

# การออกแบบวงจรกรองสัญญาณแถบความถี่หยุดผ่านไมโครสตริป โดยใช้โครงสร้างแบบเตี้ยพับครึ่งและการประยุกต์ใช้งาน

## Design of a Microstrip Bandstop Filter using Folded Spurline Structures and Its Application

อลงกรณ์ หลงกุล นีวัตร์ อังควิษฐพันธ์\* ณัฐวุฒิ สุวรรณทา  
สาขาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม อ.กันทรวิชัย  
จ.มหาสารคาม 44150

Alongkorn Longkul Niwat Angkawisittpan\* Nattawoot Suwannata

Department of Electrical and Computer Engineering, Faculty of Engineering, Mahasarakham University,  
Kantarawichai, Mahasarakham 44150

Tel: 0-4375-4316 E-mail: niwat.a@msu.ac.th

### บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอวงจกรองสัญญาณแถบความถี่หยุดผ่านไมโครสตริปขนาดกะทัดรัดแบบใหม่ ซึ่งประกอบด้วยตัวเรโซเนเตอร์สองตัวที่ต่อเป็นลำดับกัน ตัวเรโซเนเตอร์เหล่านี้ทำจากโครงสร้างเตี้ยพับครึ่ง วงจกรองสัญญาณที่นำเสนอเริ่มต้นถูกพัฒนาจากโครงสร้างเตี้ยแบบดั้งเดิม แล้วทำการพับโครงสร้างเตี้ย และโครงสร้างเตี้ยพับครึ่งจำนวนสองตัวถูกนำมาต่อเป็นลำดับกันเพื่อให้วงจกรองสัญญาณแบบใหม่นี้เสร็จสมบูรณ์ วงจกรองสัญญาณนี้ถูกจำลองทางคอมพิวเตอร์ด้วยซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์ถูกนำไปยืนยันความถูกต้องโดยเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริง ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์และผลการทดลองจริงมีความสอดคล้องกันดี เทคนิคในการออกแบบนี้นำไปสู่วงจกรองสัญญาณแถบความถี่หยุดผ่านที่มีความกว้างแถบความถี่ที่กว้างและมีประสิทธิภาพ พร้อมกับมีขนาดที่เล็กกะทัดรัดเป็นอย่างมาก วงจกรองสัญญาณชนิดนี้ถูกนำไปประยุกต์ใช้งานกับสายอากาศชั่วคราวเพื่อการลดสัญญาณฮาร์มอนิก สายอากาศชั่วคราวที่มีและไม่มีวงจกรองสัญญาณนี้ถูกจำลองทางคอมพิวเตอร์ด้วยซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน สัมประสิทธิ์การสะท้อนที่ได้จากการจำลองทางคอมพิวเตอร์และการทดลองวัดจริงแสดงให้เห็นว่า สายอากาศชั่วคราวที่มีวงจกรองสัญญาณชนิด

นี้สามารถทำงานที่ความถี่มูลฐานและลดสัญญาณฮาร์มอนิกที่สามด้วย วงจกรองสัญญาณที่นำเสนอสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานกับวงจรมิโครสตริปอื่น ๆ ที่ต้องการให้วงจรมีขนาดเล็กกะทัดรัดได้

**คำหลัก** วงจกรองสัญญาณแถบความถี่หยุดผ่าน โครงสร้างเตี้ย สลับปลายเปิด สายอากาศชั่วคราว

### Abstract

A novel compact microstrip bandstop filter composed of two cascaded resonators made of folded spurlines is proposed. The filter is initially developed from an original spurline structure by folding the spurline structure. Then, two folded spurline structures are cascaded to complete the novel filter. The filter is simulated with the commercial software (CST Microwave Studio) for transmission coefficients. The simulated results of transmission coefficients are validated with the measured results. Both results are in good agreement. This technique can provide the effective wideband bandstop filter with the compact size. The proposed filter is applied in a monopole antenna for harmonic suppression. The monopole antennas with/without the proposed filter are simulated with the commercial software for reflection coefficients. The simulated and measured results of reflection coefficients show that the

monopole antenna with the proposed filter can provide the antenna to operate at the fundamental frequency and reduce the third harmonic as well. The proposed filter can be applied to other microstrip circuits for compact size requirement.

**Keywords:** Bandstop filter, spurline structure, open stub, monopole antenna

## 1. บทนำ

นับตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันระบบสื่อสารนับว่ามีความสำคัญในการดำรงชีวิตของมนุษย์เป็นอย่างมาก ในปัจจุบันนี้ระบบสื่อสารมีการพัฒนาขึ้นอย่างรวดเร็ว เช่น ระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ ระบบวิทยุสื่อสาร และระบบรับส่งสัญญาณอินเทอร์เนต เป็นต้น ระบบสื่อสารที่กล่าวมานี้ส่วนใหญ่ทำงานในย่านความถี่ไมโครเวฟ ส่วนประกอบหนึ่งของระบบคือ วงจรกรองความถี่ซึ่งนับว่าเป็นวงจรที่มีความสำคัญมากในระบบสื่อสาร วงจรกรองความถี่นี้ทำหน้าที่คัดแยกสัญญาณที่ต้องการออกจากสัญญาณที่ไม่ต้องการเพื่อป้องกันสัญญาณเข้าสู่ระบบต่อไป หรือลดทอนสัญญาณรบกวนออกจากระบบ [1]

