอากาศสวิตช์ลำดับกับเครือข่ายท้องถิ่นแบบไร้สายและเครือข่ายท้องถิ่นแบบไร้สายที่เป็นแบบ MIMO (Multiple Input Multiple Output) ตามลำดับ [8]-[9] จากบทความที่กล่าวมาพบว่าสายอากาศสวิตช์ลำดับนั้นสามารถที่จะเพิ่มประสิทธิภาพของโครงข่ายการสื่อสารได้อย่างชัดเจนโดยเฉพาะการใช้งานภายในอาคาร

จากบทความวิจัยที่ได้กล่าวมาแล้วนั้นจะเห็นได้ว่าสายอากาศสวิตช์ลำดับนี้ถึงแม้ว่าจะมีความสามารถน้อยกว่าสายอากาศแถวลำดับปรับลำดับ หรือสายอากาศผลาด และมีลักษณะการสวิตช์ลำดับแบบคงที่ แต่ก็สามารถที่จะใช้ในการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบการติดต่อสื่อสารแบบไร้สายได้เป็นอย่างดีด้วยราคาต้นทุนที่ต่ำกว่า ดังนั้นในบทความนี้จึงได้นำเสนอการออกแบบระบบสายอากาศสวิตช์ลำดับเพื่อใช้สำหรับโครงข่ายท้องถิ่นไร้สายที่สามารถปรับเปลี่ยนแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นได้ 4 ทิศทาง ในระนาบมุมกวาดครอบคลุม 360 องศา และใช้กระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบแมลงหิวปรับปรุง (Modified Fruit fly Optimization Algorithm : MFOA) ในการควบคุมการปรับลำดับแบบอัตโนมัติเพื่อหาทิศทางที่แรงที่สุดของสัญญาณ ซึ่งจะสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพและลดสัญญาณรบกวนที่มาในทิศทางที่ไม่ต้องการได้อีกด้วย และในรายละเอียดที่เหลือของบทความนี้จะกล่าวแยกออกเป็นหัวข้อต่างๆ ดังนี้ คือ โครงสร้างของสายอากาศองค์ประกอบย่อยและการจัดวางองค์ประกอบย่อย ระบบสายอากาศสวิตช์ลำดับ ผลการทดสอบ และสรุปผลการออกแบบในส่วนสุดท้าย

## 2. โครงสร้างของสายอากาศองค์ประกอบย่อยและการจัดวางองค์ประกอบย่อย

ในส่วนขององค์ประกอบย่อยจะใช้สายอากาศไมโครสตริบแบบแผ่นสี่เหลี่ยมมีลักษณะการป้อนสัญญาณด้วยสายนำสัญญาณไมโครสตริบและมีวัสดุฐานรองวางเป็นชั้นวางซ้อนอยู่ด้านบน (Superstrate) ด้วยระยะห่างเท่ากับ  $d_1$  ดังแสดงในรูปที่ 1 ในการออกแบบสายอากาศชนิดนี้ได้มีการเริ่มจากสายอากาศไมโครสตริบแบบแผ่นสี่เหลี่ยมกับสตัป (Stub) แบบเดิมที่ใช้ในเอกสารอ้างอิงที่ [10] นำมาเพิ่มวัสดุฐานรองวางเป็นชั้นวางซ้อนด้านบนเพื่อเป็นการช่วยเพิ่มอัตราขยายของสายอากาศขึ้นหลังจากที่ได้ทำการเพิ่มวัสดุฐานรองชั้นวางซ้อนด้านบนแล้วจึงได้ทำการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของสายอากาศเพื่อให้สายอากาศมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่เหมาะสมได้พารามิเตอร์ดังแสดงในตารางที่ 1



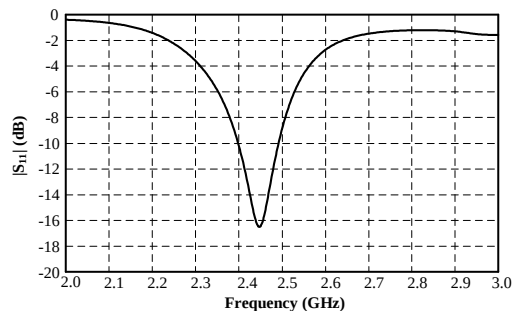
รูปที่ 1 โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริบแผ่นสี่เหลี่ยมร่วมกับชั้นวางซ้อน

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ของสายอากาศไมโครสตริบแผ่นสี่เหลี่ยมร่วมกับชั้นวางซ้อน

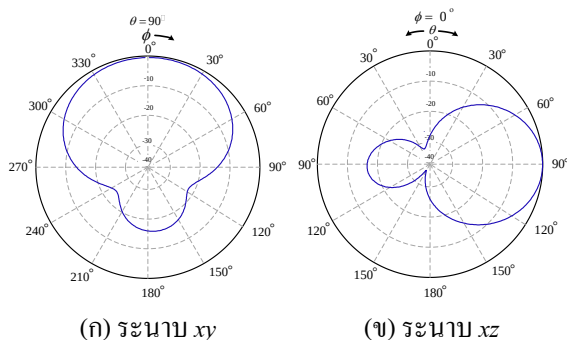
| พารามิเตอร์ของสายอากาศ | ขนาด (mm) | พารามิเตอร์ของสายอากาศ | ขนาด (mm) |
|------------------------|-----------|------------------------|-----------|
| $W$                    | 50        | $l_2$                  | 8         |
| $L$                    | 90        | $l_3$                  | 19        |
| $w_1$                  | 26        | $t_1$                  | 3.2       |
| $w_2$                  | 15.5      | $t_2$                  | 3.2       |
| $w_3$                  | 7.3       | $d_1$                  | 0.1       |
| $l_1$                  | 45        |                        |           |



จากพารามิเตอร์ของสายอากาศไมโครสตริปแผ่นสี่เหลี่ยมร่วมกับชั้นวางซ้อนเมื่อนำไปจำลองในโปรแกรมจำลอง [11] ทำให้ได้คุณสมบัติทางไฟฟ้าดังแสดงในรูปที่ 2 และ 3 ตามลำดับ โดยมีค่า  $|S_{11}|$  น้อยกว่า -10 dB ในช่วงความถี่ 2.4 ถึง 2.48 GHz และที่ความถี่กลาง 2.45 GHz มีค่า  $|S_{11}|$  เท่ากับ -17 dB ในส่วนของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบสี่ทิศทางด้วยอัตราขยายเท่ากับ 6.65 dBi ที่ความถี่ 2.45 GHz เมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่มีชั้นวางซ้อนจะมีค่าอัตราขยายเท่ากับ 5.81 dBi จะเห็นได้ว่ามีอัตราขยายเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากชั้นวางซ้อนและจากผลที่ได้มีความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังงาน (Half Power Beam Width : HPBW) ที่ระนาบ  $xy$  เท่ากับ 100 องศา และที่ระนาบ  $xz$  เท่ากับ 90 องศา



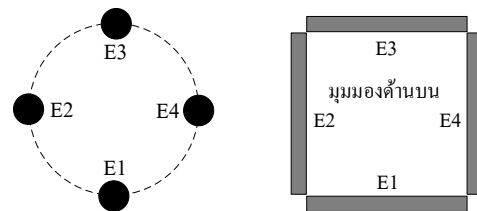
รูปที่ 2  $|S_{11}|$  ของสายอากาศไมโครสตริปแผ่นสี่เหลี่ยมร่วมกับชั้นวางซ้อน



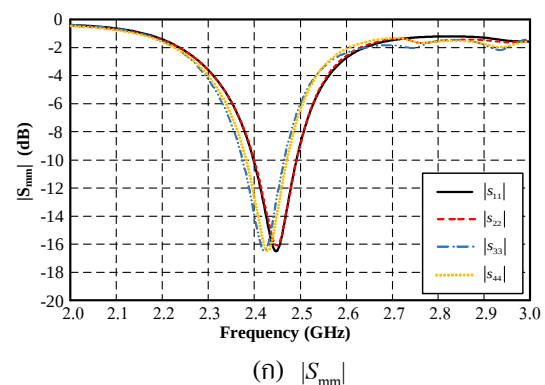
รูปที่ 3 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไมโครสตริปแผ่นสี่เหลี่ยมร่วมกับชั้นวางซ้อน

จากนั้นนำสายอากาศไมโครสตริปแผ่นสี่เหลี่ยมร่วมกับชั้นวางซ้อนมาจัดวางเป็นองค์ประกอบย่อยของสายอากาศแถวลำดับในรูปแบบวงกลมจำนวน 4 องค์ประกอบ ดังแสดงในรูปที่ 4 เมื่อมองจากมุมมองด้านบนจะเห็นได้ว่ารูปแบบของสายอากาศแถวลำดับจะมี

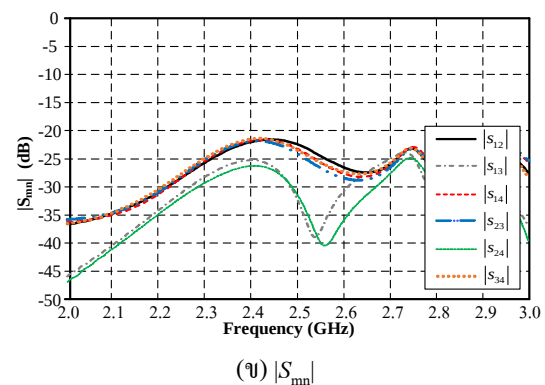
ลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสและเมื่อพิจารณาลักษณะการสวิตช์ลำคลื่นแบบลำคลื่นคงที่ (Fixed Beam) ก็จะเห็นได้ว่าสามารถปรับลำคลื่นได้ 4 ทิศทาง อย่างไรก็ตามเมื่อนำสายอากาศมาวางใกล้กันในลักษณะนี้สิ่งหนึ่งที่จะเกิดขึ้นก็คือ ค่าอิมพีแดนซ์ร่วม (Mutual Impedance) ซึ่งเกิดได้จากสายอากาศที่มีการแพร่กระจายคลื่นใกล้เคียงกันและสถานะแวดล้อมรอบตัวสายอากาศ เป็นต้น จึงเป็นสาเหตุให้ต้องทำการพิจารณาผลกระทบดังกล่าวด้วยพารามิเตอร์กระจาย (Scattering Parameter :  $|S_{mn}|$ )



รูปที่ 4 การจัดวางองค์ประกอบย่อยของสายอากาศแถวลำดับแบบวงกลมจำนวน 4 องค์ประกอบ



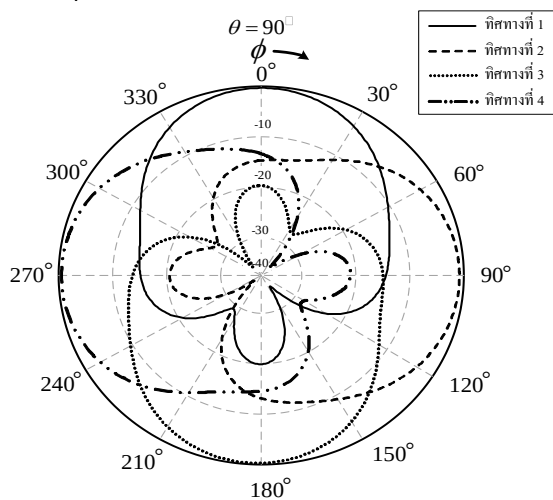
(ก)  $|S_{mn}|$



(ข)  $|S_{mn}|$

รูปที่ 5 ค่าพารามิเตอร์กระจายของสายอากาศแถวลำดับแบบวงกลม 4 องค์ประกอบ

เมื่อพิจารณาค่าพารามิเตอร์กระจายจากรูปที่ 5 พบว่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของการจัดวางสายอากาศ แลวดำดับนั้นมีค่าต่ำกว่า -10 dB ในช่วงความถี่ 2.4 – 2.5 GHz ทั้งหมดซึ่งมีการเลื่อนของช่วงความถี่เล็กน้อยแต่ยังคงอยู่ในช่วงที่พิจารณา ในส่วนของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านพบว่ามีค่าต่ำกว่า -20 dB ตลอดช่วงความถี่ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแต่ละองค์ประกอบเกิดการเชื่อมต่อต่ำและมีค่าอิมพีแดนซ์ร่วมน้อยมาก จากนั้นจึงพิจารณาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแลวดำดับแบบวงกลม เนื่องจากสายอากาศสวิตช์ลำคลื่นที่ได้ออกแบบนี้ทำการสวิตช์ลำคลื่นในระนาบมุมกวาดจึงพิจารณาผลแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเฉพาะในระนาบมุมกวาดเท่านั้นซึ่งแสดงในรูปที่ 6 เป็นแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแลวดำดับแบบวงกลม 4 องค์ประกอบ จากผลของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ได้สายอากาศแลวดำดับแบบวงกลมแสดงให้เห็นว่าสามารถที่จะปรับลำคลื่นได้ครอบคลุม 360 องศา

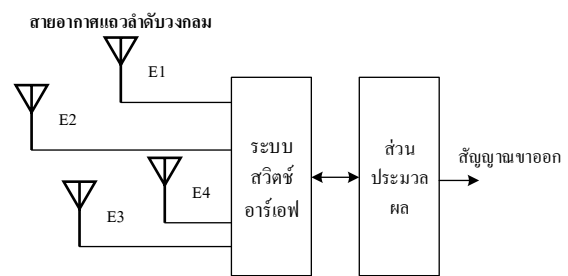


รูปที่ 6 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบมุมกวาดของสายอากาศแลวดำดับแบบวงกลม 4 องค์ประกอบ

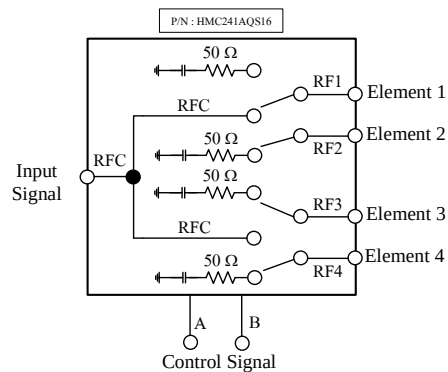
### 3. ระบบสายอากาศสวิตช์ลำคลื่น

รูปที่ 7 แสดงระบบสายอากาศสวิตช์ลำคลื่นด้วยกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบแมลงหวี่ปรับปรุงที่นำเสนอในบทความนี้ประกอบด้วยองค์ประกอบย่อยแบบสายอากาศไมโครสตริปแผ่นสี่เหลี่ยมร่วมกับชั้นวางซ้อน

จำนวน 4 องค์ประกอบใช้ร่วมกับสวิตช์อาร์เอฟ (RF Switch) แบบสวิตช์ 1 ขั้ว 4 ทาง (Single Pole Quad Throw : SP4T) P/N : HMC241AQS16) ควบคุมด้วยสัญญาณดิจิทัลสองระดับคือ ที่ระดับแรงดัน 0 V แทนสถานะบิต “0” และที่ระดับแรงดัน 5 V แทนสถานะบิต “1” ซึ่งสวิตช์อาร์เอฟสามารถควบคุมด้วยสัญญาณดิจิทัลจำนวน 2 บิต โดยสามารถรองรับความถี่สูงสุดได้ถึง 3.5 GHz และลักษณะของระบบสวิตช์อาร์เอฟแสดงในรูปที่ 8 และลักษณะรูปแบบการป้อนสัญญาณเพื่อควบคุมระบบสวิตช์อาร์เอฟแสดงในตารางที่ 2



รูปที่ 7 ระบบสายอากาศสวิตช์ลำคลื่นด้วยกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบแมลงหวี่ปรับปรุง



รูปที่ 8 ระบบสวิตช์ความถี่สูงสำหรับเลือกป้อนสัญญาณแบบสวิตช์ 1 ขั้ว 4 ทาง

ตารางที่ 2 สัญญาณควบคุมของระบบสวิตช์ความถี่สูงสำหรับเลือกป้อนสัญญาณแบบสวิตช์ 1 ขั้ว 4 ทาง

| ลำดับที่ | สัญญาณควบคุมของระบบสวิตช์ (Volts) |   | สัญญาณขาเข้าเชื่อมต่อ |
|----------|-----------------------------------|---|-----------------------|
|          | A                                 | B |                       |
| 1        | 0                                 | 0 | สายอากาศ 1            |
| 2        | 5                                 | 0 | สายอากาศ 2            |
| 3        | 0                                 | 5 | สายอากาศ 3            |
| 4        | 5                                 | 5 | สายอากาศ 4            |

สุดท้ายในส่วนของการประมวลผลใช้ ESP8266 Wemos D1 mini pro ในการควบคุมสายอากาศโดยส่งสัญญาณควบคุมด้วยขา D1 (B) และ D2 (A) และเชื่อมต่อกับระบบสวิตช์อาร์เอฟด้วยจุดเชื่อมต่อสายอากาศภายนอก (External Antenna) จากนั้นการประมวลผลภายในจะใช้กระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบแมลงหิวปรับปรุง [12] ได้โดยพิจารณาวิถีค่ากลิ่นไปในทิศทางที่มีค่าความแรงที่ได้รับได้จากสายอากาศที่มีความแรงที่สุด ( $Smell_i$  สำหรับ MFOA)

จากวิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบแมลงหิวได้พัฒนามาเป็นกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบแมลงหิวปรับปรุง [11] ซึ่งมีการปรับปรุงด้วยการปรับเปลี่ยนจำนวนสมาชิกแบบสุ่มทุกรอบการทำงานและทำการแบ่งกลุ่มสมาชิกออกเป็น 2 กลุ่มเพื่อที่จะใช้หาค่าที่เหมาะสมใน 2 รูปแบบคือ ในพื้นที่ใกล้เคียงและในพื้นที่ห่างไกล จะทำให้กระบวนการค้นหานี้ไม่มีปัญหาการพบค่าที่เหมาะสมปลอมดังแสดงในรูปที่ 9 สามารถแสดงการทำงานในรูปแบบของโปรแกรมได้ดังนี้ [12]

1. กำหนดค่าเริ่มต้นของจำนวนการวนซ้ำ (K)
2. กำหนดค่าเริ่มต้นของกลุ่มสมาชิก (P)
3. กำหนดค่าตำแหน่งเริ่มต้นของพารามิเตอร์  $X$ -axis และ  $Y$ -axis แบบสุ่ม
4. หาค่าทิศทางและระยะห่างสำหรับสมาชิกทุกตัวสำหรับการวนซ้ำรอบแรก

for  $i = 1$  to  $i = P$ ,

กลุ่มที่ 1

$X_i$  = ค่าที่ได้จากการสุ่ม และ  $Y_i$  = ค่าที่ได้จากการสุ่ม

กลุ่มที่ 2

$X_i = X$ -axis + ค่าที่ได้จากการสุ่ม และ

$Y_i = Y$ -axis + ค่าที่ได้จากการสุ่ม

ประมาณค่าระยะห่างและคำนวณค่ากลิ่น smell concentration (S) โดย

$$Dist_i = \sqrt{(X_i^2 + Y_i^2)} \text{ และ } S_i = \text{sign}(\varepsilon) / Dist_i$$

คำนวณค่า  $Smell_i = \text{Function}(S_i)$  และหาค่ากลิ่นที่ดีที่สุด

กำหนดค่ากลิ่นที่ดีที่สุดให้เป็น “bestSmell”

จัดเก็บค่าจุด  $X_i$  และ  $Y_i$  ที่ดีที่สุด

end

5. จากนั้นจะเป็นลำดับการค้นหาโดยเริ่มจากรอบที่ 2 ไปจนถึงรอบสุดท้าย

ปรับจำนวนสมาชิกแบบสุ่ม

หาค่าทิศทางและระยะห่างสำหรับสมาชิกทุกตัว

for  $i = 1$  to  $i = P$ ,

กลุ่มที่ 1

$X_i$  = ค่าที่ได้จากการสุ่ม และ  $Y_i$  = ค่าที่ได้จากการสุ่ม

กลุ่มที่ 2

$X_i = X$ -axis + ค่าที่ได้จากการสุ่ม

และ  $Y_i = Y$ -axis + ค่าที่ได้จากการสุ่ม

ประมาณค่าระยะห่างและคำนวณค่ากลิ่น smell concentration (S) โดย

$$Dist_i = \sqrt{(X_i^2 + Y_i^2)} \text{ และ } S_i = \text{sign}(\varepsilon) / Dist_i$$

คำนวณค่า  $Smell_i = \text{Function}(S_i)$  และหาค่ากลิ่นที่ดีที่สุด

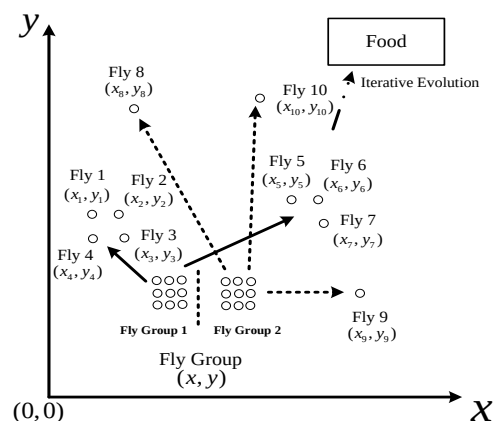
ถ้าค่ากลิ่นที่ดีที่สุด มีค่าดีกว่าค่าเดิมก็จะทำการอัปเดตค่าดังกล่าว

กำหนดค่า  $X$ -axis และ  $Y$ -axis เป็นค่าที่ดีที่สุดอันล่าสุด

จัดเก็บค่าจุด  $X_i$  และ  $Y_i$  ที่ดีที่สุด

end

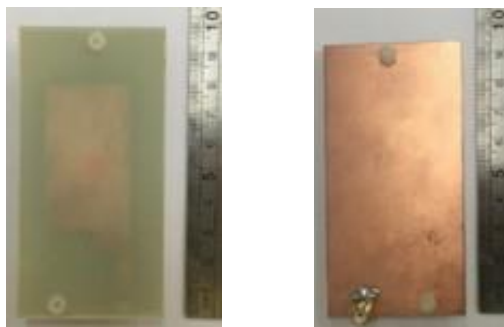
6. ทำซ้ำข้อที่ 5 จนกระทั่งพบค่าที่ดีที่สุดหรือจำนวนค่าการวนซ้ำจบลง



รูปที่ 9 ลักษณะการทำงานของกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบแมลงหิวปรับปรุง

#### 4. ผลการทดสอบระบบสายอากาศสวิตช์ลากลื่น

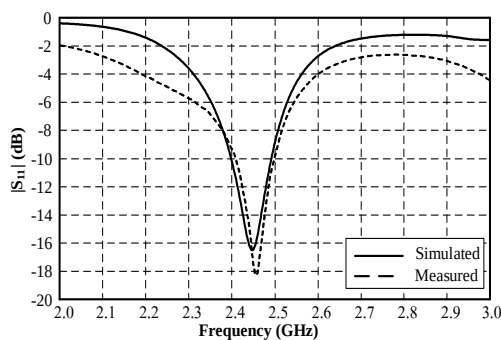
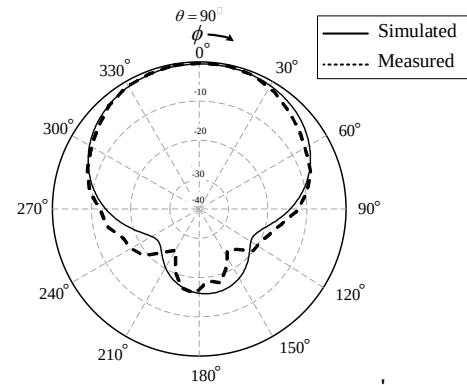
จากผลการจำลองในหัวข้อก่อนนี้ได้นำค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศมาสร้างเป็นสายอากาศต้นแบบจำนวน 4 ตัว เพื่อใช้เป็นองค์ประกอบย่อยของสายอากาศแถวลำดับแบบวงกลมจำนวน 4 องค์ประกอบ ด้วยแผ่นวงจรพิมพ์ชนิด FR4 หนา 3.2 mm ที่มีค่า  $\epsilon_r$  เท่ากับ 4.3 ดังแสดงในรูปที่ 10 ถัดมานำสายอากาศต้นแบบมาทดสอบค่า  $|S_{11}|$  ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 11(ก) จากผลที่ได้พบว่าค่า  $|S_{11}|$  มีค่าน้อยกว่า -10 dB ในช่วงความถี่ 2.4 ถึง 2.5 GHz ซึ่งผลของค่า  $|S_{11}|$  ที่ได้มีความสอดคล้องกับผลการจำลองและถัดมาในรูปที่ 11(ข) แสดงผลการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศต้นแบบพบว่ามีลักษณะเป็นแบบชี้ทิศทางด้วยอัตราขยายเท่ากับ 6 dBi ที่ความถี่ 2.45 GHz และมีโพลาไรซ์แบบเชิงเส้น โดยแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ได้มีความสอดคล้องกับผลการจำลอง



(ก) ด้านหน้า

(ข) ด้านหลัง

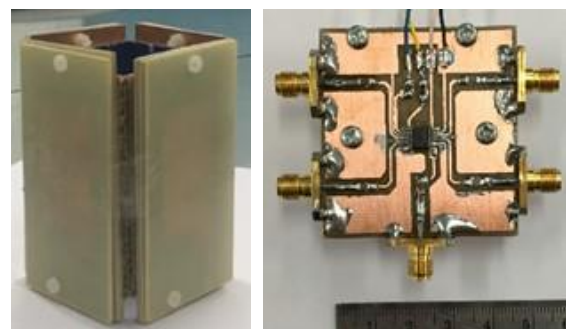
รูปที่ 10 สายอากาศต้นแบบไมโครสตริปแผ่นสี่เหลี่ยมร่วมกับชั้นวางซ้อน

(ก)  $|S_{11}|$ 

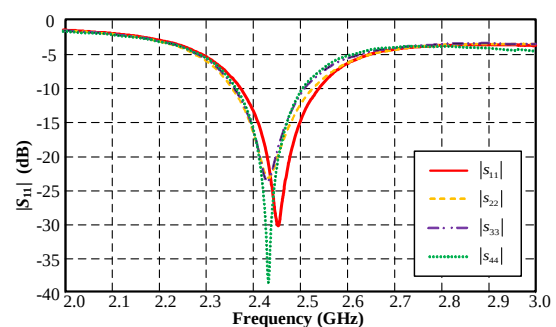
(ข) แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น  
รูปที่ 11 ผลการทดสอบของสายอากาศต้นแบบ

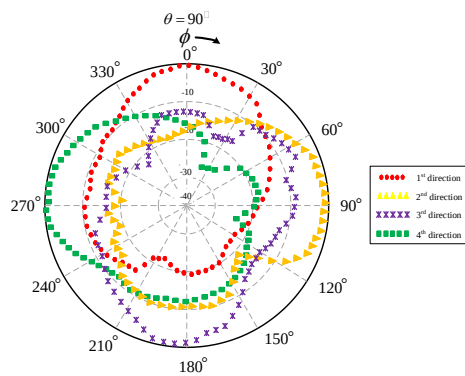
ไมโครสตริปแผ่นสี่เหลี่ยมร่วมกับชั้นวางซ้อน

จากผลการทดสอบของสายอากาศต้นแบบไมโครสตริปแผ่นสี่เหลี่ยมร่วมกับชั้นวางซ้อนจำนวน 4 ตัว พบว่าทุกตัวมีคุณสมบัติเหมือนกันและสอดคล้องกับผลการจำลองทั้งหมด ซึ่งยืนยันได้ว่าสามารถนำไปประกอบเป็นองค์ประกอบย่อยของสายอากาศแถวลำดับวงกลม 4 องค์ประกอบ ได้แล้วจึงได้นำไปประกอบเป็นสายอากาศแถวลำดับวงกลม 4 องค์ประกอบ ร่วมกับระบบสวิตช์อาร์เอฟตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 12 และผลการทดสอบแสดงในรูปที่ 13



รูปที่ 12 การจัดวางองค์ประกอบย่อยของสายอากาศแถวลำดับวงกลมจำนวน 4 องค์ประกอบและระบบสวิตช์อาร์เอฟ

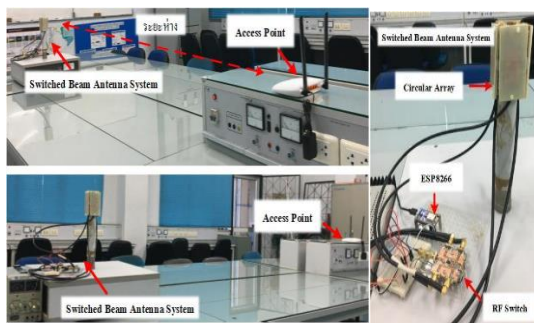
(ก)  $|S_{11}|$



(ข) แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น

รูปที่ 13 ผลการทดสอบของสายอากาศแถวลำดับวงกลม 4 องค์ประกอบ

เมื่อนำทุกส่วนมาประกอบกันเป็นระบบสายอากาศ สวิตซ์ลำคลื่นด้วยกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบแมลง หวีปรับปรุงได้และทำการทดสอบการสวิตซ์ลำคลื่นไปใน ทิศทางที่มีสัญญาณแรงที่สุดในสภาพแวดล้อมภายใน อาคารดังแสดงในรูปที่ 14 ซึ่งในที่นี้จะใช้ Access Point ยี่ห้อ TP link รุ่น TP-WR841N [13] สำหรับส่งสัญญาณที่ ระยะห่าง 4 m และทำการเปลี่ยนจุดส่งสัญญาณไปจำนวน 5 จุด จากผลที่ได้พบว่าระบบสายอากาศสวิตซ์ลำคลื่นได้ สามารถปรับลำคลื่นไปในทิศทางที่ต้องการได้เมื่อตัวส่ง สัญญาณอยู่ในลำคลื่นหลักขององค์ประกอบย่อย แต่ใน กรณีที่ตัวส่งสัญญาณอยู่ระหว่างลำคลื่นหลักของ องค์ประกอบย่อยจะทำให้สายอากาศปรับลำคลื่นเกิดความ ผิดพลาดขึ้นดังแสดงในตารางที่ 3 ทั้งนี้กระบวนการหา ค่าที่เหมาะสมแบบแมลงหวี่ปรับปรุงที่ทำงานภายในระบบ สายอากาศจะใช้เวลาในการค้นหาทิศทางที่ต้องการ ประมาณ 30 วินาที



รูปที่ 14 ระบบสายอากาศปรับลำคลื่นด้วยกระบวนการ หาค่าที่เหมาะสมแบบแมลงหวี่ปรับปรุงและ การทดสอบปรับลำคลื่น

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบระบบสายอากาศสวิตซ์ลำคลื่น ด้วยกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบแมลงหวี่ปรับปรุง

| ลำดับที่ | ตำแหน่งของตัวส่ง สัญญาณ (องศา) | ทิศทางของระบบสายอากาศปรับ ลำคลื่น (องศา) |
|----------|--------------------------------|------------------------------------------|
| 1        | 0                              | 0                                        |
| 2        | 90                             | 90                                       |
| 3        | 180                            | 180                                      |
| 4        | 270                            | 270                                      |
| 5        | 45                             | 90                                       |

## 5. สรุป

ระบบสายอากาศสวิตซ์ลำคลื่นด้วยกระบวนการหาค่าที่ เหมาะสมแบบแมลงหวี่ปรับปรุงสามารถใช้งานในระบบ โครงข่ายท้องถิ่นไร้สายในช่วงความถี่ 2.4 ถึง 2.5 GHz ได้ โดยสายอากาศสามารถสวิตซ์ลำคลื่นได้ 4 ทิศทาง ครอบคลุม 360 องศา ในระนาบมุมกวาด สายอากาศ ดันแบบมีค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ 50  $\Omega$  มีค่า  $|S_{11}|$  น้อยกว่า -10 dB ตลอดช่วงความถี่ใช้งาน และจากผลการสร้างและ ทดสอบระบบสายอากาศพบว่าสามารถปรับลำคลื่นไปใน ทิศทางที่ต้องการได้เมื่อตัวส่งสัญญาณอยู่ในทิศทางของ ลำคลื่นหลักขององค์ประกอบย่อยและจะเกิดความ ผิดพลาดเมื่อตัวส่งสัญญาณอยู่ระหว่างลำคลื่นหลักของ องค์ประกอบย่อย อีกทั้งกระบวนการหาค่าที่เหมาะสม แบบแมลงหวี่ปรับปรุงที่ทำงานภายในสามารถควบคุมการ สวิตซ์ลำคลื่นได้อย่างมีประสิทธิภาพและใช้เวลาในการดู ค้นหาทิศทางที่ต้องการประมาณ 30 วินาที

## 6. เอกสารอ้างอิง

- [1] H. Wang, Z. Zhang, Y. Li and M. F. Iskander, "A Switched Beam Antenna with Shaped Radiation Pattern and Interleaving Array Architecture," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 63, No. 7, pp. 2914 – 2921, July 2015.
- [2] S. Swaisaenyakorn, A. J. Cole, C. C. H. Ng and P. R. Young, "Conformal Switched Beam Antenna," Loughborough Antennas & Propagation Conference (LAPC), pp. 1 – 4, November 2016.

- [3] M. K. A. Rahim, M. N. M. Salleh, O. Ayop and T. Masri, "Switched Beam Antenna System Design," IEEE International RF and Microwave Conference, pp. 302 – 305, December 2008.
- [4] M.-I. Lai, T.-Y. Wu, J.-C. Hsieh, C.-H. Wang and S.-K. Jeng, "Compact Switched-Beam Antenna Employing a Four-Element Slot Antenna Array for Digital Home Applications," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 56, No. 9, pp. 2929 – 2936, September 2008.
- [5] M. F. E. Basari, T. Purnomo, T. Noro, K. Houzen, M. Saito, Takahashi and K. Ito, "Simple Switched-Beam Antenna System for Mobile Satellite Applications," IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, pp. 1 – 4, July 2008.
- [6] 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, Volume 2015, Article ID 278160, pp. 1 – 9, April 2015.
- [7] H. N. Dao, M. Krairiksh and D. T. Le, "A Design of Switched-Beam Yagi-Uda Antenna for Wireless Sensor Networks," International Conference on Advanced Technologies for Communications (ATC), pp. 393 – 396, October 2016.
- [8] P. Chaipanya, P. Rattanakriengkai, P. Potup and L. Lapourailers, "A Dual-Band Single-Feed Switched Beam Antenna for WLAN," International Journal of Electronics and Telecommunications, Vol. 63, No. 4, pp. 405 – 408, September 2017.
- [9] Y. Zhang and K. Psounis, "Consistently High MIMO Rates via Switched-Beam Antennas," IEEE/ACM Transactions on Networking, Vol. 26, No. 5, pp. 2320 – 2333, October 2018.
- [10] S. Kawdungta, P. Jaibanauem, R. Pongga and C. Phongcharoenpanich, "Superstrate-integrated Switchable Beam Rectangular Microstrip Antenna for Gain Enhancement," Radioengineering, Vol. 26, No. 2, pp. 430 – 437, June 2017.
- [11] CST Studio Suite 3D EM Simulation and Analysis Software.
- [12] N. Mhudsongon, C. Phongcharoenpanich and S. Kawdungta, "Modified Fruit Fly Optimization Algorithm for Analysis of Large Antenna Array," International Journal of Antennas and Propagation, vol. 2015, Article ID 124675, 11 pages, March 2015.
- [13] TP Link User Guide, "300Mbps Wireless N Router TL-WR841N," version 14.0.

# การออกแบบสายอากาศแท็กอาร์เอฟไอดีย่านความถี่เอชเอฟ สำหรับใช้งานกับของเหลวในบรรจุภัณฑ์

## Design of UHF RFID Tag Antenna for Packaging Liquid Applications

พรนิวัฒน์ กุมารากาส<sup>1</sup> สันชัย เอียดปราบ<sup>2</sup> รัชชัย พุ่มพวง<sup>3</sup> ชูวงศ์ พงศ์เจริญพาณิชย์<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร

<sup>2</sup>ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ชลบุรี

<sup>3</sup>สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา

Pornniwat Kumankad<sup>1</sup> Sanchai Eardprab<sup>2</sup> Tajchai Pumpoung<sup>3</sup> Chuwong Phongcharoenpanich<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Department of Telecommunications Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand

<sup>2</sup>Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Burapha University, Chonburi, Thailand

<sup>3</sup>Department of Telecommunications Engineering, Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Isan, Nakhon Ratchasima.

\*Corresponding author E-mail: chuwong.ph@kmitl.ac.th

Received: July 5, 2020 Revised: August 20, 2020 Accepted: August 21, 2020

### บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการออกแบบสายอากาศแท็กอาร์เอฟไอดีย่านความถี่เอชเอฟของประเทศไทย 920-925 MHz แบบพาสซีฟสำหรับประยุกต์ใช้งานตรวจจับของเหลวในบรรจุภัณฑ์ โดยสายอากาศแท็กที่ได้ทำการออกแบบนำไปใช้งานร่วมกับชิปวงจรรวม NXP G2XL โครงสร้างของสายอากาศแท็กมีลักษณะเป็นแบบขดวงวน เพื่อลดขนาดทางกายภาพของสายอากาศแท็กและวิธีแมตช์แบบทีเพื่อปรับปรุงการแมตช์อิมพีแดนซ์ สายอากาศแท็กที่นำเสนอมีขนาดกะทัดรัดโดยมีขนาดกว้างและยาวเพียง 21.5 mm × 48.5 mm มีความหนา 0.8 mm ระยะการอ่านไกลที่สุด 4 m ซึ่งแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบรอบทิศทางและมีโพลาไรซ์เชิงเส้น สายอากาศแท็กที่นำเสนอสามารถประยุกต์ใช้งานสำหรับการตรวจจับของเหลวได้เป็นอย่างดี โดยอัตราขยายของสายอากาศแท็กมีการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจนและมีความสัมพันธ์กับระยะการอ่านระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลและสายอากาศแท็ก

**คำสำคัญ:** แท็กพาสซีฟ โพลาไรซ์เชิงเส้น ยูเอชเอฟ รอบทิศทาง อาร์เอฟไอดี

### Abstract

This article presents the design of the RFID tag antenna for national standard at 920-925 MHz. The passive tag is designed for detection liquid in packaging. The tag antenna has been designed with NXP G2XL integrated circuit chip. The structure of meander line is applied to reduce the physical size of the antenna and T-match method is introduced to improve impedance matching. The presented tag antenna is compact with 21.5 mm × 48.5 mm and a thickness of 0.8 mm. The maximum reading range is 4 m. The radiation pattern of tag antenna is omni-directional with linear polarization. The proposed tag antenna can be efficiently applied for liquid detection. The gain of the tag antenna has clearly changed and related to the reading distance between the reader and the tag antenna.

**Keywords:** Passive tag, Linear polarization, Ultra High Frequency (UHF), Omni-directional, Radio Frequency Identification (RFID)

## 1. บทนำ

ปัจจุบันการพัฒนาและความต้องการของเทคโนโลยีอาร์เอฟไอดี กลายเป็นหัวข้อการวิจัยที่ได้รับความนิยมสำหรับทั้งโลกธุรกิจและชีวิตประจำวัน โดยทั่วไปแล้วระบบอาร์เอฟไอดีถูกนำไปประยุกต์ใช้หลายด้าน เช่น ร้านค้าปลีก การขนส่ง โลจิสติกส์ การระบุตัวตนของสัตว์ ผลิตภัณฑ์ และอื่น ๆ อีกมากมาย [1] องค์ประกอบของระบบอาร์เอฟไอดีสามารถแบ่งได้ 3 ส่วนพื้นฐาน ได้แก่ ระบบควบคุม เครื่องอ่านอาร์เอฟไอดีและแท็ก ซึ่งประกอบด้วยชิปวงจรรวมและสายอากาศ โดยแท็กมีหลักการออกแบบที่แตกต่างจากสายอากาศทั่วไป เนื่องจากต้องทำการแมตช์สังยุคกับชิปวงจรรวมและต้องทำการออกแบบให้มีขนาดกะทัดรัด ยิ่งไปกว่านั้นความถี่ในการใช้งานย่านเอชเอฟในแต่ละประเทศมีความแตกต่างกัน เช่น ย่านความถี่ที่ใช้งานในประเทศไทย คือ 920-925 MHz [2] อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติยังคงมีปัญหาที่ไม่สามารถแก้ไขได้ เกี่ยวกับการออกแบบสายอากาศแท็กอาร์เอฟไอดี ในสภาพแวดล้อมที่แตกต่างออกไป เช่น การนำไปใช้งานกับผลิตภัณฑ์ที่มีของเหลวภายในบรรจุภัณฑ์ ดังนั้นการออกแบบสายอากาศแท็กนั้น ควรออกแบบให้มีประสิทธิภาพเหมาะสำหรับการระบุของเหลวภายในบรรจุภัณฑ์ที่ดีที่สุด อิมพีแดนซ์ของสายอากาศแท็กอาร์เอฟไอดีอาจมีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญในสภาพแวดล้อมที่ซับซ้อน เช่น ความแตกต่างของปริมาณของเหลวภายในบรรจุภัณฑ์ หรือการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของบรรจุภัณฑ์ที่นำสายอากาศแท็กไปตรวจจับ รวมถึงค่าสภาพยอมไฟฟ้าสัมพัทธ์ของเหลวภายในบรรจุภัณฑ์

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการออกแบบและการสร้างสายอากาศแท็กแบบพาสซีฟ โดยใช้เทคนิคการแมตช์แบบที เพื่อให้ได้ค่าสังยุคที่ตรงกับสภาพความต้านทานของชิปวงจรรวม โดยมีอิมพีแดนซ์  $15.87 + j148.73 \Omega$  ที่ความถี่ 922.5 MHz ใช้โครงสร้างการขดลวดเพื่อลดขนาดทางกายภาพของสายอากาศแท็ก ซึ่งข้อกำหนดที่สำคัญในการออกแบบ คือ อิมพีแดนซ์ของสายอากาศแท็กต้องแมตช์สังยุคกับอิมพีแดนซ์ของชิปวงจรรวม