วงจรกรองสัญญาณแถบความถี่หยุดผ่านไมโครสตริป (microstrip bandstop filter) มีความสำคัญในการคัดแยกสัญญาณที่ไม่ต้องการ หรือลดทอนสัญญาณรบกวนออกจากระบบในย่านความถี่ไมโครเวฟ และสามารถประยุกต์ใช้งานกับวงจรอื่นได้ เช่น ใช้หยุดสัญญาณรบกวนที่เกิดจากฮาร์โมนิกที่สอง (second harmonics) ของวงจรกรองสัญญาณแถบความถี่ผ่าน (bandpass filter) [2-3] โครงสร้างพื้นฐานที่ใช้ในการออกแบบวงจรกรองสัญญาณแถบความถี่หยุดผ่านคือ โครงสร้างแบบสตัปปลายเปิด (open stub) มีลักษณะโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 1 (ก) เมื่อพิจารณาจากกราฟแสดงสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (transmission coefficients,  $S_{21}$ ) ซึ่งแสดงให้เห็นถึงกำลังของสัญญาณที่สามารถผ่านไปได้ ดังแสดงในรูปที่ 2 พบว่า โครงสร้างสตัปปลายเปิดมีประสิทธิภาพในการใช้งานดี กล่าวคือ มีความกว้างแถบความถี่ (bandwidth) ที่กว้าง และมีประสิทธิภาพในการคัดแยกสัญญาณที่ไม่ต้องการออกจากระบบดี จึงมีการนำเอาโครงสร้างนี้มาเป็นโครงสร้างต้นแบบเพื่อนำไปพัฒนาโครงสร้างแบบอื่นต่อไป [4] อย่างไรก็ตาม โครงสร้างดังกล่าวนี้มีข้อเสียคือ โครงสร้างวงจรมีขนาดใหญ่ จึงไม่เหมาะสมที่จะนำไปใช้เชื่อมต่อกับอุปกรณ์

หรือวงจรอื่น ๆ รวมถึงสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายวัสดุในการสร้างวงจรมากขึ้น

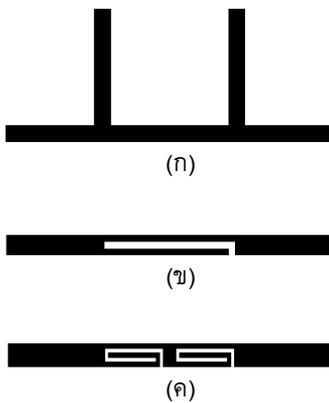
ในปี ค.ศ. 1977 R. N. Bates ได้ทำการออกแบบวงจรกรองสัญญาณแถบความถี่หยุดผ่านด้วยโครงสร้างแบบเดือย (spurline) โดยใช้เทคนิคการเจาะร่องเป็นรูปเดือยเข้าไปในแผ่นไมโครสตริปด้วยความยาวของร่องเท่ากับหนึ่งในสี่ของความยาวคลื่นของความถี่ที่ต้องการลดสัญญาณลง [5] ดังแสดงในรูปที่ 1 (ข) จะเห็นว่าโครงสร้างที่ได้มีขนาดเล็กมาก เมื่อเปรียบเทียบกับโครงสร้างแบบสตัปปลายเปิด เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการใช้งานของทั้งสองโครงสร้าง ดังแสดงในกราฟสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของสัญญาณในรูปที่ 2 พบว่า โครงสร้างแบบเดือยมีประสิทธิภาพในการหยุดสัญญาณที่ไม่ค่อยดีเท่าที่ควร และมีความกว้างแถบความถี่ที่แคบ ซึ่งเป็นข้อเสียของโครงสร้างนี้ ทำให้ไม่เหมาะสมที่จะนำไปใช้งานแบบเดือย แต่ด้วยข้อดีของโครงสร้างที่มีขนาดเล็กจึงเหมาะที่จะนำไปพัฒนาต่อยอดให้มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้นได้

ในปี ค.ศ. 2011 K. Lu และคณะ ได้พัฒนาโครงสร้างวงจรกรองสัญญาณแถบความถี่หยุดผ่านให้มีประสิทธิภาพในการใช้งานที่ดี โดยใช้เทคนิคในการนำวงจรกันหอย (spiral circuits) มาต่อกันเป็นลำดับ [6] เทคนิคนี้ช่วยให้สัญญาณที่ได้มีความกว้างแถบความถี่กว้างขึ้น และมีประสิทธิภาพในการหยุดผ่านสัญญาณดีขึ้นจริง แต่เมื่อนำวงจรมาต่อกันเป็นลำดับหลาย ๆ ลำดับ ก็จะทำให้โครงสร้างนั้นมีขนาดใหญ่ขึ้นตามไปด้วย และก่อให้เกิดผลเสียที่ตามมาอีกคือ การส่งสัญญาณจากทางเข้าไปสู่ทางออกที่มีระยะห่างกันมากขึ้น มีผลทำให้เกิดค่าการสูญเสียเนื่องจากการใส่แทรก (insertion loss) เกิดขึ้นสูง และสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายวัสดุในการสร้างวงจรด้วย

การออกแบบโดยใช้เทคนิคในการทำให้ระนาบกราวด์มีตำหนิ (Defected Ground Structures, DGS) [7-9] เป็นอีกหนึ่งเทคนิคที่นำมาใช้ในการออกแบบวงจรกรองสัญญาณแถบความถี่หยุดผ่าน โครงสร้างดังกล่าวนี้มีการเจาะร่องที่ระนาบกราวด์ (ground plane) จึงทำให้เกิดช่องว่างบริเวณระนาบกราวด์ ด้วยคุณสมบัติของสนามไฟฟ้าที่วิ่งจากแผ่นตัวนำด้านบนลงสู่ระนาบกราวด์ด้านล่าง จึงเป็นเหตุให้เกิดสนามไฟฟ้ารั่วไหลขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของวงจรลดทอนลงด้วย ในการป้องกันการรั่วของสนามไฟฟ้านี้จะต้องวางแผ่นโลหะปิดทับไว้อีกชั้นอย่างเหมาะสม ซึ่งเกิดความยุ่งยากซับซ้อนในการออกแบบมากยิ่งขึ้นด้วย

การนำวงจรกรองสัญญาณแถบความถี่หยุดผ่านไปประยุกต์ใช้งาน จะต้องมีการนำเอาวงจรกรองสัญญาณแถบ

ความถี่หยุดผ่านที่ออกแบบได้นั้น ไปต่อรวมกับวงจรอื่น ดังนั้น โครงสร้างของวงจรที่มีขนาดเล็ก และมีประสิทธิภาพในการใช้งานที่ดีนั้น จึงมีความเหมาะสมที่สุดที่จะนำไปประยุกต์ใช้งานในระบบสื่อสารยุคใหม่ อย่างไรก็ตาม โครงสร้างของวงจรกรองสัญญาณแถบความถี่หยุดผ่านที่มีประสิทธิภาพในการใช้งานที่ดี เช่น โครงสร้างแบบสแตมป์ปลายเปิดมีขนาดใหญ่เกินไป ทำให้ไม่เหมาะสมกับการนำไปต่อรวมกับวงจรอื่น ซึ่งเป็นการเพิ่มขนาดโครงสร้างวงจรให้มีขนาดใหญ่ขึ้นตามไปด้วย

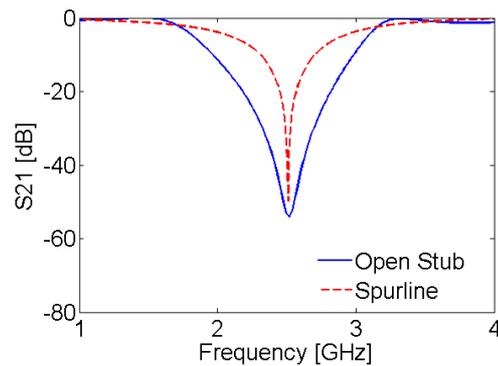


รูปที่ 1 วงจรกรองสัญญาณแถบความถี่หยุดผ่าน (ก) โครงสร้างแบบสแตมป์ปลายเปิด (ข) โครงสร้างแบบเดี่ยว (ค) โครงสร้างแบบเดี่ยวพับครึ่งที่นำเสนอ

บทความนี้นำเสนอวงจรกรองสัญญาณแถบความถี่หยุดผ่านด้วยโครงสร้างแบบเดี่ยวพับครึ่ง (folded spurlines) โดยใช้เทคนิคการพับครึ่งวงจรรูปเดี่ยวสองวงจร แล้วนำมาต่อกันเป็นลำดับดังแสดงในรูปที่ 1 (ค) เทคนิคดังกล่าวนี้ทำให้โครงสร้างวงจรมีขนาดเล็ก แต่มีประสิทธิภาพในการหยุดผ่านสัญญาณที่ไม่ต้องการดีขึ้น และมีความกว้างแถบความถี่ที่กว้างขึ้นเพื่อที่จะสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานโดยการต่อรวมกับวงจรอื่น ๆ ได้เหมาะสม การศึกษาคุณสมบัติของวงจรที่นำเสนอเริ่มจากการออกแบบและจำลองโครงสร้างด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ CST Microwave Studio เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของวงจรกรองสัญญาณแถบความถี่หยุดผ่านด้วยโครงสร้างแบบเดี่ยวพับครึ่ง

หลังจากนั้นทำการสร้างวงจร และทำการวัดสัมประสิทธิ์การส่งผ่านจากการทดลองจริงเพื่อเปรียบเทียบกับผลจากการจำลองทางคอมพิวเตอร์ นอกจากนั้น คณะผู้วิจัยได้นำเสนอการประยุกต์ใช้งานวงจรที่นำเสนอกับสายอากาศขั้วเดี่ยว (monopole

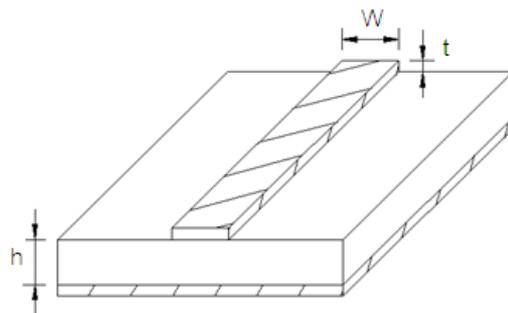
antennas) เพื่อลดสัญญาณฮาร์มอนิกที่สามของสายอากาศชนิดนี้



รูปที่ 2 กราฟแสดงสัมประสิทธิ์การส่งผ่านจากการจำลองทางคอมพิวเตอร์ของวงจรกรองสัญญาณแถบความถี่หยุดผ่านด้วยโครงสร้างแบบสแตมป์ปลายเปิด (เส้นทึบ) และโครงสร้างแบบเดี่ยว (เส้นประ)

## 2. การออกแบบวงจรกรองสัญญาณแถบความถี่หยุดผ่านด้วยโครงสร้างแบบเดี่ยวพับครึ่ง

วัสดุที่ใช้ในการออกแบบวงจรกรองสัญญาณด้วยโครงสร้างแบบเดี่ยวพับครึ่งคือ แผ่นวงจรพิมพ์ Arlon AD-260A ซึ่งมีค่าคงตัวไดอิเล็กตริก ( $\epsilon_r$ ) เท่ากับ 2.60 วัสดุฐานรองมีความหนา ( $h$ ) เท่ากับ 1 มิลลิเมตร แผ่นทองแดงที่ทำหน้าที่เป็นตัวนำสัญญาณมีความหนา ( $t$ ) เท่ากับ 0.0175 มิลลิเมตร และแผ่นทองแดงที่ทำหน้าที่เป็นระนาบกราวด์มีความหนา ( $t$ ) เท่ากับ 0.0175 มิลลิเมตร โครงสร้างแผ่นวงจรพิมพ์มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 โครงสร้างแผ่นวงจรพิมพ์