สำหรับการถ่ายโอนกำลังงานสูงสุดจากสายอากาศแท็กไปยังชิปวงจรรวม จากนั้นศึกษาวิธีการที่เหมาะสมที่สุดในการออกแบบสายอากาศแท็กและงานวิจัยที่มีมาก่อนซึ่งประกอบไปด้วยวิธีการแมตช์แบบที เพื่อใช้ในการปรับอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแท็กและวิธีการขดลวดเพื่อใช้ในการลดขนาดทางกายภาพของสายอากาศแท็ก โดยวิธีการดังกล่าวถูกใช้เป็นวิธีการในการออกแบบสายอากาศแท็กที่น่าเสนอ แล้วนำวิธีการดังกล่าวมาศึกษาวิเคราะห์และออกแบบสายอากาศแท็กด้วยโปรแกรมจำลองทางคอมพิวเตอร์ โดยมุ่งเน้นให้พารามิเตอร์  $|S_{11}|(\text{dB})$  ของสายอากาศต่ำกว่าหรือเท่ากับ  $-10 \text{ dB}$  ตลอดช่วงความถี่ใช้งานของระบบอาร์เอฟไอดีของประเทศไทย จากนั้นนำค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศแท็กที่ดีที่สุดจากการออกแบบมาประยุกต์ใช้งานโดยการวางบนบรรจุภัณฑ์ที่มีของเหลวบรรจุไว้อยู่ ซึ่งของเหลวที่ใช้ในกรณีศึกษา คือ น้ำที่มีค่าสภาพยอมไฟฟ้าสัมพัทธ์เท่ากับ 78 และทำการศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์ของสายอากาศแท็กกับของเหลวภายในบรรจุภัณฑ์

## 2. การออกแบบสายอากาศแท็ก

จากการจำลองโดยโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ เริ่มต้นจากการออกแบบโดยใช้วิธีการแมตช์แบบที หลังจากนั้นทำให้สายอากาศแท็กมีขนาดกะทัดรัดด้วยการใช้วิธีขดลวดและในขั้นตอนสุดท้าย คือ การหาค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดสำหรับการออกแบบสายอากาศแท็ก ในการออกแบบสายอากาศแท็กอาร์เอฟไอดีนั้นจำเป็นต้องออกแบบสายอากาศเพื่อให้แมตช์สังยุคกับอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของชิปวงจรรวม โดยเลือกใช้ชิปวงจรรวมของบริษัท NXP รุ่น G2XL เป็นตัวถัง TSSOP8 [3] โดยคุณลักษณะแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 คุณลักษณะของชิปวงจรรวม

| คุณลักษณะ           | รุ่น NXP G2XL     |
|---------------------|-------------------|
| ความถี่ใช้งาน       | 860 MHz – 960 MHz |
| ความจุไฟฟ้าด้านเข้า | 1.16 pF           |
| ตัวประกอบคุณภาพ     | 9.37              |



อิมพีแดนซ์คุณลักษณะของชิปวงจรรวมที่ใช้ในการออกแบบสายอากาศแท็ก (Z) สามารถแทนได้ดังนี้

$$Z = R + jX \quad (1)$$

เมื่อ  $R$  คือ ความต้านทานที่อยู่ในรูปของจำนวนจริง และ  $X$  คือ ความต้านทานอยู่ในรูปจำนวนจินตภาพ หรือรีแอคแตนซ์ สำหรับการหาอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของวงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรม สามารถหาได้จากตัวประกอบเชิงคุณภาพของชิปวงจรรวมดังนี้

$$R = \frac{1}{\omega QC} \quad (2)$$

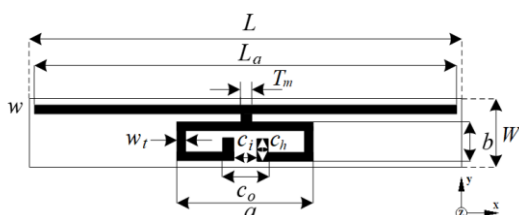
เมื่อ  $Q$  คือ ตัวประกอบคุณภาพ และ  $C$  คือ ความจุไฟฟ้า จากสมการคุณสมบัติอิมพีแดนซ์ด้านเข้า สามารถหาค่ารีแอคแตนซ์ ( $X$ ) ดังนี้

$$X = -j \frac{1}{\omega C} \quad (3)$$

ดังนั้นการคำนวณจากสมการข้างต้นจะได้ค่าอิมพีแดนซ์ของชิปวงจรรวมเท่ากับ  $15.87-j148.73 \Omega$  เพราะฉะนั้นการแมตช์สัญญาณจะได้อิมพีแดนซ์ของสายอากาศแท็กที่ต้องการออกแบบ คือ  $15.87+j148.73 \Omega$

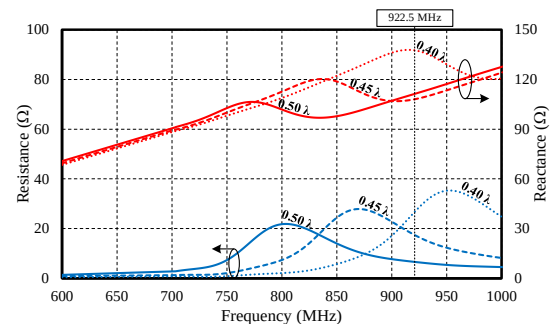
## 2.1 การออกแบบด้วยการแมตช์แบบที

สายอากาศไดโพลกับโครงสร้างแมตช์แบบที (Tag#1) แสดงดังรูปที่ 1 เมื่อ  $a$  และ  $b$  คือ ความกว้างและความยาวของโครงสร้างแมตช์แบบที โดยโครงสร้างเริ่มต้นของสายอากาศแท็กกำหนดให้  $a = 0.04\lambda$  และ  $b = 7.5 \text{ mm}$  ขณะที่  $c_i$ ,  $c_o$  และ  $c_w$  คือ พารามิเตอร์ขนาดของชิปวงจรรวมมีขนาด 3 mm 7 mm และ 4 mm ตามลำดับ พารามิเตอร์  $w$  และ  $L_a$  คือ ความกว้างและความยาวของสายอากาศไดโพล ส่วนพารามิเตอร์  $W$  และ  $L = L_a + 1$  คือ ความกว้างและความยาวของแผ่นวงจรพิมพ์ ขณะที่  $T_m$  คือ ความกว้างของจุดเชื่อมต่อโครงสร้างแมตช์แบบทีและไดโพล [4]



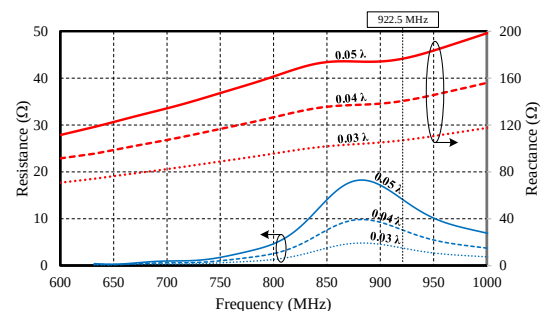
รูปที่ 1 โครงสร้างสายอากาศไดโพลกับวิธีการแมตช์แบบที (Tag#1)

เบื้องต้นปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์  $L_a$  เป็นอันดับแรกเพื่อศึกษาผลการเปลี่ยนแปลงความถี่ที่เรโซแนนซ์ของสายอากาศแท็ก จากรูปที่ 2 สังเกตได้ว่าถ้าลดความยาว  $L_a$  ทั้งความต้านทานและรีแอคแตนซ์จะมีค่าเพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2 เมื่อ  $L_a = 0.45\lambda$  มีอิมพีแดนซ์เป็น  $16.95+j108.30 \Omega$  ที่ความถี่ 922.5 MHz ซึ่งใกล้เคียงกับอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแท็กมากที่สุด



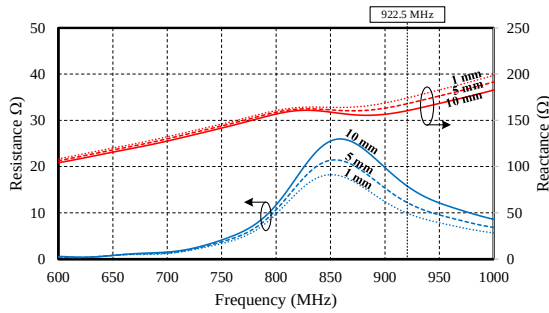
รูปที่ 2 ผลการจำลองอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแท็กกับวิธีการแมตช์แบบที โดยปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์  $L_a$

ทำการปรับค่าพารามิเตอร์  $a$  จากรูปที่ 3 สังเกตได้ว่าการเพิ่มพารามิเตอร์  $a = 0.03\lambda$  ถึง  $a = 0.05\lambda$  ทำให้ค่าความต้านทานและค่ารีแอคแตนซ์เพิ่มขึ้นด้วย ดังนั้นพารามิเตอร์  $a = 0.04\lambda$  มีอิมพีแดนซ์ใกล้เคียงกับค่าที่ต้องการ คือ  $7.43+j140.74 \Omega$  ที่ความถี่ 922.5 MHz



รูปที่ 3 ผลการจำลองอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไดโพลกับการแมตช์แบบที โดยปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์  $a$

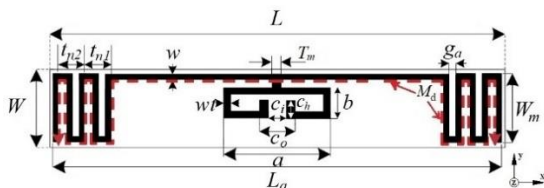
การปรับเปลี่ยนระยะความยาวของพารามิเตอร์  $T_m$  คือ 1 mm 5 mm และ 10 mm (รักษานขนาดทางกายภาพไว้ให้ใกล้เคียงกับพารามิเตอร์  $a$  สำหรับการชดเชยเพื่อลดขนาดทางกายภาพในลำดับถัดไป) และจากรูปที่ 4 สังเกตว่าพารามิเตอร์  $T_m$  มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของอิมพีแดนซ์สายอากาศ โดยพบว่าเมื่อค่าความต้านทานสูงขึ้นแต่ค่ารีแอคแตนซ์ลดลง ซึ่งอิมพีแดนซ์ที่เหมาะสมที่สุด คือ  $17.28+j158.74 \Omega$  เมื่อ  $T_m = 10 \text{ mm}$



รูปที่ 4 ผลการจำลองอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไดโพล กับวิธีการแมตซ์แบบที โดยปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์  $T_m$

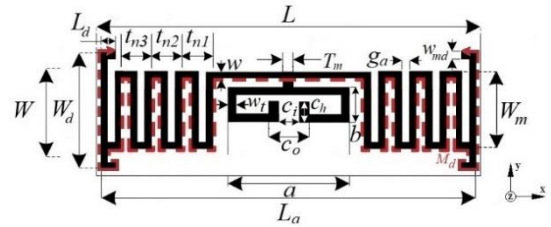
## 2.2 การออกแบบด้วยวิธีขดวงวน

วิธีการขดวงวน คือ การลดขนาดของสายอากาศแท็ก เพื่อให้มีขนาดกะทัดรัดและเป็นการลดขนาดทางกายภาพของสายอากาศโดยที่ยังคงความยาวทางไฟฟ้าไว้เท่าเดิม โดยเริ่มต้นระยะความยาวทางไฟฟ้าโดยรวมที่มีค่าอิมพีแดนซ์ใกล้เคียงกับที่ต้องการ มีค่า  $L_d = 0.45\lambda$  ที่ความถี่ 922.5 MHz ตามที่ได้มีการศึกษาจากหัวข้อก่อนหน้า โดยกำหนดให้ระยะห่างระหว่างรอบการขดวงวน  $g_d = 1$  mm และความกว้างของขดรอบที่ 1 และ 2 คือ  $t_{n1}$  และ  $t_{n2}$  เท่ากับ 4 mm เมื่อทำการขดวงวนระยะความยาวโดยรวมของสายอากาศไดโพล จากพารามิเตอร์  $L_d$  เปลี่ยนเป็นพารามิเตอร์  $M_d$  ซึ่งต้องการทำการขดวงวนสายอากาศไดโพล จำนวน 2 รอบครึ่ง ให้ได้ระยะความยาวทางไฟฟ้าโดยรวม  $M_d = 0.45\lambda$  ดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 โครงสร้างสายอากาศไดโพลขดวงวนเริ่มต้น กับวิธีการแมตซ์แบบที (Tag#2)

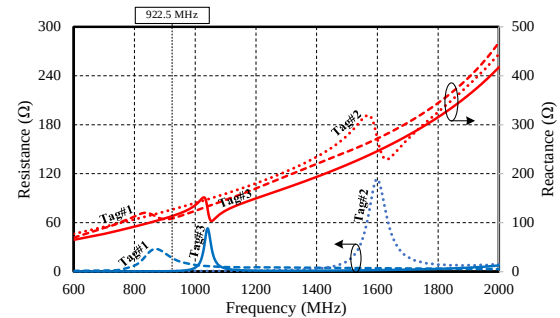
ลำดับต่อมา ทำการปรับพารามิเตอร์  $M_d$  ให้มีความยาวมากขึ้น เพื่อใช้ปรับความถี่เรโซแนนซ์ให้กลับมาด้านความถี่ที่ต่ำกว่าให้ตรงกับความถี่ที่ต้องการออกแบบ โดยทำการขดวงวนสายอากาศไดโพลเพิ่มเป็น 3 รอบครึ่ง และเพิ่มระยะความยาวสุดท้ายของสายอากาศไดโพล คือ พารามิเตอร์  $W_d = 20.5$  mm และ  $L_d = 2$  mm โดยมีความกว้าง  $w_{md} = 1$  mm จะได้ระยะความยาวทางไฟฟ้าโดยรวม  $M_d = 0.8\lambda$  ดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 โครงสร้างสายอากาศไดโพลขดวงวน

กับวิธีการแมตซ์แบบที (Tag#3)

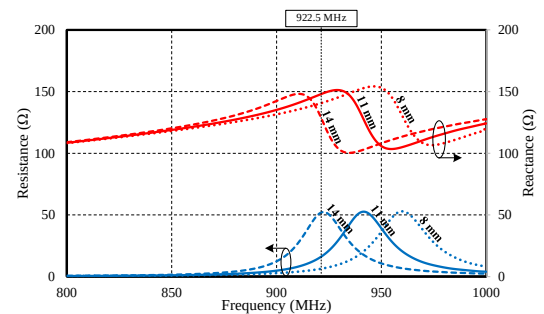
จากการจำลองโครงสร้างสายอากาศไดโพล (Tag#2) สังเกตว่าความถี่เรโซแนนซ์เปลี่ยนแปลงไปทางความถี่สูง และเมื่อทำการจำลองโครงสร้างสายอากาศไดโพล (Tag#3) สังเกตว่าความถี่เรโซแนนซ์เปลี่ยนแปลงกลับมายังความถี่ต่ำ แต่ยังไม่ใกล้เคียงกับอิมพีแดนซ์ที่ต้องการ ดังแสดงในรูปที่ 7



รูปที่ 7 ผลการจำลองการขดวงวนของสายอากาศไดโพล

กับวิธีการแมตซ์แบบที (Tag#1, Tag#2 และ Tag#3)

จากผลการจำลองของโครงสร้างสายอากาศไดโพล ด้วยวิธีการขดวงวนตามที่ได้กล่าวมาข้างต้น สังเกตได้ว่าค่าอิมพีแดนซ์ยังไม่ใกล้เคียงกับที่ต้องการ ดังนั้นจึงทำการเพิ่มความกว้าง  $w_{md} = 2$  mm และปรับพารามิเตอร์  $L_d$  คือ 8 mm 11 mm และ 14 mm ดังแสดงในรูปที่ 8 สังเกตได้ว่าที่  $L_d = 11$  mm มีค่าอิมพีแดนซ์ใกล้เคียงกับที่ต้องการ คือ  $19.06 + j147.18 \Omega$  ที่ความถี่ 922.5 MHz

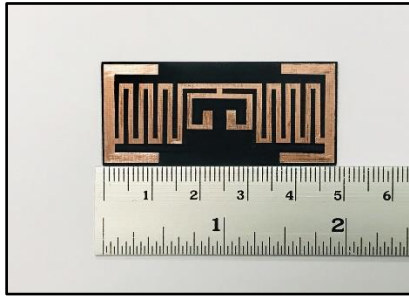


รูปที่ 8 ผลการจำลองอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไดโพล

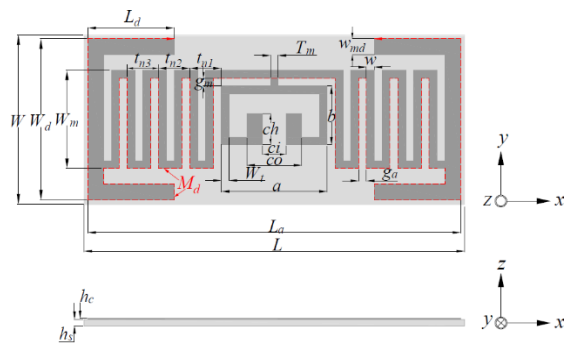
กับวิธีการแมตซ์แบบที โดยปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์  $L_d$

### 3. การสร้างและทดสอบสายอากาศแท็ก

สายอากาศแท็กสร้างขึ้นจากแผ่นวงจรพิมพ์ มีวัสดุฐานรองเป็นชนิด FR4 ความหนาวัสดุฐานรอง 0.8 mm ความหนาทองแดง 0.035 mm และค่าสภาพยอมไฟฟ้าสัมพัทธ์เท่ากับ 4.3 ซึ่งขนาดโดยรวมของสายอากาศแท็กคือ  $21.5 \text{ mm} \times 48.5 \text{ mm}$  ดังแสดงในรูปที่ 9 และ 10 สำหรับขนาดทั้งหมด ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2



รูปที่ 9 สายอากาศแท็กย่านความถี่ยูเอชเอฟ สำหรับระบบอาร์เอฟไอดี



รูปที่ 10 โครงสร้างของสายอากาศแท็กที่ออกแบบ

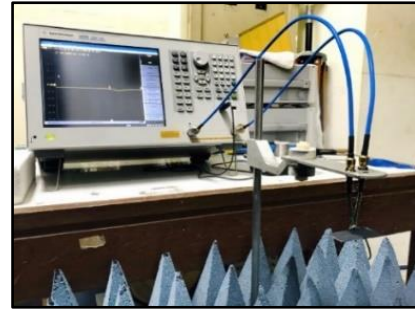
ตารางที่ 2 พารามิเตอร์ของสายอากาศแท็ก

| พารามิเตอร์ | ขนาด (mm) | พารามิเตอร์       | ขนาด (mm) |
|-------------|-----------|-------------------|-----------|
| $a$         | 13.5      | $M_d$             | 315.5     |
| $b$         | 7.5       | $T_m$             | 1.0       |
| $g_a$       | 1.0       | $t_{n1} - t_{n3}$ | 4.0       |
| $H_s$       | 0.8       | $W_d$             | 20.5      |
| $L_a$       | 47.5      | $W$               | 21.5      |
| $L$         | 48.5      | $W_t$             | 1.0       |
| $L_d$       | 11.0      | $W_m$             | 12.5      |
| $g_m$       | 1.0       | $W_{md}$          | 2.0       |
| $h_s$       | 0.8       | $h_c$             | 0.035     |

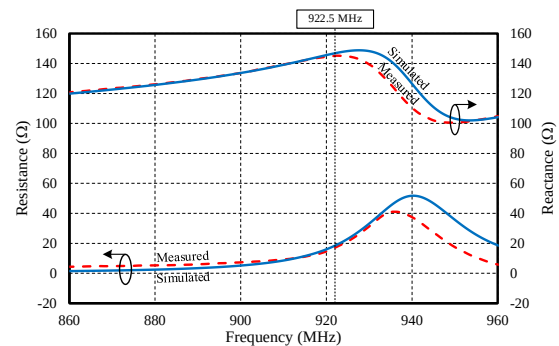
#### 3.1 การทดสอบสายอากาศแท็ก

การทดสอบพารามิเตอร์ของสายอากาศแท็ก โดยใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย ยี่ห้อ Agilent รุ่น E5061B กับโพรบแบบคิฟเฟอร์เนเชิล ดังแสดงในรูปที่ 11 ซึ่งผล

การจำลองและการทดสอบอิมพีแดนซ์และ  $|S_{11}|$  (dB) ของสายอากาศแท็ก ดังแสดงในรูปที่ 12 และ 13 ตามลำดับ