การหาขนาดความกว้างของแผ่นตัวนำสัญญาณ ( $W$ ) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (1) และ (2) [10] ซึ่งเป็นสมการที่ใช้สำหรับกรณีนี้  $\frac{W}{h} \geq 1$

$$\epsilon_{pe} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + 12 \frac{h}{W}\right)^{-0.5} \quad (1)$$

$$Z_c = \frac{\eta}{\sqrt{\epsilon_{re}}} \left\{ \frac{W}{h} + 1.393 + 0.677 \ln \left( \frac{W}{h} + 1.444 \right) \right\}^{-1} \quad (2)$$

เมื่อ  $\eta$  คือ ค่าอิมพีแดนซ์ของ free space มีค่าเท่ากับ  $120\pi$  โอห์ม และ  $Z_c$  คือค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายส่งแบบไมโครสตริป มีค่าเท่ากับ 50 โอห์ม ทำการแทนค่า  $\eta=120\pi$ ,  $Z_c = 50$ , ความสูงของวัสดุฐานรอง ( $h$ ) = 1 มิลลิเมตร ลงในสมการที่ (1) และ (2) จะได้ขนาดความกว้างของแผ่นตัวนำสัญญาณ ( $W$ ) เท่ากับ 2.8 มิลลิเมตร และได้ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกยังผล (effective dielectric constant,  $\epsilon_{re}$ ) เท่ากับ 2.148 การออกแบบให้วงจรเดียวพับครึ่งทำงานที่ความถี่ 2.5 GHz ต้องทำการหาค่าความยาวของเดี่ยว ( $L$ ) จากสมการที่ (3) (4) และ (5)

$$\lambda_0 = \frac{c}{f} \quad (3)$$

$$\lambda_g = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_{re}}} \quad (4)$$

เมื่อ  $\lambda_g$  คือ ความยาวคลื่น (เมตร)

$\lambda_0$  คือ ความยาวคลื่นในอากาศ (เมตร)

$c$  คือ ความเร็วแสงมีค่าเท่ากับ  $3 \times 10^8$  (เมตร/วินาที)

$f$  คือ ความถี่ที่ออกแบบ (Hz)

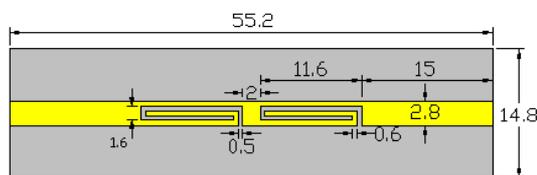
$$L = \frac{\lambda_g}{4} \quad (5)$$

จากสมการที่ (3), (4) และ (5) จะได้ค่าความยาวของเดี่ยว ( $L$ ) เท่ากับ 20.5 มิลลิเมตร

จากการศึกษาผลกระทบของโครงสร้างวงจรในรูปแบบต่าง ๆ ดังที่ได้กล่าวมาข้างต้นนั้น พบว่าเมื่อมีการนำวงจรมาต่อกันแบบลำดับจะทำให้ความกว้างแถบความถี่กว้างขึ้น ดังนั้นเพื่อปรับปรุงให้วงจรแบบเดียวมีประสิทธิภาพในการใช้งานที่ดี โดยที่ขนาดโครงสร้างวงจรยังคงเท่าเดิม จึงได้ทำการพับครึ่งของความยาวเดี่ยวแล้วนำวงจรที่ได้มาต่อกันแบบลำดับ และปรับแต่งค่าความยาวเดี่ยว รวมถึงระยะห่างระหว่างเดี่ยวทั้งสองตัวที่ต่อกันอยู่ เพื่อให้ได้ค่าความถี่ตามที่ต้องการคือ 2.5 GHz

จากรูปที่ 4 โครงสร้างวงจรในส่วนของตัวนำสัญญาณ ( $W$ ) มีความกว้าง 2.8 มิลลิเมตร ขนาดความยาวของเดี่ยวหนึ่งตัวเมื่อทำการพับครึ่งแล้ว มีความยาว

เท่ากับ 11.6 มิลลิเมตร (มีความยาวประมาณเพียงหนึ่งในแปดของความยาวคลื่นของความถี่ 2.5 GHz ที่ต้องการลดขนาดสัญญาณลง) มีการเจาะร่องเข้าด้านในของแผ่นตัวนำให้เกิดช่องว่างกว้าง 0.5 มิลลิเมตร เพื่อให้วงจรทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและทำงานตรงตามความถี่ออกแบบที่เหมาะสมที่สุด จึงมีการเว้นระยะห่างระหว่างวงจรเดี่ยวที่ต่อกันอยู่ 2 มิลลิเมตร และเพื่อให้โครงสร้างวงจรมีความแข็งแรงทางกายภาพจึงออกแบบให้ขนาดของแผ่นวงจรพิมพ์มีความกว้างที่ 14.8 มิลลิเมตร และมีความยาว 55.2 มิลลิเมตร



รูปที่ 4 ขนาดจำลองของวงจรกรองสัญญาณแถบความถี่หยุดผ่านแบบเดี่ยวพับครึ่งที่ออกแบบให้ทำงานที่ความถี่ 2.5 GHz