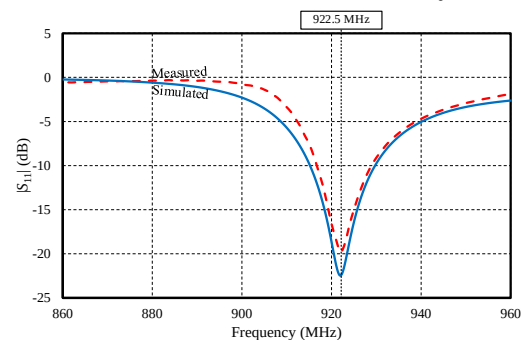


รูปที่ 11 รูปสภาวะการทดสอบอิมพีแดนซ์สายอากาศแท็ก จากผลการจำลองอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแท็ก สังเกตได้ว่าอิมพีแดนซ์จากการจำลองและการทดสอบมีแนวโน้มใกล้เคียงกัน โดยอิมพีแดนซ์จากการจำลองและการทดสอบ คือ  $19.06 + j147.18 \Omega$  และ  $17.84 + j145.19 \Omega$  ที่ความถี่ 922.5 MHz ดังแสดงในรูปที่ 12



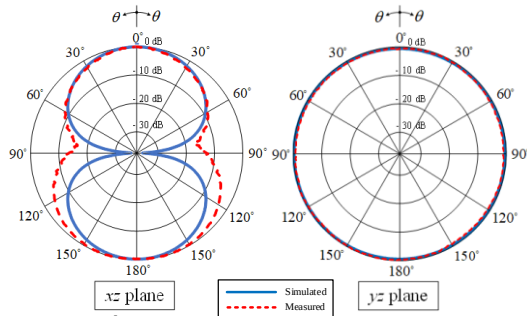
รูปที่ 12 ผลการจำลองและทดสอบอิมพีแดนซ์

ผลการจำลอง  $|S_{11}|$  (dB) ของสายอากาศแท็กสังเกตได้ว่าพารามิเตอร์  $|S_{11}|$  (dB) จากการจำลองและการทดสอบโดยพิจารณา  $|S_{11}|$  (dB) ต่ำสุด คือ -22.08 dB และ -19.31 dB ที่ความถี่ 922.5 MHz ตามลำดับ และ  $|S_{11}|$  (dB) ต่ำกว่าหรือเท่ากับ -10 dB คือ ความถี่ 916-929 MHz และความถี่ 918-927 MHz ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 13



รูปที่ 13 ผลการจำลองและทดสอบ  $|S_{11}|$  (dB)

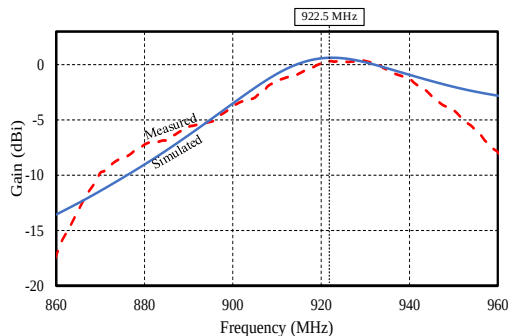
ในขณะที่ผลจากการจำลองและทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบ  $XZ$  และ  $YZ$  ที่ความถี่ 922.5 MHz ซึ่งมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบรอบทิศทาง ดังแสดงในรูปที่ 14



รูปที่ 14 ผลการจำลองและทดสอบแบบรูป

การแพร่กระจายคลื่น พิจารณาที่ความถี่ 922.5 MHz

ทดสอบระยะการอ่านในห้องไร้การสะท้อนเพื่อป้องกันสัญญาณรบกวน ด้วยเครื่องอ่านข้อมูลและสายอากาศอาร์เอฟไอดี รุ่น ALR-9780 และ รุ่น ARL-9610-AL ตามลำดับ ซึ่งมีอัตราขยายของสายอากาศส่งเท่ากับ 5.90 dBi จากการทดสอบระยะการอ่านได้มากที่สุดประมาณ 4 m และอัตราขยายของสายอากาศแท็กจากการจำลองและการทดสอบที่ความถี่ 922.5 MHz คือ 0.63 dBi และ 0.29 dBi ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 15

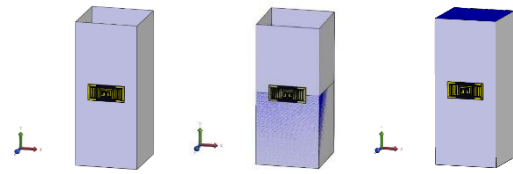


รูปที่ 15 ผลการจำลองและทดสอบอัตราขยาย

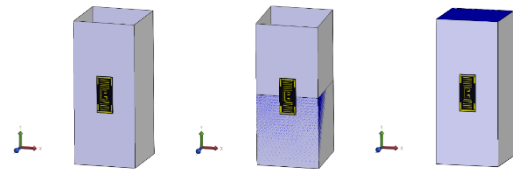
#### 4. การประยุกต์ใช้งานสายอากาศแท็ก

การจำลองสายอากาศแท็กในการตรวจจับของเหลวเบื้องต้น โดยจำลองตรวจจับของเหลวในบรรจุภัณฑ์แบบขวดพลาสติกที่มีขนาดโดยรวม 85 mm × 190 mm โดยของเหลวที่ทำการทดสอบ คือ น้ำที่มีค่าสภาพยอมไฟฟ้าสัมพัทธ์เท่ากับ 78 [5]–[6] ในการจำลองตรวจจับของเหลวในบรรจุภัณฑ์มีการตรวจจับอยู่ 3 สถานะ คือ ไม่มีน้ำ น้ำครึ่งบรรจุภัณฑ์ และน้ำเต็มบรรจุภัณฑ์ ใน

ลักษณะการวาง คือ แนวตั้งและแนวนอนบนบรรจุภัณฑ์ ดังแสดงในรูปที่ 16



(ก) วางสายอากาศแท็กแนวนอนบนบรรจุภัณฑ์

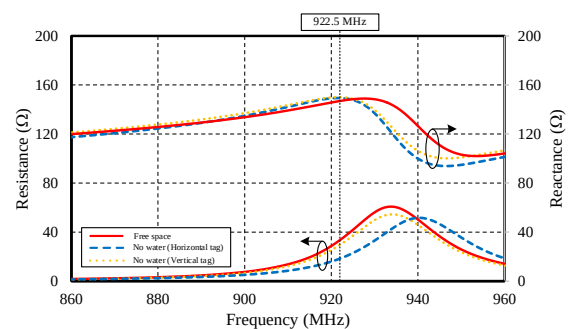


(ข) วางสายอากาศแท็กแนวตั้งบนบรรจุภัณฑ์

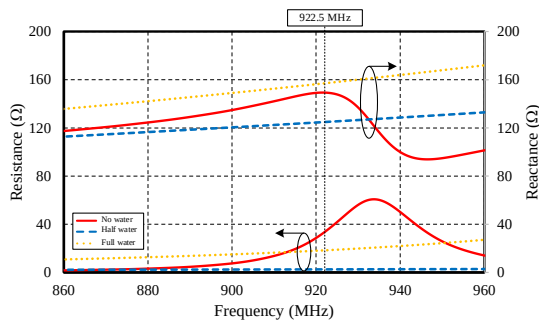
รูปที่ 16 ลักษณะการวางสายอากาศแท็กบนบรรจุภัณฑ์ที่มีของเหลว เพื่อจำลองประสิทธิภาพการส่งผ่านกำลังงาน

#### 4.1 อิมพีแดนซ์ของสายอากาศแท็กบนบรรจุภัณฑ์ที่มีของเหลว

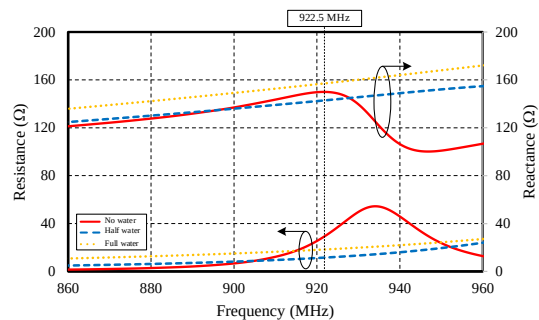
จากผลการจำลองอิมพีแดนซ์ แล้วนำมาเปรียบเทียบเมื่อสายอากาศแท็กอยู่ในอากาศและอยู่บนบรรจุภัณฑ์ ทั้งการวางแนวนอนและแนวตั้ง ในขณะที่ไม่มีของเหลวภายในขวดบรรจุภัณฑ์ อิมพีแดนซ์มีค่าเปลี่ยนแปลงไปเล็กน้อย เนื่องจากค่าสภาพยอมไฟฟ้าสัมพัทธ์ของขวดบรรจุภัณฑ์ที่เปลี่ยนไป แสดงในรูปที่ 17 และในขณะที่มีของเหลวภายในขวดบรรจุภัณฑ์ครึ่งขวดและเต็มขวดนั้น ทำให้ค่าสภาพยอมไฟฟ้าสัมพัทธ์ยิ่งมากขึ้นตามปริมาณของเหลว ทำให้อิมพีแดนซ์มีค่าเปลี่ยนแปลงห่างจากอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแท็กบนอากาศมากขึ้นตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 18 และ 19



รูปที่ 17 อิมพีแดนซ์ของสายอากาศแท็กจากการจำลองในอากาศและบนบรรจุภัณฑ์



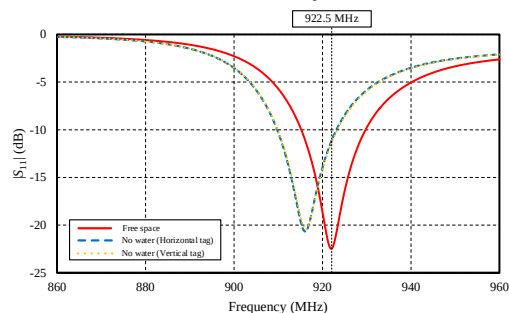
รูปที่ 18 ผลการจำลองอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแท่ง โดยวางสายอากาศแท่งแนวอนบนบรรจุก้นท์



รูปที่ 19 ผลการจำลองอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแท่ง โดยวางสายอากาศแท่งแนวตั้งบนบรรจุก้นท์

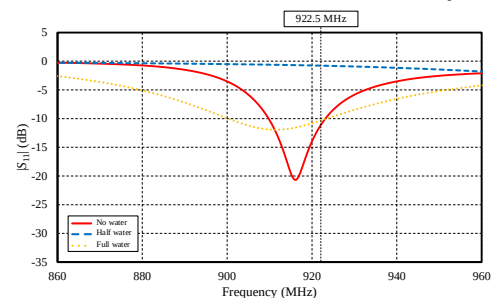
#### 4.2 พารามิเตอร์ $|S_{11}|$ (dB) ของสายอากาศแท่งบนบรรจุก้นท์ที่มีของเหลว

การจำลองหาค่าพารามิเตอร์  $|S_{11}|$  (dB) แล้วนำผลมาเปรียบเทียบ เมื่อสายอากาศแท่งอยู่ในอากาศและอยู่บนขวดบรรจุก้นท์ในขณะที่ไม่มีการเติมของเหลวภายในขวด สังเกตได้ว่าความถี่เรโซแนนซ์เปลี่ยนแปลงไปทางความถี่ที่ต่ำกว่า เนื่องจากค่าสภาพยอมไฟฟ้าสัมพัทธ์ของขวดบรรจุก้นท์ที่เปลี่ยนไป ซึ่งค่า  $|S_{11}|$  (dB) เมื่อสายอากาศแท่งอยู่บนอากาศ และวางแนวอนและแนวตั้งบนบรรจุก้นท์ เท่ากับ -22.08 dB -10.99 dB และ -11.20 dB ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 20



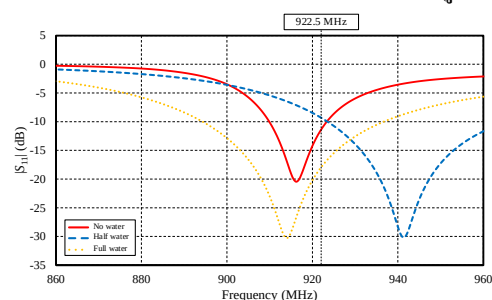
รูปที่ 20 ผลการจำลอง  $|S_{11}|$  (dB) ของสายอากาศแท่งในอากาศและบนบรรจุก้นท์

ทำการจำลองหาค่า  $|S_{11}|$  (dB) ของสายอากาศแท่งบนบรรจุก้นท์ 3 สถานะ โดยวางสายอากาศแท่งแนวอนบนบรรจุก้นท์ สังเกตเห็นว่าที่สถานะน้ำครึ่งขวด ค่าพารามิเตอร์  $|S_{11}|$  (dB) สูงกว่า -10 dB เนื่องจากระดับผิวน้ำมีความสูงเท่ากับครึ่งสายอากาศไดโพลพอดี ทำให้สนามไฟฟ้าไม่สามารถแพร่กระจายคลื่นได้ต่อเนื่องและแทรกสอดไปในผิวน้ำได้ ส่งผลให้อิมพีแดนซ์ของสายอากาศแท่งบนอากาศกับบนขวดบรรจุก้นท์ที่มีของเหลวครึ่งขวดต่างกันมาก และที่สถานะน้ำเต็มขวดความถี่เรโซแนนซ์ไม่เปลี่ยนแปลง ซึ่งมีค่า  $|S_{11}|$  (dB) ที่สถานะไม่มีน้ำ น้ำครึ่งขวด น้ำเต็มขวด เท่ากับ -10.99 dB -0.72 dB และ -10.31 dB ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 21



รูปที่ 21 ผลการจำลอง  $|S_{11}|$  (dB) ของสายอากาศแท่ง โดยวางสายอากาศแท่งแนวอนบนบรรจุก้นท์

ทำการจำลองหาค่า  $|S_{11}|$  (dB) ของสายอากาศแท่งบนบรรจุก้นท์ 3 สถานะ โดยวางสายอากาศแท่งแนวตั้งบนบรรจุก้นท์ สังเกตเห็นว่าที่สถานะน้ำครึ่งขวด ความถี่เรโซแนนซ์เปลี่ยนแปลงไปทางความถี่ที่สูงกว่า เนื่องจากระดับผิวน้ำมีความสูงเท่ากับครึ่งความยาวทางไฟฟ้าโดยรวมของสายอากาศไดโพล และที่สถานะน้ำเต็มขวดความถี่เรโซแนนซ์ไม่เปลี่ยนแปลง ซึ่งมีค่า  $|S_{11}|$  (dB) ที่สถานะไม่มีน้ำ น้ำครึ่งขวด น้ำเต็มขวด เท่ากับ -11.20 dB -9.39 dB และ -17.79 dB ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 22

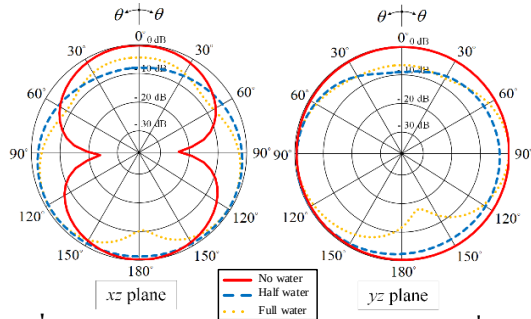


รูปที่ 22 ผลการจำลอง  $|S_{11}|$  (dB) ของสายอากาศแท่ง โดยวางสายอากาศแท่งแนวตั้งบนบรรจุก้นท์

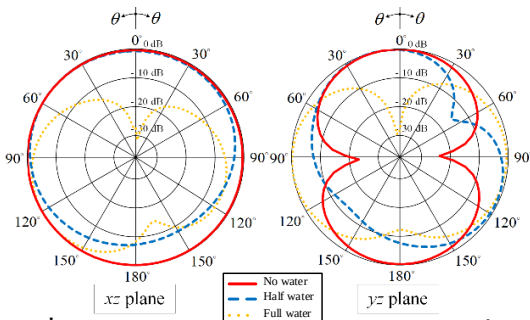


#### 4.3 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ แท่งบนบรรจุภัณฑ์ที่มีของเหลว

จากการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแท่งสำหรับตรวจจับของเหลวในบรรจุภัณฑ์ระนาบ  $xz$  และ  $yz$  ที่ความถี่ 922.5 MHz ดังแสดงในรูปที่ 23 และ 24



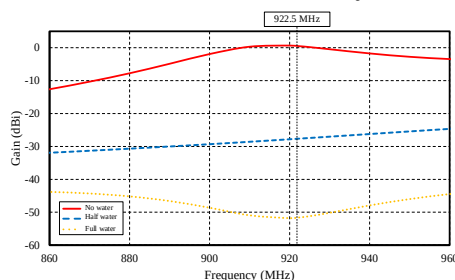
รูปที่ 23 ผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแท่ง เมื่อวางแนวนอนบนบรรจุภัณฑ์



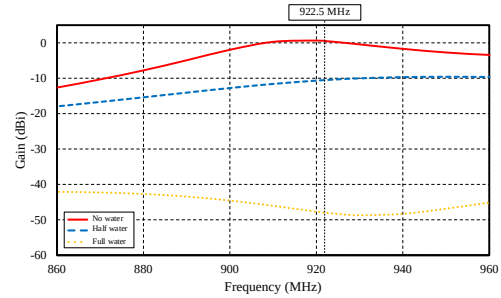
รูปที่ 24 ผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแท่ง เมื่อวางแนวตั้งบนบรรจุภัณฑ์

#### 4.4 อัตราขยายของสายอากาศแท่งบนบรรจุภัณฑ์ที่มีของเหลว

จากการจำลองจะเห็นว่า การตรวจจับแบบไม่มีน้ำในบรรจุภัณฑ์ ทั้งการวางสายอากาศแท่งรูปแบบแนวนอนและแนวตั้งมีอัตราขยายที่ใกล้เคียงกัน นอกเหนือจากนั้นจะมีอัตราขยายที่แตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 25 และ 26



รูปที่ 25 ผลการจำลองอัตราขยายของสายอากาศแท่งโดยวางสายอากาศแท่งแนวนอนบนบรรจุภัณฑ์



รูปที่ 26 ผลการจำลองอัตราขยายของสายอากาศแท่งโดยวางสายอากาศแท่งแนวตั้งบนบรรจุภัณฑ์

#### 4.5 ระยะการอ่านข้อมูลของสายอากาศแท่งบนบรรจุภัณฑ์ที่มีของเหลว

สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับเชิงซ้อน ( $\Gamma$ ) เขียนได้ดังนี้

$$\Gamma = \frac{Z_a - Z_c}{Z_a + Z_c} \quad (4)$$

เมื่อ  $Z_a$  คือ อิมพีแดนซ์ของสายอากาศแท่ง  $Z_c$  คือ อิมพีแดนซ์ของชิปวงจรรวม [6] โดยสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ ( $\tau$ ) สามารถหาได้ดังนี้

$$\tau = 1 - |\Gamma|^2 \quad (5)$$

ระยะการอ่านระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลและสายอากาศแท่งนั้นถูกจำกัดด้วยความถี่ในการใช้งานและอัตราขยายของสายอากาศ โดยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ส่งโดยสายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูลจะแพร่กระจายคลื่นไปยังสายอากาศแท่งและในช่วงเวลาหนึ่งสายอากาศแท่งจะแพร่กระจายคลื่นกลับมายังสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูล ซึ่งระยะการอ่านมากที่สุดของสายอากาศแท่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 6

$$R = \frac{\lambda}{4\pi} \sqrt{\frac{\text{EIRP} \times G_{\text{tag}} \times \tau \times \text{PLF}}{P_{\text{tag}}}} \quad (6)$$

ระยะการอ่านระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลและสายอากาศแท่งในอากาศ ทดสอบได้มากที่สุด 4 m แล้วนำค่าระยะการอ่านมาคำนวณหาค่ากำลังงานของสายอากาศแท่งที่ส่งกลับมายังเครื่องอ่านข้อมูลได้เท่ากับ 0.192 W โดยเครื่องอ่านข้อมูลพิจารณากำลังงานที่ 4 W EIRP ตามมาตรฐานของประเทศไทย โดยปราศจากการสูญเสียโพลาไรซ์ (ตามการจำลองสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลและสายอากาศแท่งมีโพลาไรซ์ตรงกัน) จากนั้นใช้

ค่ากำลังงานของสายอากาศแท่งในอากาศที่คำนวณได้เป็นค่าอ้างอิง เพื่อหาระยะการอ่านของสายอากาศแท่งตามสถานะต่าง ๆ โดยใช้สมการที่ 6 ได้ดังนี้

**ตารางที่ 3** ระยะการอ่านที่คำนวณได้ โดยวางสายอากาศแท่งแนวนอนบนบรรจุภัณฑ์

| สถานะ                | $\tau$ | $G_{\text{tag}}$ (dBm) | $R$ (m) |
|----------------------|--------|------------------------|---------|
| ไม่มีน้ำ             | 0.87   | 0.46                   | 3.67    |
| มีน้ำครึ่งบรรจุภัณฑ์ | 0.18   | -27.62                 | 0.07    |
| มีน้ำเต็มบรรจุภัณฑ์  | 0.94   | -51.57                 | 0.00    |

**ตารางที่ 4** ระยะการอ่านที่คำนวณได้ โดยวางสายอากาศแท่งแนวตั้งบนบรรจุภัณฑ์

| สถานะ                | $\tau$ | $G_{\text{tag}}$ (dBm) | $R$ (m) |
|----------------------|--------|------------------------|---------|
| ไม่มีน้ำ             | 0.90   | 0.45                   | 3.74    |
| มีน้ำครึ่งบรรจุภัณฑ์ | 0.94   | -10.47                 | 1.08    |
| มีน้ำเต็มบรรจุภัณฑ์  | 0.94   | -48.03                 | 0.00    |