โครงสร้างวงจรกรองสัญญาณแถบความถี่หยุดผ่านแบบสแตมป์ปลายเปิด ดังรูปที่ 1 (ก) มีขนาดของโครงสร้างดังนี้คือ สแตมป์ปลายเปิดทั้งสองอันมีความหนา 2.8 มิลลิเมตร และมีความยาว 20.5 มิลลิเมตร และวางห่างกัน 20.5 มิลลิเมตร (มีความยาวหนึ่งในสี่ของความยาวคลื่นของความถี่ 2.5 GHz ที่ต้องการลดขนาดสัญญาณลง) โครงสร้างวงจรกรองสัญญาณแถบความถี่หยุดผ่านแบบเดี่ยวดั้งเดิม ดังรูปที่ 1 (ข) มีขนาดของโครงสร้างดังนี้คือ สายนำสัญญาณไมโครสตริปมีความหนา 2.8 มิลลิเมตร และมีการเจาะร่องให้มีความยาว 20.5 มิลลิเมตร (มีความยาวหนึ่งในสี่ของความยาวคลื่นของความถี่ 2.5 GHz ที่ต้องการลดขนาดสัญญาณลง) สัมประสิทธิ์การส่งผ่านจากผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์ของโครงสร้างทั้งสองถูกนำมาเปรียบเทียบกับสัมประสิทธิ์การส่งผ่านจากผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์ของโครงสร้างวงจรกรองสัญญาณแถบความถี่หยุดผ่านแบบเดี่ยวพับครึ่งที่ถูกนำเสนอไว้ ดังแสดงในรูปที่ 5 และ 6

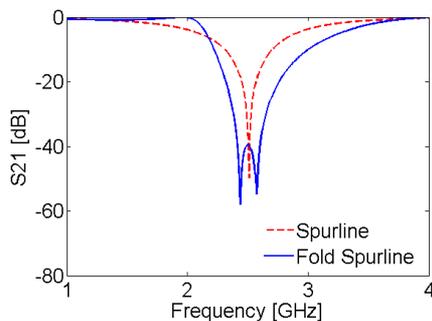
### 3. ผลการทดลอง

#### 3.1 วงจรกรองสัญญาณแถบความถี่หยุดผ่านด้วยโครงสร้างเดี่ยวพับครึ่ง

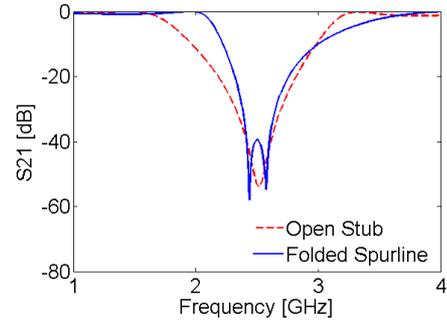
เมื่อทำการออกแบบโครงสร้างวงจรให้ได้ขนาดความกว้างและความยาวของแผ่นตัวนำไมโครสตริปที่สามารถทำงานที่ความถี่ 2.5 GHz ได้อย่างเหมาะสมแล้ว ในขั้นตอนต่อไปคือทำการจำลองโครงสร้างวงจรทางคอมพิวเตอร์โดยใช้

โปรแกรม CST Microwave Studio ขนาดโครงสร้างของวงจรจริงต้องสร้างให้ได้ขนาดเท่ากับขนาดจำลองของวงจร เมื่อทำการจำลองโครงสร้างวงจรแล้ว จะได้สัมประสิทธิ์การส่งผ่านดังแสดงในรูปที่ 5 เมื่อเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การส่งผ่านที่ได้จากวงจรจริงกับความถี่ที่ได้จากโครงสร้างเดียวพบครึ่งที่นำเสนอนี้กับวงจรที่ได้จากโครงสร้างเดียวแบบดั้งเดิม ดังรูปที่ 5 พบว่า ความกว้างแถบความถี่จากโครงสร้างเดียวพบครึ่ง (เส้นทึบ) มีความกว้างกว่าความถี่แถบความถี่จากโครงสร้างเดียว (เส้นประ) และโครงสร้างแบบเดียวพบครึ่งมีความสามารถในการลดทอนขนาดของสัญญาณในช่วงแถบหยุดได้ดีกว่า (สังเกตจากสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของวงจรที่นำเสนอมีค่าน้อยกว่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของวงจรแบบเดียวในช่วงแถบหยุดผ่าน) ในขณะที่ขนาดของวงจรมีขนาดใกล้เคียงกัน (ประมาณหนึ่งในสี่ของความยาวคลื่นของความถี่ 2.5 GHz ที่ต้องการลดขนาดสัญญาณลง)

เมื่อนำผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์ของวงจรเดียวพบครึ่งมาเปรียบเทียบกับผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์ของวงจรสลับปลายเปิด ดังแสดงในรูปที่ 6 พบว่าทั้งสองวงจรมีประสิทธิภาพในการทำงานที่ใกล้เคียงกัน ในขณะที่วงจรแบบเดียวพบครึ่งมีขนาดโครงสร้างวงจรที่เล็กกะทัดรัดกว่ามาก ดังนั้นวงจรแบบเดียวพบครึ่งสามารถนำไปสร้างเป็นวงจรกรองสัญญาณความถี่แถบหยุดผ่านที่มีประสิทธิภาพดีเทียบเท่ากับวงจรแบบสลับปลายเปิด แต่มีขนาดเล็กกว่า ซึ่งจะช่วยลดค่าใช้จ่ายวัสดุในการสร้างวงจร และสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานกับวงจรอื่น ๆ ที่ต้องการให้วงจรมีขนาดเล็กกะทัดรัด แต่ยังคงรักษาประสิทธิภาพการใช้งานได้ดียิ่ง

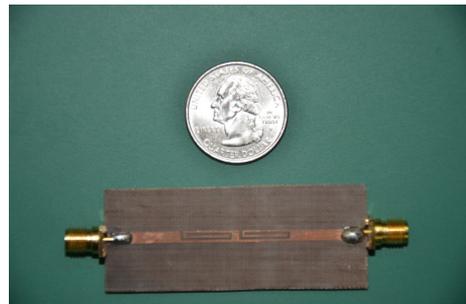


รูปที่ 5 สัมประสิทธิ์การส่งผ่านจากการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ สำหรับโครงสร้างวงจรกรองสัญญาณแถบความถี่หยุดผ่านแบบเดียวพบครึ่ง (เส้นทึบ) เทียบกับแบบเดียว (เส้นประ)