จากตารางที่ 3 และ 4 สังเกตได้ว่า ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับนั้นมีค่าใกล้เคียงกันแสดงว่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแท่งในการตรวจจับของเหลวภายในบรรจุภัณฑ์ที่สถานะต่าง ๆ แตกต่างกัน ไม่มาก แต่จะมีเพียงการวางสายอากาศแท่งแนวนอนบนบรรจุภัณฑ์ที่สถานะน้ำครึ่งขวดที่มีสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับนั้นมีค่าน้อยมาก อาจเป็นเพราะการวางแท่งในแนวนอนมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นไม่เหมาะสมกับปริมาณน้ำที่มีครึ่งขวดบรรจุภัณฑ์ ทั้งนี้เมื่อดูพารามิเตอร์อัตราขยายของสายอากาศก็มีความสอดคล้องกับสถานะที่มีการตรวจจับของเหลวทั้ง 3 สถานะ

## 5. สรุป

บทความนี้ได้นำเสนอการออกแบบสายอากาศแท่งย่านความถี่เอชเอฟสำหรับการประยุกต์ใช้งานในระบบอาร์เอฟไอดี ซึ่งสายอากาศที่ได้ทำการออกแบบใช้การแมตช์แบบทีเพื่อปรับอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแท่งเพื่อให้เหมาะสมกับชิปวงจรรวมและการขดขวนเพื่อลดขนาดทางกายภาพของสายอากาศแท่ง โดยสายอากาศแท่งครอบคลุมการใช้งานระบบอาร์เอฟไอดีช่วงความถี่ 918-927 MHz พิจารณาที่  $|S_{11}|$  (dB) ต่ำกว่าหรือเท่ากับ

-10 dB แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นรอบทิศทาง อัตราขยายเท่ากับ 0.29 dBi และระยะการอ่านมากที่สุด 4 m เมื่อนำสายอากาศแท่งมาประยุกต์ใช้งานตรวจจับของเหลวในบรรจุภัณฑ์ ปรากฏว่าสายอากาศแท่งสามารถตอบสนองต่อของเหลวได้ดี สังเกตได้จากอัตราขยายของสายอากาศแท่งมีการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจน เมื่อนำค่าอัตราขยายของสายอากาศแท่งมาคำนวณหาค่าระยะการอ่านระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลและสายอากาศแท่ง สังเกตว่าระยะการอ่านมีความสัมพันธ์กับอัตราขยายของสายอากาศแท่ง ทั้ง 3 สถานะ ในรูปแบบการวางสายอากาศแท่งแนวนอนและแนวตั้งบนบรรจุภัณฑ์ และเมื่อเปรียบเทียบค่าอิมพีแดนซ์และ  $|S_{11}|$  (dB) สังเกตว่าการวางสายอากาศแท่งแนวตั้งบนขวดบรรจุภัณฑ์สามารถแยกสถานะของเหลวในขวดบรรจุภัณฑ์ได้ชัดเจนกว่าการวางสายอากาศแท่งแนวตั้งบนขวดบรรจุภัณฑ์

## 6. เอกสารอ้างอิง

- [1] K. Finkenzer, RFID Handbook, John Wiley and Sons, 2003.
- [2] D. Dobkin, The RF in RFID Passive UHF in Practice, Elsevier, 2008.
- [3] NXP Semiconductors, July 2020. [Online]. Available: [https://www.nxp.com/docs/en/data-sheet/SL3ICS1002\\_1202.pdf](https://www.nxp.com/docs/en/data-sheet/SL3ICS1002_1202.pdf).
- [4] T. Pumpoung, "Design of UHF Tag Antenna for Wideband RFID System," Ph.D. dissertation, Dept. Telecommunication Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand, 2015.
- [5] Y. Zhang, L. Li, Y. Lu, Y. Zhang and H. Liu, "High Performance UHF RFID Tag Antennas on Liquid Filled Bottles," Progress In Electromagnetics Research, vol. 165, pp. 83-92, 2019.
- [6] A. Rida, L. Yang, and M. Tentzeris, RFID-Enabled Sensor Design and Applications, Artech House, 2010.

# Green Synthesis and Characterization of Carbon Nanotubes from Water Hyacinth Via Chemical Vapor Deposition

Suparat Sasrimuang<sup>a</sup>, Oranat Chuchuen<sup>a,b</sup>, Apichart Artnaseaw<sup>a\*</sup>

<sup>a</sup>Department of Chemical engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University,  
Khon Kaen 40002, Thailand

<sup>b</sup>Excellence in Medical Innovation and Technology Research Group, Faculty of Medicine,  
Khon Kaen University, Khon Kaen 40002, Thailand

\*Corresponding author: aapich@kku.ac.th

Received: July 9, 2020 Revised: August 28, 2020 Accepted: September 2, 2020

## Abstract

Carbon nanotubes (CNTs) were found to have formed during chemical vapor deposition (CVD) process of water hyacinth as green and renewable source without adding catalysts at a relatively low temperature of 700 °C. Acetylene was employed as a carbon source. Scanning electron microscopy (SEM) results showed that the CNTs formed over the bio-char of water hyacinth. The energy dispersive X-Ray fluorescence spectrometer (EDX) showed the silicon and alumina existing elements in water hyacinth, indicating that these elements played a key role as a catalyst for CNTs formation. Transmission electron microscopy (TEM) revealed that the diameter and length of CNTs were ~ 46 nm and 200~300 nm, respectively. Moreover, the microstructure of CNTs synthesized was bamboo-like CNTs structure and a d-spacing of 0.34 nm. The high degree of crystallization and high thermal stabilization were reported by Raman spectroscopy and thermal gravimetric analysis (TGA). Conclusively, this work provides the green and sustainable to synthesis CNTs and add-value of the useless weed into high-value products as CNTs.

**Keywords:** Carbon nanotubes, Water hyacinth, Chemical vapor deposition, bamboo-like carbon nanotubes, Green synthesis

## 1. Introduction

Water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) is a native plant in Brazil and Ecuador regions. Nowadays, it's abundantly found in the tropical and subtropical regions. Water hyacinth was presented as an invasive plant due to a higher rate growing even in the worse condition ecology. The serious effect of massive water hyacinths is irrigation, navigation, power generation, and ecology [1]. Recently, various research groups have studied controlling and sustainable disposal routes of water hyacinth such as the production of bioenergy, production of fertilizer, paper production, as well as wastewater treatment aspect [2-6].

Currently, Carbon nanotubes (CNTs) have been increasingly attractive materials due to remarkable properties, for example, lightweight, high thermal stability, high surface area, including high thermal conductivity [7-8]. It was applied in numerous works such as composite materials, energy storage, absorbing pollution,

sensors, and catalysts. CNTs were synthesized by well-known methods include arc discharge, laser ablation, and chemical vapor deposition (CVD). Among these methods, CVD is outstanding due to low cost, easy to operate, and low synthesized temperature [9]. Generally, the CVD method is required both the catalyst as a transition metal (i.e. Ni, Co, Fe) and substrates namely quartz and silicon oxide for CNTs formation. However, many researchers have attempted to synthesize CNTs from bio-base materials, which were renewable, sustainable, eco-friendly, as well as low cost.

Yu et al. [10] reported that they synthesized CNTs on bio-char of pine nutshell via microwave-assisted CVD method with Ni catalyst. The results showed that the optimum temperature for CNTs growth was at 600 °C. Nissayan and Artnaseaw [11] demonstrated that the multi-wall carbon nanotubes (MWCNTs) were synthesized using silkworm cocoons as a substrate via the CVD method. Ferrocene and acetylene were used as catalysts and carbon



sources, respectively. Moreover, Araga and Sharma [12] also reported that the MWCNTs were produced by coconut shell derived charcoal pyrolyzed at 900 °C. Acetylene was used as a carbon source, and plasma-enhanced chemical vapor deposition (PECVD) was conducted to synthesize MWCNTs. It can be seen that bio-based biomass is more attractive to CNTs production because of not only their outstanding properties, but also the green synthesis and sustainable aspect. However, the synthesized CNTs from water hyacinth via the CVD method without adding catalysts have not been reported yet in previous literature. Therefore, the aim of this study was to synthesize of CNTs from water hyacinth via chemical vapor deposition at relatively low temperatures at 700 °C without adding any external catalyst. A carbon source was acetylene gas. The obtained CNTs were characterized by scanning electron microscopy (SEM), transmission electron microscope (TEM), energy dispersive X-Ray fluorescence spectrometer (EDX), thermogravimetric analysis (TGA), Raman spectroscopy, and X-ray diffraction (XRD) techniques. Moreover, feasible applications of the synthesized CNTs were also described.

## 2. Materials and Methods

### 2.1 Preparation of water hyacinth

Water hyacinth (WH) was collected from the pond in Khon Kean University, Khon Kean, Thailand. It was washed by deionized (DI) water to remove the grime and then introduced to hot air oven at 105 °C for 24 hours to eliminate moisture. Afterward, it was crushed and sieved into powder in the size range of 2-2.36 mm (denoted as DWH) [13]. The element composition of DWH was evaluated by EDX as summarized in Table 1.

### 2.2 Synthesis of CNTs

The CVD reactor, employed for the synthesis of CNTs, consisted of a horizontal quartz tube furnace with a diameter of 4.5 cm and a length of 62 cm placed in an electric furnace. Acetylene was used as a carbon source. First, the DWH in the ceramic boat was placed in the middle of the furnace. Then, nitrogen (N<sub>2</sub>) was

purged at flowrate 150 ml/min for 30 min to eradicate oxygen. Suddenly, the furnace was turned on to 450 °C, together with the feed of hydrogen at a flowrate of 200 ml/min, and maintained for 1 h to remove the moisture. At the same time, lignin, cellulose, and hemicellulose were also eliminated. The bio-char of WH was obtained from this stage. Second, the temperature was increased to 700 °C, and acetylene was introduced into the system for 15 min with a flow rate of 50 ml/min as a carbon source to promote the CNTs formation. Finally, the CNTs were produced, the furnace was then turned off and cool down to room temperature [14].

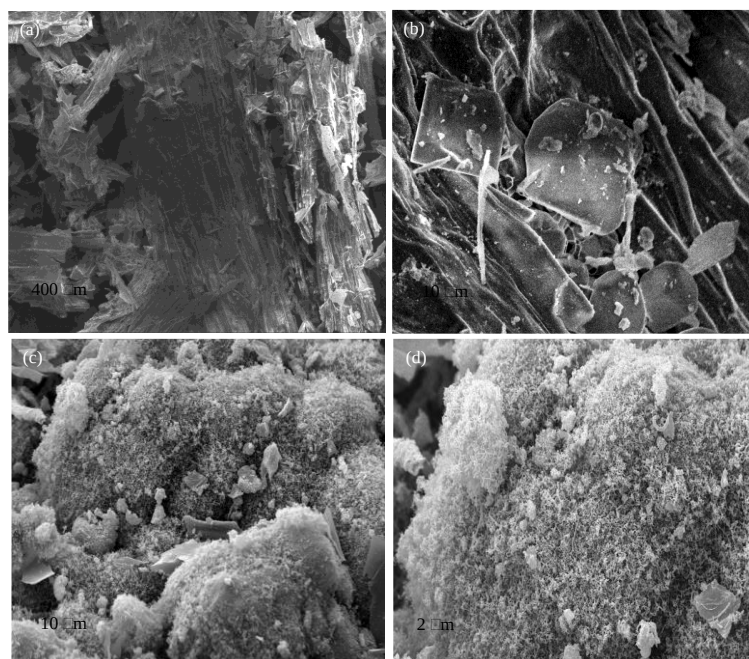
### 2.3 Characterization of CNTs

The surface morphology and micro structure of CNTs were examined by scanning electron microscopy (SEM) transmission electron microscope (TEM). The energy dispersive X-Ray fluorescence spectrometer (EDX) was introduced to investigate the element composition of DWH and synthesized CNTs. The degree of crystallization, thermal stabilization, including purity of CNTs were observed by Raman spectroscopy, and X-ray diffraction (XRD), and thermogravimetric analysis (TGA) instrument.

## 3. Results and Discussion

### 3.1 Morphology and microstructure of CNTs

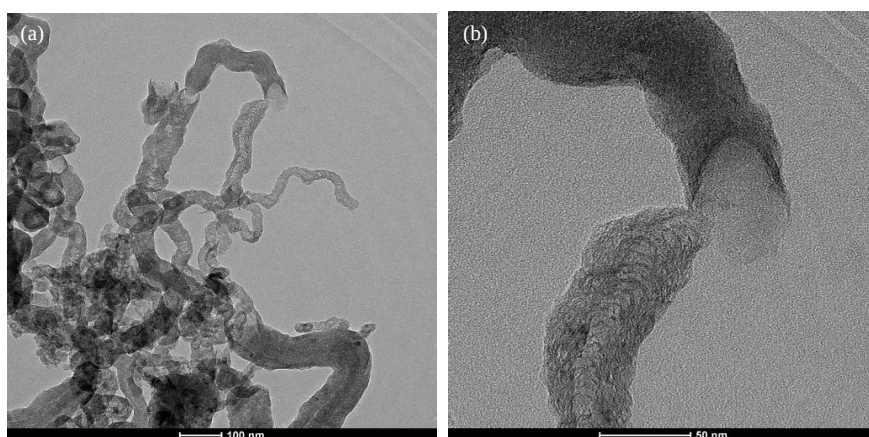
Figure 1 presents the surface of bio-char water hyacinth after carbonization at temperature 450 °C. It can be seen that the surface was rough with board porosity. The indented and porosity of the bio-char surface were obtained, implying that the lignin, cellulose, and hemicellulose were eliminated from water hyacinth. After the synthesis process at 700 °C, the CNTs were distributed over the surface of bio-char of water hyacinth, as shown in Figure 1. (c) and (d). The obtained CNTs were formed dense, entangle, including overlapping noodle-like. Generally, the main element compositions in water hyacinth are silica (Si), alumina (Al), as well as iron (Fe) (Table 1). It could be concluded that these element in water hyacinth can act as catalysts, by postulating the large site for CNTs nucleation, corresponding with previous works by Zhu et al. [12] and Araga and Sharma [15].



**Figure 1.** (a) low and (b) high magnification of SEM images of bio-char surface of water hyacinth at temperature 450 °C, and (c) low and (d) high magnification CNTs formation over the bio-char surface of water hyacinth

TEM images in Figure 2 results reveals that the obtained CNTs were hollow and tubular tubes with open-end. Figure 2 (a) illustrates that the CNTs seemed tangled like noodles, consistent with the SEM results. The average diameter and length of CNTs were 46 nm and 200~300 nm, respectively. Figure 2 (b) shows that the CNTs had a multi-wall structure with the bamboo-like structure, namely the internal structure was hollow and had wrinkles curve that separated

hollows like a bamboo structure. It was confirmed by the curvature and compartment inside the CNTs hollow. Besides, the d-spacing of CNTs was approximately 0.34 nm, which was similar to the pure graphite (0.3354 nm). This result indicated that the synthesized CNTs were turbostratic carbon in nature, i.e. the disorderly rearrangement of graphitic carbon order to form tubular CNTs [16].



**Figure 2.** (a) TEM images of CNTs and (b) TEM image of bamboo-like CNTs structure.

**Table 1** Element component of DWH and obtained CNTs by EDX (%wt)

|      | C     | Si    | Al    | O    | Fe   |
|------|-------|-------|-------|------|------|
| DWH  | 28.72 | 31.5  | 18.63 | 17.2 | 3.95 |
| CNTs | 64.21 | 14.19 | 13.47 | 6.37 | 1.76 |

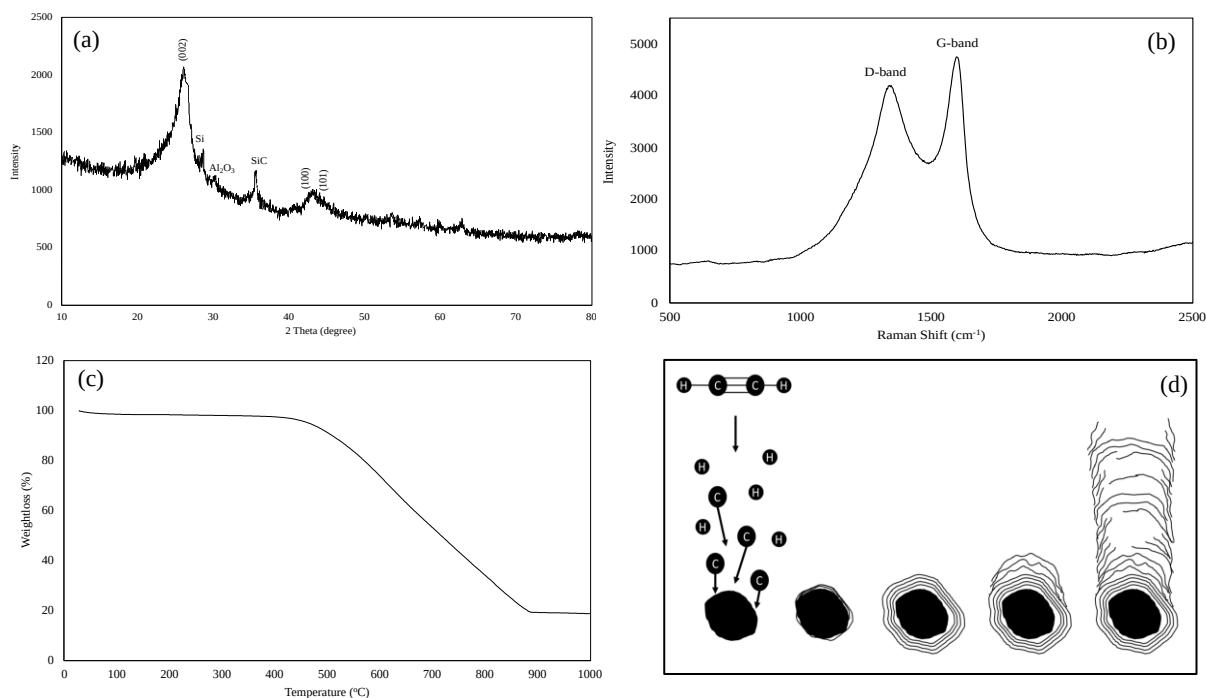
In this case, the growth mechanism of CNTs as bamboo-like structure was proposed in three stages as shown in Figure 3 (d). In the first stage, the carbon source (i.e.,  $C_2H_2$ ) was decomposed to break the bond into a single carbon atom. Second, a single carbon atom was diffused and dissolved into the surface of either catalyst or carbon on bio-char water hyacinth, leading to a saturated stage. Third, it was precipitated as a graphitic cap covering the catalyst. The graphitic cap was eventually lifted off due to the stress accumulation of the driving force, producing the hollow bamboo-like structure. Finally, CNTs were formed by growth direction elongated from the nucleation site [14].

### 3.2 Structure characterization of CNTs

The structure and the degree of crystallization of CNTs were investigated by XRD and Raman spectroscopy, respectively. The obtained CNTs were characterized by the XRD technique, which was shown in Figure 3 (a). It reveals that the XRD pattern at peaks  $2\theta = 26.2^\circ$ ,  $43^\circ$ , and  $44^\circ$ , corresponding to graphite plane (002), (100), and (101), respectively [10]. Moreover, the other peaks around  $2\theta = 28.7^\circ$ ,  $30.8^\circ$ , and  $35.6^\circ$  could be attributed to Si,  $Al_2O_3$ , and SiC, respectively, in agreement with previous study by Kim et al. [17]. The presences of Si and Al were vital as a catalyst for CNTs formation,

consistent with the EDX result in Table 1. The d-spacing was obtained by Bragg's law about 0.34 nm, corresponding well with d-spacing from TEM results.

Raman spectroscopy has been widely used to characterize the degree of crystallization. Two sharp peaks were observed nearby  $1354\text{ cm}^{-1}$  (D-band) and  $1605\text{ cm}^{-1}$  (G-band) as shown in Figure 3 (b). The D-band is attributed to the disordered, namely the defect of graphitic plane that formed the CNTs. On the other hand, G-band is the motion of  $SP^2$ -carbon atom [18]. Quality of the synthesized CNTs (i.e., carbon order) could be assessed by the ratio of D-band to G-band intensity ( $I_D/I_G$ ). In this work, the  $I_D/I_G$  value of CNTs was approximately  $0.885 \pm 0.044$ , comparable to previous studied by Sasrimuang et al. [14] indicating high degree of crystallization. Figure 3 (c) demonstrates the TGA curve of CNTs. It was employed to estimate the thermal stability and purity of CNTs. TGA result shows two stages of degradation; 20-450  $^\circ\text{C}$  and 450-900  $^\circ\text{C}$  with the weight loss of 5 % and 76.47 %, respectively. The first stage of degradation was moisture evaporation. The second stage was extreme degradation, which was attributed to the degradation of graphitic carbon structure (i.e., CNTs), in agreement with previous research by Nady A. Fathy [19]. This means that the obtained CNTs from water hyacinth using CVD method were high in both thermal stability and quality.