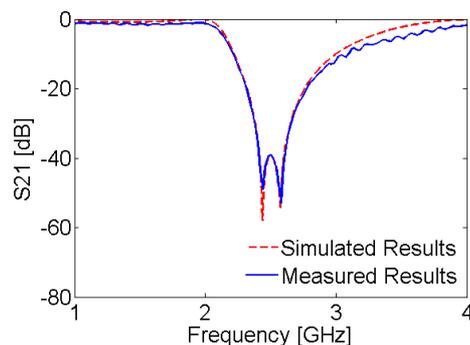


รูปที่ 6 สัมประสิทธิ์การส่งผ่านจากการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์สำหรับโครงสร้างวงจรกรองสัญญาณแถบความถี่หยุดผ่านแบบเดียวพบครึ่ง (เส้นทึบ) เทียบกับแบบสลับปลายเปิด (เส้นประ)

เมื่อทำการสร้างวงจรแบบเดียวพบครึ่งขึ้นจริงแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือ การนำวงจรไปทดลองวัดค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านจริง เพื่อเปรียบเทียบผลระหว่างค่าจำลองทางคอมพิวเตอร์และการทดลองวัดจริงว่า มีข้อแตกต่างกันอย่างไร ต้นแบบของวงจรแบบเดียวพบครึ่งมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 7 เมื่อนำวงจรแบบเดียวพบครึ่งไปทดสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์เครือข่ายแบบเวกเตอร์ (vector network analyzer) จะได้ผลการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 8



รูปที่ 7 รูปถ่ายของวงจรกรองสัญญาณแถบความถี่หยุดผ่านแบบเดียวพบครึ่ง



รูปที่ 8 สัมประสิทธิ์การส่งผ่านของวงจรกรองสัญญาณแถบความถี่หยุดผ่านแบบเดียวพบครึ่งจากการจำลองทางคอมพิวเตอร์ (เส้นประ) เปรียบเทียบกับจากการทดลองวัดจริง (เส้นทึบ)

จากผลการทดสอบพบว่า วงจรกรองสัญญาณแถบความถี่หยุดผ่านแบบเดียวพับครึ่งสามารถทำงานได้ที่ความถี่ 2.5 GHz เมื่อทำการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การส่งผ่านระหว่างการจำลองทางคอมพิวเตอร์และการทดลองวัดจริงพบว่า เส้นกราฟที่ได้มีความใกล้เคียงและสอดคล้องกันดีมาก ดังนั้นวงจรกรองสัญญาณแถบความถี่หยุดผ่านแบบเดียวพับครึ่งที่ทำการสร้างขึ้นนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้จริง

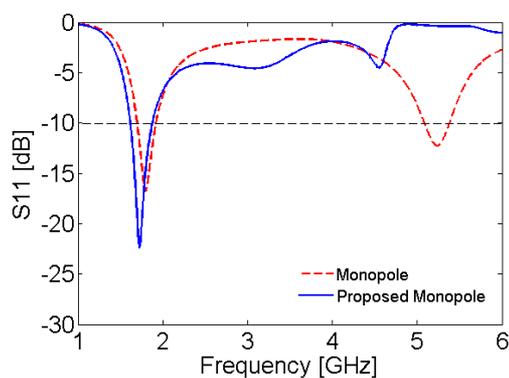
### 3.2 การประยุกต์ใช้วงจรที่นำเสนอกับสายอากาศขั้วเดียว

การรับส่งสัญญาณในย่านความถี่ไมโครเวฟได้มีการใช้สายอากาศที่ออกแบบโดยใช้แผ่นวงจรมิพเป็นวัสดุหลัก สายอากาศขั้วเดียวเป็นสายอากาศชนิดหนึ่งที่ถูกออกแบบให้ทำงานที่ย่านความถี่ไมโครเวฟ [11] การออกแบบให้สายอากาศขั้วเดียวทำงานที่ความถี่ 1.8 GHz จะมีขนาดความยาวของแผ่นตัวนำสัญญาณที่ทำหน้าที่เป็นสายอากาศ ( $l$ ) เท่ากับ 37 มิลลิเมตร ขนาดความกว้างของแผ่นตัวนำสัญญาณ ( $w$ ) เท่ากับ 2.8 มิลลิเมตร และระนาบกราวด์มีความกว้างเท่ากับ 32.8 มิลลิเมตร และยาวเท่ากับ 25 มิลลิเมตร ทั้งนี้เพื่อให้ได้ความถี่สัญญาณตามที่ต้องการ ขนาดความกว้างและความยาวของตัวนำสัญญาณอาจมีการปรับเปลี่ยนตามความเหมาะสม ขนาดความกว้างและความยาวทั้งหมดนี้สามารถหาได้จากสมการที่ (1) (2) (3) (4) (5) และ (6) นำขนาดโครงสร้างวงจรที่ออกแบบได้มาทำการจำลองทางคอมพิวเตอร์โดยใช้โปรแกรม CST Microwave Studio เพื่อหาสัมประสิทธิ์การสะท้อน (reflection coefficients,  $S_{11}$ ) ที่เกิดขึ้นกับวงจร (ความถี่ใด ๆ ที่มีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนต่ำกว่า -10 เดซิเบล ความถี่นั้น ๆ คือความถี่ที่สามารถใช้งานได้) จากนั้นทำการปรับปรุงขนาดของสายอากาศเพื่อให้ได้ความถี่ทำงานตามต้องการคือ 1.8 GHz ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสดงในรูปที่ 9 (เส้นประ)

$$l = \frac{\lambda_g}{4} \quad (6)$$

ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์ในรูปที่ 9 แสดงให้เห็นเส้นกราฟสัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศขั้วเดียว เมื่อสังเกตที่เส้นประจะพบว่ามีเส้นกราฟตกลงที่ความถี่ 1.8 GHz ซึ่งตรงตามความถี่ที่ออกแบบไว้ ดังนั้น