**Figure 3** (a) XRD pattern of CNTs, (b) Raman spectroscopy of CNTs, (c) TGA profile of CNTs, and (d) Schematic illustrations the growth mechanism of CNTs start from the left, respectively.

Based on the results, the green synthesized and renewable CNTs from water hyacinth could be a feasible candidate in various applications such as adsorbent of pollutant [20], green material reinforcement [21], and Al-air batteries [14]. However, the CNTs in this study require further characterizations by advanced analysis techniques such as Brunauer-Emmett-Teller (BET) surface area analysis and X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) for approach to the practical applications.

#### 4. Conclusions

The CNTs were successfully synthesized from water hyacinth using CVD method without adding any of the external catalysts. The operating temperature was 700 °C and acetylene was used as a carbon source. The obtained CNTs were in a bamboo-like structure with d-spacing around 0.34 nm, as investigated by both TEM and XRD. The average diameter and length were ~ 46 nm and 200~300 nm, respectively. In addition, Raman spectroscopy presented the high degree of crystallization, and TGA result showed the high thermal stabilization and quality of CNTs. Conclusively, this work presents a green and sustainable synthesis of CNTs for further application. Moreover, it also promotes the alternative way to eliminate and add-value of water hyacinth.

#### 5. Acknowledgement

We would like to thank the Faculty of Medicine, Khon Kaen University, which serviced the Horiba Xplora confocal Raman microscope spectrometer (Jobin Yvon, Northampton, UK). This research was economically supported by the Research Fund for Supporting Lecturer to Admit High Potential Student to Study and Research on His Expert Program Year 2016, Graduate School, Khon Kaen University.

#### 6. Reference

- [1] S. Rezaia, M. Ponraj, A. Talaiekhosani, S. E. Mohamad, M. F. M. Din, S. M. Taib, F. Sabbagh and F. M. Sairan, "Perspectives of phytoremediation using water hyacinth for removal of heavy metals, organic and inorganic pollutants in wastewater," *Journal of Environmental Management*, Vol. 163, pp. 125-133, 2015.
- [2] H. De Groote, O. Ajuonu, S. Attignon, R. Djessou and P. Neuenschwander, "Economic impact of biological control of water hyacinth in Southern Benin," *Ecological Economics*, Vol. 45, No. 1, pp. 105-117, 2003.
- [3] S. Vidya and L. Girish, "Water hyacinth as a green manure for organic farming," *Impact: International Journal of Research in Applied, Natural and Social Sciences (IMPACT: IJRANSS)*, Vol. 2, No. 6, pp. 65-72, 2014.
- [4] P. Oudhia, "Medicinal weeds in rice fields of Chhattisgarh (India)," *Int. Rice. Res. Notes*, Vol. 24, No. 40, 1999.
- [5] S. Rezaia, M. Ponraj, M. F. M. Din, A. R. Songip, F. M. Sairan and S. Chelliapan, "The diverse applications of water hyacinth with main focus on sustainable energy and production for new era: An overview," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 41, pp. 943-954, 2015.
- [6] S. Rezaia, M. Ponraj, M. F. M. Din, S. Chelliapan and F. M. Sairan, "Effectiveness of Eichhornia crassipes in nutrient removal from domestic wastewater based on its optimal growth rate," *Desalination and water treatment*, pp. 360-365, 2014.
- [7] H. Liu, M. Ren, J. Qu, Y. Feng, X. Song, Q. Zhang, Q. Cong and X. Yuan, "A cost-effective method for recycling carbon and metals in plants: synthesizing nanomaterials," *Environmental Sciences Nano*, Vol. 4, pp. 461-469, 2017.
- [8] D. Janas, "From Bio to Nano: A Review of Sustainable Methods of Synthesis of Carbon Nanotubes," *Sustainability*, Vol. 12, No. 4115, 2020.
- [9] C. Hoecker, F. Smail, M. Bajada, M. Pick, A. Boies, "Catalyst nanoparticle growth dynamics and their influence on product morphology in a CVD process for continuous carbon nanotube

- synthesis,” *Carbon*, Vol. 96, pp. 116-124, 2016.
- [10] J. Zhang, A. Tahmasebi, J. E. Omoriyekomwan and J. Yu, “Production of carbon nanotubes on bio-char at low temperature via microwave-assisted CVD using Ni catalyst,” *Diamond and Related Materials*, Vol. 91, pp. 98-106, 2019.
- [11] J. Nissayn and A. Artnaseaw, “Synthesis of Multi-walled Carbon Nanotubes by Chemical Vapor Deposition on Natural Silk Carbon Fibers,” *Ladkrabang Engineering Journal*, Vol. 35, No. 1, pp. 16-22, 2018.
- [12] R. Araga and C. S. Sharma, “One step direct synthesis of multiwalled carbon nanotubes from coconut shell derived charcoal,” *Materials Letters*, Vol. 188, pp. 205-207, 2017.
- [13] M. W. Jayaweera, J. C. Kasturiarachchi, R. K. A. Kularatne and S. L. J. Wijeyekoon, “Contribution of water hyacinth (*Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms) grown under different nutrient conditions to Fe-removal mechanisms in constructed wetlands,” *Journal of Environmental Management*, Vol. 87, No. 3, pp. 450-460, 2008.
- [14] S. Sasrimuang, O. Chuchuen, and A. Artnaseaw, “Synthesis, characterization, and electrochemical properties of carbon nanotubes used as cathode materials for Al-air batteries from a renewable source of water hyacinth,” *Green Processing and Synthesis*, Vol. 9, No. 1, pp. 340-348, 2020.
- [15] J. Zhu, J. Jia, F. L. Kwong, D. H. L. Ng, S. C. Tjong, “Synthesis of multiwalled carbon nanotubes from bamboo charcoal and the roles of minerals on their growth,” *Biomass and Bioenergy*, Vol. 36, pp. 12-19, 2012.
- [16] A. Kudo, S. A. Steiner, B. C. Bayer, P. R. Kidambi, S. Hofmann, M. S. Strano and B. L. Wardle, “CVD Growth of Carbon Nanostructures from Zirconia: Mechanisms and a Method for Enhancing Yield,” *Journal of the American Chemical Society*, Vol. 136, No. 51, pp. 17808-17817, 2014.
- [17] J. Kim, S. Y. Kim, C. - M. Yang and G. W. Lee, “Possibility of Recycling SiO<sub>x</sub> Particles Collected at Silicon Ingot Production Process as an Anode Material for Lithium Ion Batteries,” *Scientific Reports*, Vol. 9, pp. 13313, 2019.
- [18] P. Hildago-Oporto, R. Navia, R. Hunter, G. Coronado and M. E. Gonzalez, “Synthesis of carbon nanotubes using biochar as precursor material under microwave irradiation,” *Journal of Environmental Management*, Vol. 244, No. 10, pp. 83-91, 2019.
- [19] N. A. Fathy, “Carbon nanotubes synthesis using carbonization of pretreated rice straw through chemical vapor deposition of camphor,” *RSC Advances*, Vol. 7, pp. 28535-28541, 2017.
- [20] J. Qu, C. Luo and X. Yuan, “Synthesis of hybrid carbon nanotubes using *Brassica juncea* L. application to photodegradation of bisphenol A,” *Environ Sci Pollut Res*, Vol. 20, pp. 3688-3695, 2013.
- [21] S. Guo, Q. Dai, Zigeng Wang and H. Yao, “Rapid microwave irradiation synthesis of carbon nanotubes on graphite surface and its application on asphalt reinforcement,” *Composites Part B*, Vol. 124, pp. 134-143, 2017.

# สายอากาศโมโนโพลบากร่องขนาดกะทัดรัดสามแถบความถี่ สำหรับประยุกต์ใช้งาน WLAN/WiMAX

## A Compact Tri-Band Notched Monopole Antenna for WLAN/WiMAX Applications

สมภพ พิมพล<sup>1\*</sup> และ รังสรรค์ วงศ์สรรค์<sup>2</sup>

<sup>1</sup>สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น

<sup>2</sup>สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Sompop Pimpol<sup>1\*</sup> and Rangsan Wongsan<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Department of Electronics and Telecommunication Engineering, Faculty of Engineering,

Rajamangala University of Technology Isan, Khon Kaen Campus.

<sup>2</sup> School of Telecommunication, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology.

\*Corresponding author E-mail: sompop.pi@rmuti.ac.th

Received: July 31, 2020 Revised: September 24, 2020 Accepted: September 24, 2020

### บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการออกแบบและสร้างสายอากาศโมโนโพล 3 แถบความถี่ ที่มีขนาดกะทัดรัดโดยการบากร่องสายอากาศรูปแบบสี่เหลี่ยมเพื่อควบคุมแถบความถี่เรโซแนนซ์ ทั้ง 3 แถบความถี่ พร้อมกับการลดขนาดระนาบกราวด์ไม่เต็มแผ่น สายอากาศที่ออกแบบและสร้างบนแผ่นวงจรพิมพ์ชนิด FR-4 มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริก ( $\epsilon_r$ ) เท่ากับ 4.3 ความหนา ( $h$ ) เท่ากับ 1.6 มม. และสายอากาศมีขนาด 20x30 มม. โดยสายอากาศที่ออกแบบมีสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่ต่ำกว่า -10 dB ทั้งสามแถบความถี่ได้แก่ ช่วงแถบความถี่ที่ 1 ตั้งแต่ 2.36 GHz ถึง 2.62 GHz ช่วงแถบความถี่ที่ 2 ตั้งแต่ 3.29 GHz ถึง 4.15 GHz และช่วงแถบความถี่ที่ 3 ตั้งแต่ 4.92 GHz ถึง 6.22 GHz ที่ความถี่ 2.45 GHz 3.5 GHz และ 5.5 GHz ตามลำดับ ซึ่งแถบความถี่อยู่ในย่านการใช้งานระบบโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย (WLAN) และระบบสื่อสารไวแมกซ์ (WiMAX)

**คำสำคัญ:** สายอากาศสามแถบความถี่ การบากร่อง โครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย ระบบสื่อสารไวแมกซ์

### Abstract

This paper presents design and prototype of a compact tri-band monopole antenna with notching technique on rectangular patch for controllable the tri-band frequency resonant, while reduced size of ground plane. This antenna are designed and fabricated on the printed circuit board (PCB) FR-4 substrate with dielectric constant ( $\epsilon_r$ )=4.3 and 1.6 mm of the thickness ( $h$ ), and the size is 20x30 mm<sup>2</sup>. The proposed antenna is design has three separate resonant frequencies: 2.45 GHz, 3.5 GHz, and 5.5 GHz, so the bandwidth for  $|S_{11}| \leq -10$  dB are 2.36-2.62 GHz, 3.29-4.15 GHz, and 4.92-6.22 GHz, respectively. Accordingly, this antenna operates the WLAN/WiMAX frequency band.

**Keywords:** Tri-band antenna, notching technique, WLAN, WiMAX.

## 1. บทนำ

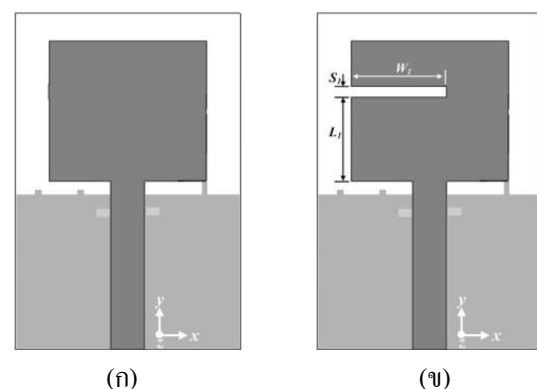
ปัจจุบันการสื่อสารนับได้ว่ามีบทบาทสำคัญเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะการสื่อสารแบบไร้สาย เนื่องจากการสื่อสารที่ตอบสนองความต้องการใช้งานรับ-ส่ง ข้อมูลได้หลากหลายมากยิ่งขึ้นเพื่อให้สามารถเพิ่มความรวดเร็วในการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ต่าง ๆ ได้โดยสะดวก โดยอุปกรณ์ที่มีความสำคัญอย่างมากสำหรับการสื่อสารไร้สายคือ สายอากาศ ซึ่งคุณสมบัติที่ดีของสายอากาศได้แก่ ขนาดเล็กกะทัดรัดเพื่อให้ง่ายต่อการพกพา และออกแบบให้สามารถใช้งานได้หลากหลายช่วงแถบความถี่ตามมาตรฐานการใช้งาน ได้แก่ ความถี่ที่ใช้งานตามมาตรฐาน Institute of Electrical and Electronics Engineer: IEEE ของระบบโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย (Wireless Local Area Network: WLAN) ตามมาตรฐาน IEEE 802.11b/g/a ที่ใช้งานในช่วงความถี่ 2.45 GHz (2.4–2.484 GHz) 5.2 GHz (5.15–5.35 GHz) และ 5.8 GHz (5.725–5.825 GHz) ส่วนระบบสื่อสารไวแมกซ์ (Worldwide Interoperability of Microwave Access: WiMAX) ตามมาตรฐาน IEEE802.16e มีช่วงความถี่ใช้งานที่ความถี่ 3.5 GHz (3.3–3.7 GHz) และ 5.5 GHz (5.25–5.85 GHz) [1], [2] สายอากาศที่นำมาใช้งานก็มีความหลากหลายเช่นกัน หนึ่งในนั้นคือสายอากาศ โมโนโพลที่สร้างบนแผ่นวงจรพิมพ์ เนื่องจากสามารถออกแบบให้มีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา ต้นทุนต่ำและสามารถออกแบบให้เกิดการตอบสนองความถี่เรโซแนนซ์หลายแถบความถี่ได้ง่าย สายอากาศโมโนโพล [3] นำเสนอสายอากาศโมโนโพลพื้นฐานรูปสี่เหลี่ยมที่ป้อนด้วย ไมโครสตริปไลน์ (Microstrip line) ร่วมกับการลดขนาดระนาบกราวด์ ซึ่งมีข้อดีคือสามารถเพิ่มความกว้างแถบของสายอากาศมากขึ้น และได้มีการนำเทคนิคการเจาะร่องบนระนาบกราวด์ (Slotted ground) พร้อมกับเพิ่มสแต็คสี่เหลี่ยมของระนาบกราวด์ [4] ส่งผลให้ความกว้างแถบของสายอากาศเพิ่มมากขึ้นและการแมตช์อิมพีแดนซ์ของสายอากาศดียิ่งขึ้น ต่อมาได้มีการใช้เทคนิคควบคุมช่วงความถี่เรโซแนนซ์ของสายอากาศโดยการบากร่อง (Notching) โดยที่ [5] นำเสนอสายอากาศโมโนโพลที่มีการบากร่องเป็นรูปตัววี (E-slot) และเพิ่มการบากร่องเป็นรูป

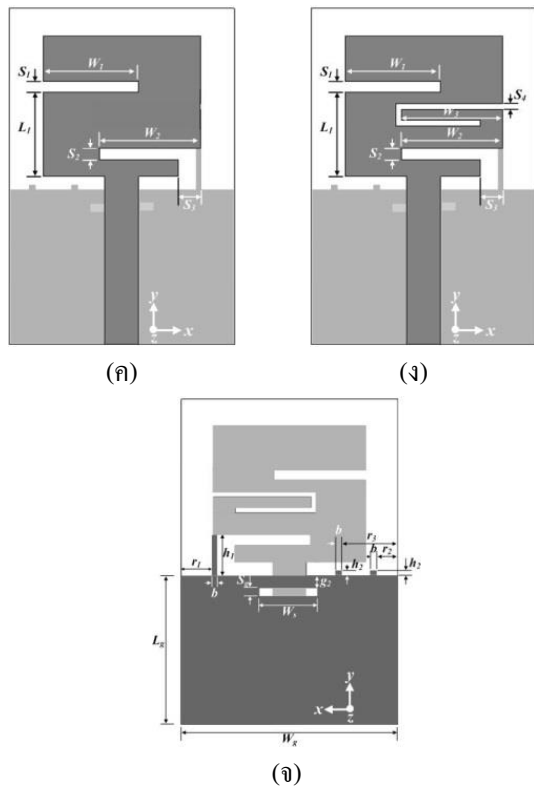
ตัวยู (U-slot) ที่ส่วนของระนาบกราวด์ ส่งผลให้ความกว้างแถบของสายอากาศมีความกว้างเพิ่มขึ้น ต่อมา [6] ได้นำเสนอเทคนิคการปรับปรุงสายอากาศโมโนโพลรูปสี่เหลี่ยมที่ทำการบากร่องให้เป็นรูปตัวยู (U-shape) ร่วมกับการลดขนาดของระนาบกราวด์เพื่อประยุกต์ใช้งาน WLAN ต่อจากนั้น [7], [8] ได้นำเสนอเทคนิครูปแบบการบากร่องแบบเดี่ยว (Single band-notched) และการบากร่องแบบคู่ (Dual band-notched) เพื่อควบคุมช่วงความถี่เรโซแนนซ์ ส่งผลให้ความกว้างแถบของสายอากาศเพิ่มมากขึ้น ต่อมา [9], [10] นำเสนอเทคนิคการบากร่องบนแผ่นสายอากาศโมโนโพลแบบพื้นฐานรูปสี่เหลี่ยมเพื่อปรับปรุงเพิ่มความกว้างแถบและการตอบสนองความถี่เรโซแนนซ์ได้หลายช่วงแถบความถี่ของสายอากาศและ [11] ได้นำเสนอเทคนิคการบากร่องสายอากาศไดโพลแผ่นวงจรพิมพ์ โดยได้ทำการเพิ่มจำนวนร่องบากเพื่อควบคุมความถี่เรโซแนนซ์ ส่งผลให้ความกว้างแถบของสายอากาศเพิ่มมากขึ้น

บทความนี้นำเสนอการออกแบบสายอากาศโมโนโพลรูปสี่เหลี่ยมร่วมกับเทคนิคการบากร่องเพื่อควบคุมช่วงแถบความถี่ 3 ย่านความถี่ โดยมีการป้อนแบบไมโครสตริปไลน์ พร้อมทั้งมีการเจาะร่องบนระนาบกราวด์และเพิ่มสแต็คสี่เหลี่ยมบนระนาบกราวด์ ซึ่งส่งผลให้การแมตช์อิมพีแดนซ์ของสายอากาศตลอดทั้ง 3 ย่านความถี่ดีขึ้น

## 2. การออกแบบสายอากาศและผลการจำลอง

การออกแบบสายอากาศ ในขั้นต้นนั้นอยู่บนพื้นฐานของสายอากาศโมโนโพลลักษณะรูปสี่เหลี่ยม [3] โดยมีโครงสร้างแสดงขั้นตอนของการออกแบบสายอากาศ ดังรูปที่ 1 (ก)-(จ)

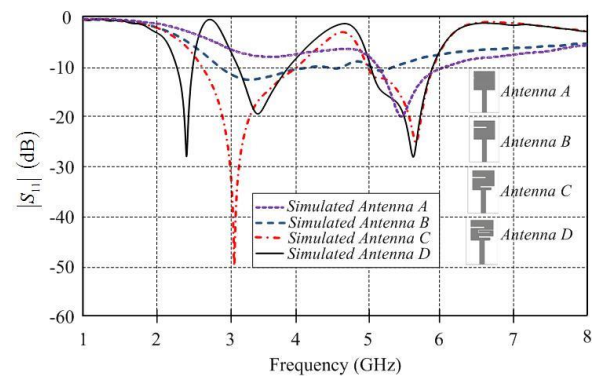




รูปที่ 1 โครงสร้างขั้นตอนของการออกแบบสายอากาศ  
โมโนโพลและระนาบกราวด์ที่มีการเจาะร่อง

จากรูปที่ 1 สายอากาศโมโนโพลรูปสี่เหลี่ยมที่มีระนาบกราวด์ไม่เต็มแผ่นหรือมีการลดขนาดระนาบกราวด์ ซึ่งจะทำให้สายอากาศเกิดเรโซแนนซ์ที่สองช่วงความถี่ ส่งผลให้มีแถบความถี่กว้างมากขึ้น แสดงดังรูปที่ 1 (ก) ขั้นตอนต่อมาทำการเพิ่มรอยบาก โดยกำหนดพารามิเตอร์เป็น  $S_1$ ,  $W_1$  และ  $L_1$  ไว้ที่บริเวณส่วนบนของสายอากาศ แสดงได้ดังรูปที่ 1 (ข) พบว่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนตอบสนองการเรโซแนนซ์ในช่วงแถบความถี่ต่ำ ต่อมาได้ทำการเพิ่มรอยบากโดยกำหนดพารามิเตอร์เป็น  $S_2$  และ  $W_2$  ไว้ที่บริเวณส่วนล่างของสายอากาศ ดังรูปที่ 1 (ค) จะเห็นได้ว่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนตอบสนองการเรโซแนนซ์ในช่วงความถี่สูง ซึ่งในขั้นตอนนี้ได้กำหนดพารามิเตอร์  $S_3$  เพื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลง พบว่าเมื่อมีการปรับเปลี่ยนค่า  $S_3$  ส่งผลให้ความถี่แถบของช่วงแถบความถี่สูงเพิ่มขึ้น และขั้นตอนสุดท้ายได้ทำการเพิ่มรอยบาก โดยกำหนดพารามิเตอร์เป็น  $S_4$  และ  $W_4$  ไว้ที่บริเวณกึ่งกลาง ดังรูปที่ 1 (ง) พบว่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนตอบสนองการเรโซแนนซ์ ในช่วงความถี่ระหว่างช่วงแถบความถี่ต่ำและแถบความถี่สูง

อีกช่วงความถี่หนึ่ง ส่วนของระนาบกราวด์ที่มีการนำเทคนิคการเจาะร่อง พร้อมกับเพิ่มสล็อตสี่เหลี่ยมของระนาบกราวด์ [4] แสดงได้ดังรูปที่ 1 (จ) ซึ่งจากการออกแบบได้ทำการปรับลดขนาดของระนาบกราวด์ ( $L_g$ ) ที่เหมาะสมที่สุดคือ  $L_g=14$  มม. โดยผลการจำลองการออกแบบ โครงสร้างสายอากาศแสดงได้รูปที่ 2



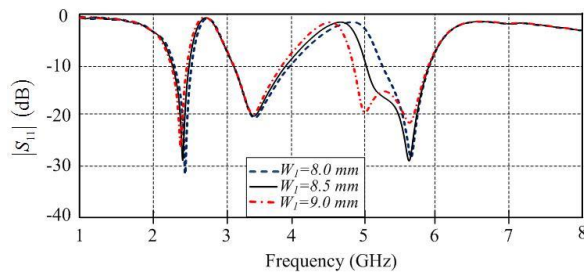
รูปที่ 2 ผลการจำลองสัมประสิทธิ์การสะท้อนของ  
สายอากาศทั้ง 4 รูปแบบ

จากรูปที่ 2 เปรียบเทียบผลการจำลองสัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศทั้ง 4 รูปแบบ โดยเริ่มต้นจากสายอากาศโมโนโพลรูปสี่เหลี่ยมในรูปแบบสายอากาศ A (Antenna A) ต่อจากนั้นทำการเพิ่มรอยบากในรูปแบบสายอากาศ B (Antenna B) พบว่ามีการตอบสนองความถี่เรโซแนนซ์ที่กว้างมากขึ้นในช่วงความถี่ต่ำ จนได้ทำการเพิ่มรอยบากและตัดส่วนปลายด้านข้างในรูปแบบสายอากาศ C (Antenna C) จะได้ว่ามีการตอบสนองความถี่เรโซแนนซ์ในช่วงสองแถบความถี่ และเมื่อทำการเพิ่มรอยบากตรงกลางในรูปแบบสายอากาศ D (Antenna D) จะเห็นได้ว่า มีการตอบสนองความถี่เรโซแนนซ์เพิ่มขึ้นในช่วงแถบความถี่ระหว่างช่วงความถี่ต่ำและความถี่สูงเดิมดังกล่าว

การออกแบบสายอากาศได้เลือกรูปแบบสายอากาศ D เพื่อให้มีการตอบสนอง 3 แถบความถี่ โดยมีพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสายอากาศ ดังต่อไปนี้  $L=30$  มม.  $L_p=12.5$  มม.  $W=20$  มม.  $W_p=14$  มม.  $W_1=8$  มม.  $W_2=8.5$  มม.  $W_3=9$  มม.  $S_1=1$  มม.  $h_1=3$  มม.  $h_2=1$  มม. และได้ทำการวิเคราะห์หาขนาดที่เหมาะสมที่สุดของสายอากาศ โดยปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังแสดงในขั้นตอนต่อไป

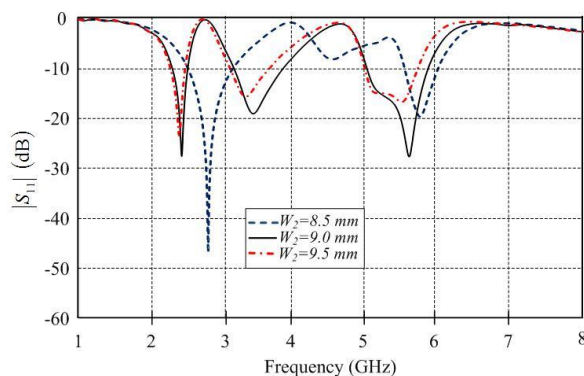


ขั้นตอนแรก โดยใช้เทคนิคการบากร่องที่บริเวณส่วนบนของสายอากาศเพื่อปรับสัมประสิทธิ์การสะท้อน โดยทำการเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์  $W_1$  ที่ขนาด 8.0 8.5 และ 9.0 มม. ซึ่งการปรับเปลี่ยนค่าดังกล่าวได้ค่าที่เหมาะสมที่สุด คือ  $W_1$  เท่ากับ 8.5 มม. แสดงดังรูปที่ 3

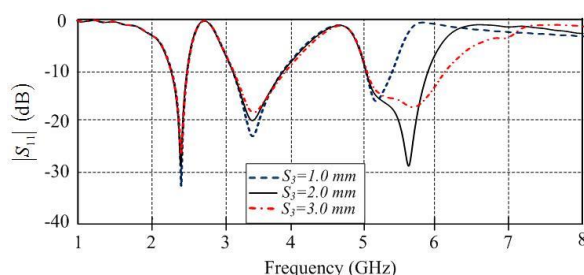


รูปที่ 3 ผลการจำลองสัมประสิทธิ์การสะท้อน  
เมื่อปรับเปลี่ยนค่า  $W_1$

ขั้นตอนต่อมาเพิ่มการบากร่องที่บริเวณส่วนล่างของสายอากาศเพื่อปรับสัมประสิทธิ์การสะท้อน โดยทำการเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์  $W_2$  ที่ขนาด 8.5 9.0 และ 9.5 มม. ซึ่งการปรับเปลี่ยนค่าดังกล่าวได้ค่าที่เหมาะสมที่สุด คือ  $W_2$  เท่ากับ 9.0 มม. ดังรูปที่ 4



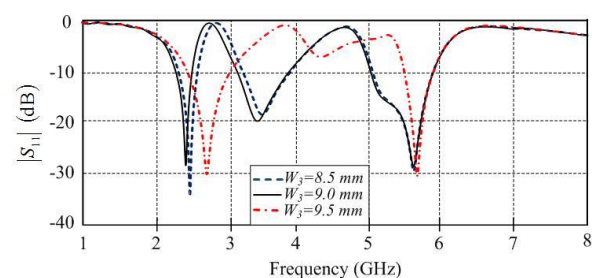
รูปที่ 4 ผลการจำลองสัมประสิทธิ์การสะท้อน  
เมื่อปรับเปลี่ยนค่า  $W_2$



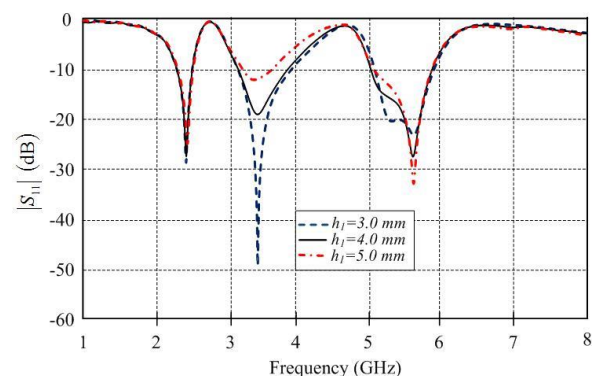
รูปที่ 5 ผลการจำลองสัมประสิทธิ์การสะท้อน  
เมื่อปรับเปลี่ยนค่า  $S_3$

จากขั้นตอนการบากร่องที่บริเวณส่วนล่างของสายอากาศเพื่อปรับสัมประสิทธิ์การสะท้อน โดยทำการเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์  $S_3$  ที่ขนาด 1.0 2.0 และ 3.0 มม. ซึ่งการปรับเปลี่ยนค่าดังกล่าวได้ค่าที่เหมาะสมที่สุด คือ  $S_3$  เท่ากับ 2.0 มม. ดังรูปที่ 5

รูปที่ 6 ทำการบากร่องที่บริเวณส่วนกลางของสายอากาศเพื่อปรับสัมประสิทธิ์การสะท้อน โดยทำการเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์  $W_3$  ที่ขนาด 8.5 9.0 และ 9.5 มม. ซึ่งพบว่า การปรับเปลี่ยนค่าดังกล่าวได้ค่าที่เหมาะสมที่สุด คือ  $W_3$  เท่ากับ 9.0 มม.



รูปที่ 6 ผลการจำลองสัมประสิทธิ์การสะท้อน  
เมื่อปรับเปลี่ยนค่า  $W_3$

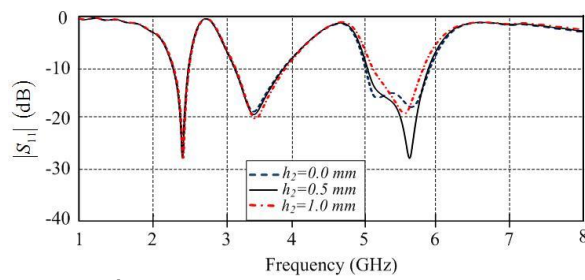


รูปที่ 7 ผลการจำลองสัมประสิทธิ์การสะท้อน  
เมื่อปรับเปลี่ยนค่า  $h_1$

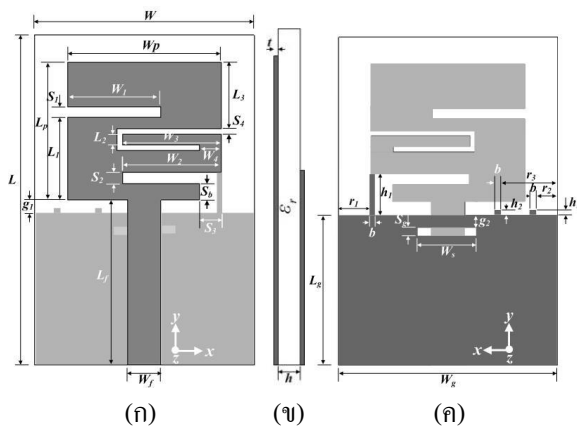
ขั้นตอนต่อมาเป็นการเพิ่มแท่งสี่เหลี่ยมที่แผ่นระนาบกราวด์ด้านหลังของสายอากาศเพื่อช่วยปรับสัมประสิทธิ์การสะท้อน โดยทำการเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์  $h_1$  ที่ขนาด 3.0 4.0 และ 5.0 มม. ซึ่งการปรับเปลี่ยนค่าดังกล่าวได้ค่าที่เหมาะสมที่สุด คือ  $h_1$  เท่ากับ 4.0 มม. ดังรูปที่ 7

ขั้นตอนสุดท้ายทำการเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์  $h_2$  ที่ขนาด 0.0 0.5 และ 1.0 มม. พบว่าการปรับเปลี่ยนค่าที่เหมาะสมที่สุด คือ  $h_2$  เท่ากับ 0.5 มม. ดังรูปที่ 8 จากขั้นตอนการ

ออกแบบทั้งหมด โครงสร้างของสายอากาศโมโนโพลที่นำเสนอ แสดงได้ดังรูปที่ 9



รูปที่ 8 ผลการจำลองสัมประสิทธิ์การสะท้อนเมื่อปรับเปลี่ยนค่า  $h_2$

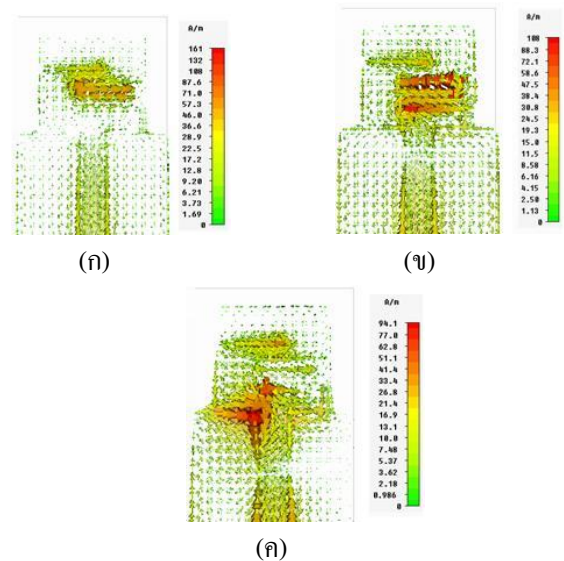


รูปที่ 9 โครงสร้างของสายอากาศโมโนโพลที่นำเสนอ  
(ก) ด้านหน้า (ข) ด้านข้าง และ (ค) ด้านหลัง

การออกแบบสายอากาศสร้างบนแผ่นวงจรพิมพ์ ซึ่งได้ทำการวิเคราะห์ผลการออกแบบด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST โดยป้อนสัญญาณทางเข้าด้วยไมโครสตริปไลน์ที่มีความกว้าง ( $W_p$ )=3 มม. ให้มีอินพุตอิมพีแดนซ์ 50 โอห์ม ใช้แผ่นวงจรพิมพ์ชนิด FR-4 มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริก ( $\epsilon_r$ )=4.3) ค่าการสูญเสียบนผิว (Loss tangent:  $\tan \delta$ ) เท่ากับ 0.02 ความสูงของวัสดุฐานรอง ( $h$ )=1.6 มม. ความหนาของวัสดุตัวนำ ( $t$ )=0.035 มม. ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ทำการออกแบบสายอากาศและปรับขนาดให้เหมาะสมที่สุด ตลอดช่วงแถบความถี่ 3 ย่านความถี่ สามารถสรุปได้ดังนี้ คือ  $W$ =20 มม.  $W_p$ =14 มม.  $W_f$ =3 มม.  $W_g$ =20 มม.  $W_s$ =5 มม.  $W_l$ =8.5 มม.  $W_2$ = $W_3$ =9 มม.  $W_d$ =2 มม.  $L$ =30 มม.  $L_p$ =12.5 มม.  $L_f$ =15 มม.  $L_1$ =7.5 มม.  $L_2$ =1 มม.  $L_3$ =6 มม.  $L_g$ =14 มม.  $S_1$ = $S_2$ =1 มม.  $S_3$ =2 มม.  $S_4$ =0.5 มม.  $S_b$ =1.5 มม.  $S_g$ =0.5 มม.  $g_1$ = $g_2$ =1 มม.

$r_1$ =3 มม.  $r_2$ =2 มม.  $r_3$ =6 มม.  $h_1$ =4 มม.  $h_2$ =0.5 มม. และ  $b$ =0.5 มม.

จากโครงสร้างและขนาดของสายอากาศ ทำการจำลองสัมประสิทธิ์การสะท้อน ได้ดังนี้ ช่วงแถบความถี่ที่ 1 ในช่วงความถี่ 2.299-2.52 GHz ช่วงแถบความถี่ที่ 2 ในช่วงความถี่ 3.15-3.84 GHz และช่วงแถบความถี่ที่ 3 ในช่วงความถี่ 4.99-5.85 GHz ครอบคลุมช่วงความถี่ 2.45 GHz 3.5 GHz และ 5.5 GHz ตามลำดับ และผลการจำลองการแจกแจงกระแสที่เกิดขึ้นบริเวณร่องบากของสายอากาศที่ความถี่เรโซแนนซ์ทั้ง 3 ช่วงความถี่ พบว่า ที่ช่วงความถี่ 2.45 GHz เกิดการแจกแจงของกระแสที่บริเวณร่องบากส่วนบนมีค่าสูงสุด ดังรูปที่ 10 (ก) ที่ช่วงความถี่ 3.5 GHz การแจกแจงของกระแสที่บริเวณร่องบากตรงกลางมีค่าสูงสุด ดังรูปที่ 10 (ข) และที่ช่วงความถี่ 5.5 GHz การแจกแจงของกระแสที่บริเวณร่องบากส่วนล่างมีค่าสูงสุด ดังรูปที่ 10 (ค) ซึ่งมีความสอดคล้องกับแนวคิดการออกแบบเพื่อให้เกิดความถี่เรโซแนนซ์ทั้ง 3 ช่วงความถี่

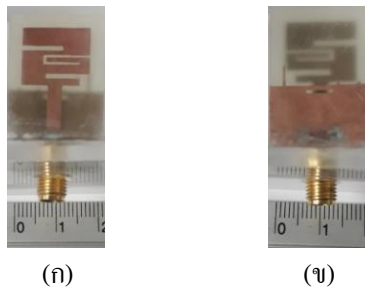


รูปที่ 10 การแจกแจงกระแสของสายอากาศที่ช่วงแถบความถี่ต่าง ๆ (ก) 2.45 GHz (ข) 3.5 GHz และ (ค) 5.5 GHz

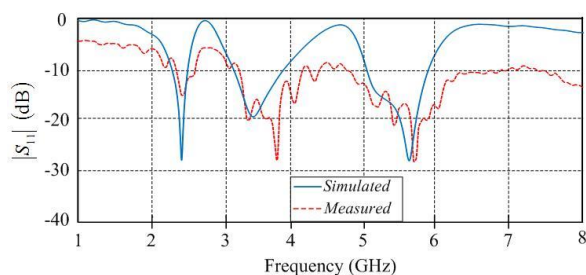
### 3. การสร้างและการทดสอบสายอากาศ

สายอากาศต้นแบบที่ได้จากการจำลองแบบโครงสร้างทำการสร้างลงบนแผ่นวงจรพิมพ์ FR-4 ตามขนาดโครงสร้างดังรูปที่ 9 ทำการบัดกรีหัวต่อชนิด SMA 50

โอห์ม ซึ่งชิ้นงานสายอากาศโมโนโพลที่ได้สร้างเสร็จสมบูรณ์แล้ว แสดงดังรูปที่ 11



รูปที่ 11 สายอากาศต้นแบบ (ก) ด้านหน้า (ข) ด้านหลัง

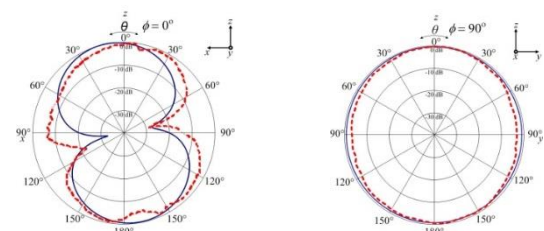


รูปที่ 12 เปรียบเทียบผลการจำลองกับผลการวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศต้นแบบ

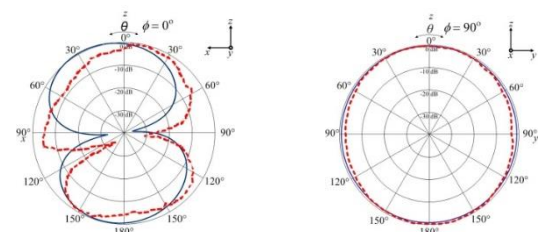
จากรูปที่ 12 ผลการวัดทดสอบเพื่อหาสัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศโมโนโพลต้นแบบด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย Agilent รุ่น E501C แล้วนำผลที่ได้จากการวัดเปรียบเทียบกับผลการจำลอง พบว่าผลการวัดสัมประสิทธิ์การสะท้อน  $|S_{11}|$  ทั้ง 3 แถบความถี่ เมื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลองมีความแตกต่างกันเล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องมาจากความผิดพลาดในการสร้างชิ้นงานต้นแบบ แต่ก็มีคุณสมบัติและครอบคลุมในช่วงความถี่ของการออกแบบใช้งาน ได้แก่ ช่วงแถบความถี่ที่ 1 ครอบคลุมช่วงความถี่ 2.36-2.62 GHz ช่วงแถบความถี่ที่ 2 ครอบคลุมช่วงความถี่ 3.29-4.15 GHz และ ช่วงแถบความถี่ที่ 3 ครอบคลุมช่วงความถี่ 4.92-6.22 GHz ซึ่งครอบคลุมที่ความถี่ 2.45 GHz 3.5 GHz และ 5.5 GHz ตามลำดับ

การวัดแบบรูปการแผ่กำลังจะใช้สายอากาศไดโพลครึ่งความยาวคลื่น (Half-wave dipole antenna) ในแต่ละความถี่ใช้งานเพื่อทำหน้าที่เป็นสายอากาศภาคส่งและหมุนสายอากาศโมโนโพลต้นแบบ (สายอากาศภาครับ) โดยมีการหมุนรอบแกนหมุนในแต่ละระนาบเพื่อรับคลื่นจาก