แสดงว่าวงจรสายอากาศขั้วเดียวที่ออกแบบไว้นี้ สามารถนำไปสร้างขึ้นจริงเพื่อนำไปใช้งานต่อไปได้ นอกจากนั้นมีการตกลงของกราฟเส้นประที่ความถี่ถัดมา คือความถี่ประมาณ 5.3 GHz ด้วย ความถี่ดังกล่าวนี้เรียกว่าความถี่ฮาร์มอนิกที่สาม สายอากาศขั้วเดียวนี้สามารถรับสัญญาณที่ความถี่ 5.3 GHz ได้ด้วย มีผลทำให้เกิดการรบกวนกับความถี่มูลฐานที่ออกแบบไว้ (1.8 GHz) ดังนั้นการลดทอนสัญญาณรบกวนนี้ต้องนำวงจรกรองสัญญาณแถบความถี่หยุดผ่านแบบเดียวพับครึ่งมาเชื่อมต่อกันกับวงจรสายอากาศขั้วเดียว เพื่อที่ลดสัญญาณรบกวนที่ความถี่ดังกล่าวนี้ไม่ให้ผ่านเข้าสู่ระบบได้



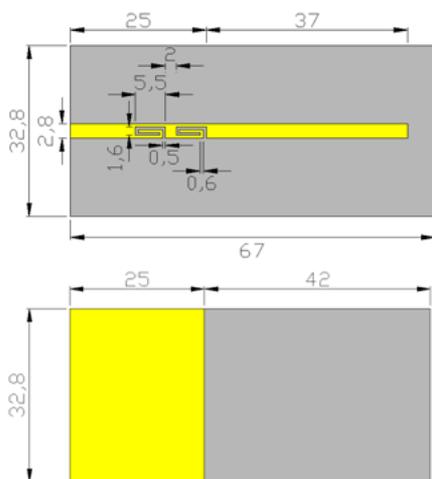
รูปที่ 9 สัมประสิทธิ์การสะท้อนจากการจำลองทางคอมพิวเตอร์สำหรับสายอากาศขั้วเดียวแบบดั้งเดิม (เส้นประ) และแบบที่มีวงจรกรองสัญญาณที่นำเสนอ (เส้นทึบ)

การนำวงจรกรองสัญญาณแถบความถี่หยุดผ่านมาใช้ในการหยุดสัญญาณรบกวนที่เกิดจากสัญญาณฮาร์มอนิกที่สามของสายอากาศขั้วเดี่ยวนั้น จะต้องนำวงจรทั้งสองมาเชื่อมต่อกัน ซึ่งจะทำให้วงจรที่ได้มีขนาดใหญ่ขึ้น แต่ด้วยวงจรเดียวพับครึ่งที่ออกแบบได้นี้ มีขนาดเล็กและสามารถแทรกเข้าในวงจรสายอากาศขั้วเดียวได้ จึงไม่ทำให้ขนาดของวงจรมันเปลี่ยนแปลง เมื่อต้องการหยุดสัญญาณรบกวนที่ความถี่ 5.3 GHz จะต้องออกแบบวงจรเดียวพับครึ่งให้ทำงานเพื่อหยุดความถี่ 5.3 GHz ด้วยโดยใช้สมการที่ (1) (2) (3) (4) และ (5) เมื่อนำวงจรกรองสัญญาณแถบความถี่หยุดผ่านที่นำเสนอนี้มาต่อรวมกับสายอากาศขั้วเดียวแล้ว จะมีรูปร่างดังแสดงในรูปที่ 10 ซึ่งพบว่าขนาดของวงจรมันที่ได้นั้นไม่มีการเปลี่ยนแปลง แสดงว่าทั้งสองวงจรมันสามารถรวมกันได้อย่างเหมาะสม จากกราฟของสัมประสิทธิ์การสะท้อนจากการจำลองทางคอมพิวเตอร์ในรูปที่ 9 สำหรับสายอากาศขั้วเดียวที่มีวงจรกรองสัญญาณแถบความถี่หยุดผ่านที่นำเสนอ (เส้นทึบ) แสดงให้เห็นว่า สายอากาศชนิดนี้สามารถทำงานที่ความถี่มูล

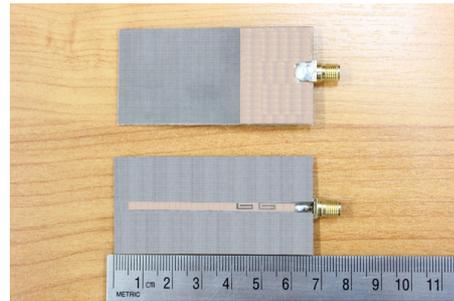
ฐาน 1.8 GHz ได้ แต่ไม่สามารถทำงานที่ความถี่ฮาร์โมนิกที่สาม 5.3 GHz ดังนั้นสายอากาศขั้วเดียวที่ต่อรวมอยู่กับวงจรกรองสัญญาณแถบความถี่หยุดผ่านแบบพับครึ่งสามารถทำงานที่ความถี่ 1.8 GHz และกำจัดสัญญาณรบกวนจากฮาร์โมนิกที่สามออกไปได้ ยิ่งไปกว่านั้นสายอากาศชนิดนี้ยังคงมีขนาดไม่เปลี่ยนแปลงอีกด้วย

เมื่อนำวงจรที่ออกแบบได้มาสร้างขึ้นจริงจะได้โครงสร้างวงจรดังแสดงในรูปที่ 11 และนำวงจรที่ได้ไปทดสอบโดยใช้เครื่องวิเคราะห์เครือข่ายแบบเวกเตอร์เพื่อหาสัมประสิทธิ์การสะท้อน จากนั้นนำผลการทดลองที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์เพื่อวิเคราะห์ผล รูปที่ 12 แสดงผลการทดลองวงจกรองสัญญาณแถบความถี่แบบเดียวพับครึ่งเมื่อใช้งานร่วมกับสายอากาศขั้วเดียว