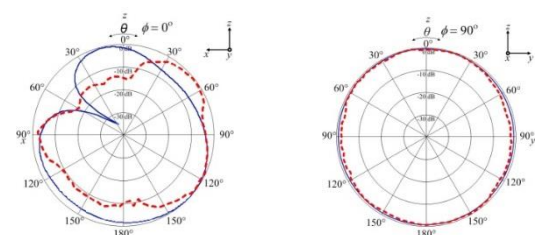
สายอากาศภาคส่ง ตั้งแต่มุม 0 องศา ถึง 360 องศา โดยมีระยะห่างสายอากาศทั้งสองตัว เท่ากับ 0.3 เมตร ซึ่งเป็นสนามระยะไกล (Far-Field) ผลจากการวัดแบบรูป การแผ่กำลังแบบโพลาไรซ์เดียวกัน (Co-polarization) ของสายอากาศโมโนโพลต้นแบบ ทั้งในระนาบสนามไฟฟ้า (E-plane) และระนาบสนามแม่เหล็ก (H-plane) ได้ทำการเปรียบเทียบกับผลการจำลองที่ความถี่ 2.45 GHz 3.5 GHz และ 5.5 GHz ตามลำดับ พบว่าสายอากาศโมโนโพลต้นแบบที่สร้างขึ้นนี้ มีแบบรูปการแผ่กำลังแบบรอบตัวในระนาบสนามแม่เหล็ก ส่วนในระนาบสนามไฟฟ้า มีแบบรูปการแผ่กำลังแบบ 2 ทิศทาง (Bi-directional) ในทิศทางด้านหน้าและด้านหลังของสายอากาศ ดังรูปที่ 13



ระนาบสนามไฟฟ้า (ก) ระนาบสนามแม่เหล็ก



ระนาบสนามไฟฟ้า (ข) ระนาบสนามแม่เหล็ก

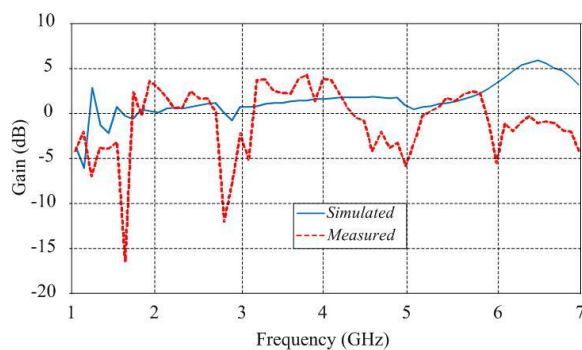


ระนาบสนามไฟฟ้า (ค) ระนาบสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 13 แบบรูปการแผ่กำลังในระนาบสนามไฟฟ้า (E-plane) และระนาบสนามแม่เหล็ก (H-plane) ที่ความถี่ต่าง ๆ

(ก) 2.45 GHz (ข) 3.5 GHz และ (ค) 5.5 GHz

การวัดอัตราขยายของสายอากาศทำได้โดยใช้สายอากาศโมโนโพลดินแบบที่มีคุณสมบัติเหมือนกันสองตัว โดยสายอากาศต้นแบบตัวที่ 1 (ภาคส่ง) ต่อเข้ากับพอร์ต 1 และสายอากาศต้นแบบตัวที่ 2 (ภาครับ) ต่อเข้ากับพอร์ต 2 ระยะห่างของสายอากาศทั้งสองตัว เท่ากับ 0.3 เมตร ทำการวัดค่า  $S_{21}$  ด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย Agilent รุ่น E501C แล้วนำผลที่ได้จากการวัดมาคำนวณเปรียบเทียบกับผลการจำลอง แสดงดังรูปที่ 14



รูปที่ 14 เปรียบเทียบผลการจำลองกับผลการวัดค่าอัตราขยายของสายอากาศต้นแบบ

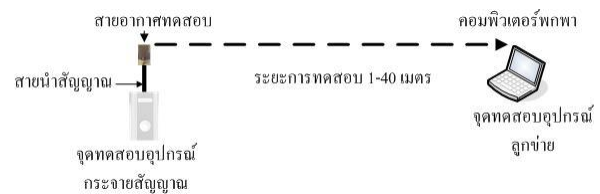
จากรูปที่ 14 เปรียบเทียบผลการวัดค่าอัตราขยายกับผลการจำลองของสายอากาศที่สร้าง พบว่าที่ความถี่ 2.45 GHz 3.5 GHz และ 5.5 GHz มีค่าอัตราขยาย เท่ากับ 1.43 dB 2.029 dB และ 1.178 dB ตามลำดับ ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 อัตราขยายของสายอากาศโมโนโพลดินแบบ

| ความถี่  | อัตราขยาย (dB) |          |
|----------|----------------|----------|
|          | ผลการจำลอง     | ผลการวัด |
| 2.45 GHz | 0.752          | 1.430    |
| 3.5 GHz  | 1.158          | 2.029    |
| 5.5 GHz  | 1.138          | 1.178    |

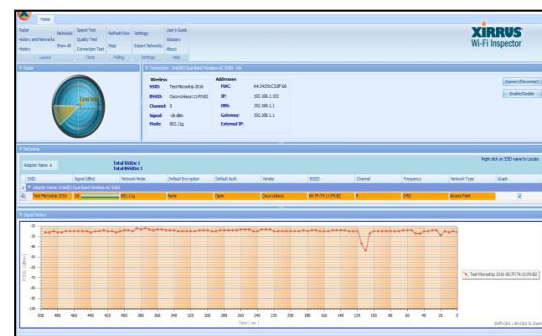
การทดสอบใช้งานจริงเพื่อประเมินสายอากาศที่สร้างขึ้นโดยการพิจารณาระยะทางการติดต่อแบบจุดต่อจุดระหว่างอุปกรณ์กระจายสัญญาณ (Access point) ที่ติดตั้งสายอากาศต้นแบบและอุปกรณ์ลูกข่าย ซึ่งในที่นี้ใช้คอมพิวเตอร์แบบพกพา เพื่อหาระยะที่ยังสามารถใช้งานได้จริงตามวัตถุประสงค์ ในการทดสอบนั้นใช้อุปกรณ์แพร่กระจายสัญญาณ ยี่ห้อ WAVLINK AC-1200 ตาม

มาตรฐาน IEEE 802.11a/b/g/n/ac ที่ความถี่ทดสอบ 2.45 GHz และ 5.5 GHz การทดสอบนี้มีอุปกรณ์ที่ใช้ ได้แก่ อุปกรณ์แพร่กระจายสัญญาณ ยี่ห้อ WAVLINK AC-1200 สายอากาศทดสอบและสายนำสัญญาณ 50 โอห์ม



รูปที่ 15 การต่อสายอากาศทดสอบเข้ากับอุปกรณ์กระจายสัญญาณเพื่อทดสอบการใช้งาน

การติดตั้งโดยการถอดสายอากาศเดิมที่มากับอุปกรณ์แพร่กระจายสัญญาณเปลี่ยนเป็นสายอากาศทดสอบที่สร้างขึ้น หลังจากนั้นทำการติดตั้งอุปกรณ์ต่าง ๆ ดังรูปที่ 15 ขั้นตอนต่อไปทำการตรวจสอบความแรงของสัญญาณด้วยโปรแกรม Xirrus Wi-Fi Inspector [12] โดยทำการเชื่อมต่อเข้ากับ IP ของโครงข่าย (Network) คือ IP 192.168.1.1 ที่ใช้สำหรับการเชื่อมต่อเข้ากับอุปกรณ์แพร่กระจายสัญญาณ ซึ่งสามารถติดต่อกันได้อย่างต่อเนื่องโดยใช้สายอากาศทดสอบ มีระยะทางการติดต่อในที่โล่ง โดยเพิ่มระยะห่างแต่ละครั้ง 20 เมตร ระหว่าง 1-40 เมตร โดยตัวอย่างผลการวัดทดสอบความแรงของสัญญาณ ดังแสดงในรูปที่ 16



รูปที่ 16 ระดับความแรงของสัญญาณจากอุปกรณ์กระจายสัญญาณโดยมีความต่อเนื่องในการต่อสายอากาศทดสอบ (ระยะห่างระหว่าง 1 ถึง 40 เมตร)

จากผลการทดสอบจากการใช้โปรแกรมทดสอบความแรงของสัญญาณที่ติดตั้งบนเครื่องคอมพิวเตอร์พกพาที่ระยะห่างที่แตกต่างกัน สามารถสรุปได้ว่าการใช้งานจริง

ในช่วงระยะห่างแต่ละช่วงสามารถใช้งานได้และมีความแรงของสัญญาณดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ความแรงของสัญญาณสายอากาศโมโนโพล

| ระยะทาง<br>(เมตร) | ความแรงของสัญญาณ (dBm) |         |                 |         |
|-------------------|------------------------|---------|-----------------|---------|
|                   | สายอากาศเดิม           |         | สายอากาศโมโนโพล |         |
|                   | 2.45 GHz               | 5.5 GHz | 2.45 GHz        | 5.5 GHz |
| 1                 | -38                    | -45     | -26             | -45     |
| 20                | -50                    | -66     | -58             | -67     |
| 40                | -60                    | -79     | -70             | -78     |

จากผลการทดสอบวัดความแรงของสัญญาณ ดังตารางที่ 2 พบว่า เมื่อเปลี่ยนระยะห่างของอุปกรณ์ลูกข่ายห่างออกไปจากอุปกรณ์กระจายสัญญาณ ความแรงของสัญญาณจะมีขนาดลดลงเรื่อย ๆ และจากการทดสอบให้ระยะทางไกลที่สุด เท่ากับ 40 เมตร อ่านค่าความแรงของสัญญาณได้ เท่ากับ -70 dBm และ -78 dBm ที่ความถี่ 2.45 GHz และ 5.5 GHz ตามลำดับ ซึ่งยังคงสามารถติดต่อ รับ-ส่ง ข้อมูลได้อย่างปกติ ดังนั้นจากการออกแบบสายอากาศได้ทำการสร้างและทดสอบค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศ โดยทดสอบต่อใช้งานจริงในช่วงความถี่ 2.45 GHz และ 5.5 GHz นั้น สามารถใช้งานได้เป็นอย่างดี ดังนั้น จากการจำลองด้วยโปรแกรมจำลองพร้อมทั้งได้ทำการทดสอบค่าพารามิเตอร์พื้นฐานของสายอากาศ ได้แก่ ค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ อัตราขยาย สัมประสิทธิ์การสะท้อนและแบบรูปการแผ่กำลัง ซึ่งพบว่าค่าที่ได้จากการวัดทดสอบมีความสอดคล้องกับการใช้โปรแกรมจำลองเป็นอย่างดีและจากผลการทดสอบนำไปต่อใช้งานจริงนั้นพบว่า สามารถนำมาใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพและครอบคลุมตลอดทั้ง 3 แถบความถี่ ได้แก่ ช่วงความถี่ 2.45 GHz 3.50 GHz และ 5.50 GHz ได้เป็นอย่างดี

#### 4. สรุป

บทความนี้ได้นำเสนอสายอากาศโมโนโพลพื้นฐานรูปสี่เหลี่ยมร่วมกับเทคนิคการบากร่องให้มีสภาวะการเกิดความถี่เรโซแนนซ์เพื่อควบคุมช่วงแถบความถี่ 3 ย่านความถี่ โดยมีการบ่อนแบบไมโครสตริปไลน์ พร้อมทั้งมีการเจาะร่องบนระนาบกราวด์และเพิ่มสัดบสี่เหลี่ยมบน

ระนาบกราวด์ ซึ่งส่งผลให้การแมตซ์อิมพีแดนซ์ของสายอากาศตลอดทั้ง 3 ย่านความถี่ ได้ดียิ่งขึ้น การออกแบบสายอากาศเพื่อนำไปประยุกต์ใช้งาน WLAN/WiMAX ซึ่งได้ทำการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสายอากาศให้มีโครงสร้างที่กะทัดรัด โดยมีขนาดเท่ากับ 20x30 มิลลิเมตร ซึ่งเหมาะสมสำหรับการใช้งานกับอุปกรณ์สื่อสารทั้งแบบเคลื่อนที่และแบบประจำที่

#### เอกสารอ้างอิง

- [1] P. Moeikham, C. Mahatthanajatuphat and P. Akkaraekthalin, "A Triple Band Printed Monopole Antenna for WLAN/WiMAX Applications," International Symposium on Antennas & Propagation (ISAP), pp.295-298, 2012.
- [2] P. Moeikham and P. Akkaraekthalin, "Printed Slot Antenna for WLAN/WiMAX and UWB Applications," International Symposium on Antennas & Propagation (ISAP), pp.88-91, 2013.
- [3] W. T. Alshammari, "UWB Square Microstrip Patch Antenna for C-Band Applications," International Journal of Scientific & Engineering Research, Vol. 5, No. 11, pp.191-193, 2014.
- [4] S. M. Naveen, R. M. Vani and P. V. Hunagund, "Compact Wideband Rectangular Monopole Antenna for Wireless Applications," Wireless Engineering and Technology, Vol. 3, pp.240-243, 2012.
- [5] L. Luo, Z. Cui, J.-P. Xiong, X.-M. Zhang and Y.-C. Jiao, "Compact printed ultra-wideband monopole antenna with dual band-notch characteristic," Institution of Engineering and Technology (IET), pp.1106-1107, 2008.
- [6] K. S. Ryu and A. A. Kishk, "UWB Antenna With Single or Dual Band-Notches for Lower WLAN Band and Upper WLAN Band," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 57, No. 12, pp.3942-3950, 2009.



- [7] Y. F. Weng, W. J. Lu, S. W. Cheung and T. I. Yuk, "UWB Antenna with Single or Dual Band-Notched Characteristic for WLAN Band using Meandered Ground Stubs," Loughborough Antenna & Propagation Conference, pp.757-760, 2009.
- [8] P. Raklua and J. Nakasuwan, "Planar UWB Antenna with Single Band-Notched Characteristic," International Conference on Control, Automation and System, pp.1978-1981, 2010.
- [9] M. Mehranpour, J. Nourinia, Ch. Ghobadi and M. Ojaroudi, "Dual Band-Notched Square Monopole Antenna for Ultrawideband Applications," IEEE Transactions and Wireless Propagation Letters, Vol. 11, pp.172-175, 2012.
- [10] N. Ojaroudi, M. Ojaroudi and N. Ghadimi, "Dual band-notched small monopole antenna with novel W-shaped conductor backed-plane and novel T-shaped slot for UWB applications," IET Microwaves, Antennas & Propagation, pp.8-14, 2013.
- [11] S. Pimpol and R. Wongsan, "Bandwidth Improvement of Band-Notched Printed Dipole Antenna for DTV Signal Reception," International Symposium on Communications and Information Technologies (ISCIT), pp. 138-142, 2013.
- [12] Xirrus Wi-Fi Inspector Manual [Online], Available: [https://csperson.kku.ac.th/chakchai/Tools/322766\\_Fa112014/3\\_xirrus.pdf](https://csperson.kku.ac.th/chakchai/Tools/322766_Fa112014/3_xirrus.pdf).

## คำแนะนำในการเตรียมต้นฉบับบทความ

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

### 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 และรวบรวมวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง (Literature Review)

- วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย (Materials and Methods) กล่าวถึงรายละเอียด การวิเคราะห์และทดลองที่กระชับและชัดเจน

- 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 และสามารถเว้นโคลงตรงละเอียดได้ที่ <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/lej>

2.2 แบบและขนาดตัวอักษร ใช้ตัวอักษรแบบ **Angsana UPC** 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 และสงวนสิทธิ์ในการตัดสินใจพิมพ์หรือไม่ก็ได้ 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 นอนน้อม 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](mailto:kmitleng.jnl@gmail.com) หมายเลขติดต่อ :

โทรศัพท์(เบอร์กลาง) 02-329-8000 ต่อ 3465

โทรศัพท์สายตรง/โทรสาร : 02-327-8317

โทรศัพท์มือถือ 088-262-4617



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)

# แบบฟอร์มสั่งซื้อวัสดุสารลาดกระบัง และ สมัครสมาชิก

ชื่อ.....นามสกุล.....

สถานที่จัดส่งหนังสือ.....

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

## สมัครสมาชิกวัสดุสารลาดกระบัง

- |                                                        |                                                        |
|--------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| <input type="checkbox"/> ปี 2559      ค่าสมัคร 200 บาท | <input type="checkbox"/> ปี 2562      ค่าสมัคร 200 บาท |
| <input type="checkbox"/> ปี 2560      ค่าสมัคร 200 บาท | <input type="checkbox"/> ปี 2563      ค่าสมัคร 200 บาท |
| <input type="checkbox"/> ปี 2561      ค่าสมัคร 200 บาท | <input type="checkbox"/> ปี 2564      ค่าสมัคร 200 บาท |

หมายเหตุ ปีละ 4 ฉบับ (รวมค่าจัดส่ง)

## ต้องการซื้อวัสดุสารลาดกระบัง

- |                                                                               |                                                        |
|-------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| <input type="checkbox"/> เล่มที่ 1 / 2562 ราคา 100 บาท                        | <input type="checkbox"/> เล่มที่ 1 / 2563 ราคา 100 บาท |
| <input type="checkbox"/> เล่มที่ 2 / 2562 ราคา 100 บาท                        | <input type="checkbox"/> เล่มที่ 2 / 2563 ราคา 100 บาท |
| <input type="checkbox"/> เล่มที่ 3 / 2562 ราคา 100 บาท                        | <input type="checkbox"/> เล่มที่ 3 / 2563 ราคา 100 บาท |
| <input type="checkbox"/> เล่มที่ 4 / 2562 ราคา 100 บาท                        | <input type="checkbox"/> เล่มที่ 4 / 2563 ราคา 100 บาท |
| <input type="checkbox"/> อื่น ๆ ปีที่.....ฉบับที่.....ประจำเดือน.....พ.ศ..... |                                                        |

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

## ชำระค่าสั่งซื้อโดย

☐ เงินสด แผนกตำรา วันที่.....เดือน.....พ.ศ.....

☐ ธนาคารที่ส่งจ่ายในนาม แผนกตำรา

เลขที่ 1 ซอยฉลองกรุง 1 แขวงลาดกระบัง เขตลาดกระบัง

กรุงเทพมหานคร 10520 ที่ทำการเคาน์เตอร์บริการเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 00016

☐ ผ่านบัญชีออมทรัพย์ธนาคารไทยพาณิชย์ สาขาย่อยเทคโนโลยีฯ เจ้าคุณทหาร

เลขที่ 1 ซอยฉลองกรุง 1 แขวงลาดกระบัง เขตลาดกระบัง

กรุงเทพมหานคร 10520

ชื่อบัญชี “แผนกตำราและประชาสัมพันธ์” เลขที่ 088 - 2 15272 - 2

## ถ่ายสำเนาใบสั่งซื้อ และส่งเอกสารการชำระค่าสั่งซื้อมาที่ :

งานวิจัยและนวัตกรรม (วัสดุสารลาดกระบัง) ส่วนสนับสนุนวิชาการ คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เลขที่ 1 ซอยฉลองกรุง 1 แขวงลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520

โทร. 0-2329-8000 ต่อ 3464, 3465

(ท่านสามารถแฟกซ์ใบสั่งซื้อ และเอกสารการชำระค่าสั่งซื้อมาที่เบอร์แฟกซ์ : 0-2329-8317

การจัดส่งหนังสือจะรวดเร็วขึ้น )

## Ladkrabang Engineering Journal

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

### 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 9<sup>th</sup> 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<sup>®</sup> 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 :

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

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

*Fax : (662) 329-8317*

### Advisors :

*Dean of Engineering*

*Assoc.Prof. Dr.Komsan Maleesee*

### Editor-in-chief :

*Prof. Dr. Worapong Tangsirat*

### Editorial Staff :

*Mr.Thanongsak Chaichuensaen  
Cover Design.*

*Asst. Prof. Dr.Napasool Wongvanich  
Miss.Chanunchida Nobnom*

*Mr.Sataporn Pongprayoon*

*Liaise & Member Relationships*

*Create Original Artwork & Proofreading  
and Photo Books.*

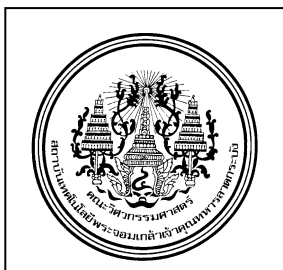
### Distributed by :

*Faculty of Engineering,*

*Miss.Chanunchida Nobnom*

*Mrs.Atisuda Chanvikorn*

*Tel : (662) 329-8317*



ISSN 0125-1724

วิศวกรรม  
ลาดกระบัง

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

# LADKRABANG ENGINEERING JOURNAL

Volume 37 Number 3

July - September 2020

1. Investigation of Spillway Design Flood Hydrographs and Flood Operation  
Rule Curve for Ubol Ratana Storage Dam 1  
S. Rattanatavon and N. Marjang
2. Switched Beam Antenna System with Modified Fruit Fly Optimization  
Algorithm 10  
R. Kawdungta and C. Phongcharoenpanich
3. Design of UHF RFID Tag Antenna for Packaging Liquid Applications 19  
P. Kumankad S. Eardprab T. Pumpoung and C. Phongcharoenpanich
4. Green Synthesis and Characterization of Carbon Nanotubes from Water  
Hyacinth Via Chemical Vapor Deposition 28  
S. Sasrimuang O. Chuchuen and A. Artnaseaw
4. A Compact Tri-Band Notched Monopole Antenna for WLAN/WiMAX  
Applications 34  
S. Pimpol and R. Wongsan