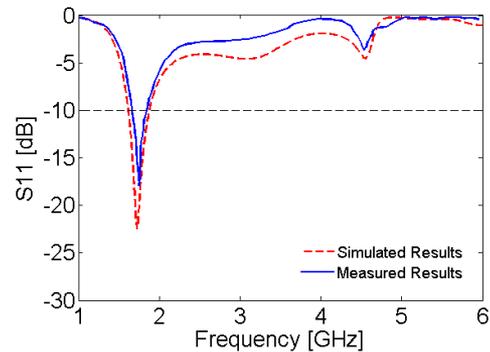
ผลการทดลองของสายอากาศขั้วเดียวเมื่อใช้งานร่วมกับวงจรกรองสัญญาณแถบความถี่หยุดผ่านแบบเดียวพับครึ่งดังแสดงในรูปที่ 12 แสดงให้เห็นว่าสายอากาศชนิดนี้สามารถทำงานได้ที่ความถี่ 1.8 GHz และสามารถลดสัญญาณรบกวนจากฮาร์โมนิกที่สามได้ตามที่ออกแบบไว้ เมื่อทำการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การสะท้อนระหว่างการจำลองทางคอมพิวเตอร์และการทดลองวัดจริง พบว่า เส้นกราฟที่ได้มีความใกล้เคียงและสอดคล้องกันดีมาก ดังนั้นสายอากาศขั้วเดียวเมื่อใช้งานร่วมกับวงจรกรองสัญญาณแถบความถี่หยุดผ่านแบบเดียวพับครึ่ง สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้จริง



รูปที่ 10 ขนาดจำลองของโครงสร้างสายอากาศขั้วเดียวที่ต่อร่วมกับวงจรกรองสัญญาณแถบความถี่ผ่านแบบเดียวพับครึ่งที่ออกแบบให้ทำงานที่ความถี่ 1.8 GHz และลดฮาร์โมนิกที่สามลง (5.3GHz)



รูปที่ 11 รูปถ่ายของสายอากาศขั้วเดียวเมื่อเชื่อมต่อกับวงจรกรองสัญญาณแถบความถี่หยุดผ่านแบบเดียวพับครึ่ง



รูปที่ 12 สัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศขั้วเดียวที่ต่อเชื่อมกับวงจรกรองสัญญาณแถบความถี่หยุดผ่านแบบเดียวพับครึ่งจากการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ (เส้นประ) เปรียบเทียบกับจากการทดลองวัดจริง (เส้นทึบ)

#### 4. บทสรุป

บทความวิจัยนี้ได้เสนอวิธีการออกแบบและสร้างวงจกรองสัญญาณแถบความถี่หยุดผ่านไมโครสตริบโดยใช้โครงสร้างแบบเดียวพับครึ่งเพื่อจุดประสงค์ในการรักษาประสิทธิภาพในการหยุดผ่านเทียบเคียงกับวงจรที่ออกแบบด้วยโครงสร้างสลับปลายเปิด แต่มีขนาดที่เล็กกะทัดรัดกว่า และสามารถนำไปใช้งานร่วมกับวงจรอื่น ๆ ได้ ซึ่งจะช่วยลดการสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายวัสดุในการสร้างวงจรได้อีกด้วย ผลการทดลองวัดค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของวงจรที่นำเสนอมีความใกล้เคียงและสอดคล้องกันดีกับผลที่ได้จากการจำลองทางคอมพิวเตอร์ คือสามารถหยุดสัญญาณในช่วงความถี่ 2.5 GHz ตามที่ออกแบบไว้ได้ และขนาดของวงจรมีขนาดเล็กกะทัดรัดมาก

นอกจากนั้นคณะผู้วิจัยได้ทำการประยุกต์ใช้วงจรที่นำเสนอนี้กับสายอากาศขั้วเดียวเพื่อลดฮาร์โมนิกที่สามของสายอากาศชนิดนี้ ผลการทดลองวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศที่มีวงจกรองสัญญาณที่นำเสนอนี้ต่อรวมอยู่มีสอดคล้องกันดีกับผลที่ได้จากการจำลองทางคอมพิวเตอร์ คือสามารถทำงานที่ความถี่มูลฐาน 1.8 GHz และหยุดสัญญาณ

ฮาร์มอนิกที่สามในช่วงความถี่ 5.3 GHz ได้ตามที่ต้องการ ออกแบบไว้ สายอากาศขั้วเดียวที่ต่อกับวงจรกรองสัญญาณที่นำเสนอแล้วยังคงมีขนาดไม่เปลี่ยนแปลงอีกด้วย

### กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ที่สนับสนุนวัสดุในการทำวิจัย ห้องปฏิบัติการวิจัย NTC Telecommunications Research Laboratory มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่อนุญาตให้ใช้ซอฟต์แวร์ CST Microwave Studio ห้องปฏิบัติการทางฟิสิกส์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ที่อนุญาตให้ใช้เครื่องวิเคราะห์เครือข่ายแบบเวกเตอร์

### เอกสารอ้างอิง

- [1] สมศักดิ์ อรรถทิมากุล และศรัณย์ ชูคดี. 2554. การพัฒนาสื่อการเรียนการสอน เรื่องวงจรกรองความถี่ในย่านคลื่นสำหรับการศึกษาด้านวิศวกรรมไมโครเวฟ. การประชุมวิชาการครุศาสตร์อุตสาหกรรมระดับชาติ ครั้งที่ 4, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, ประเทศไทย, 7-8 กรกฎาคม 2554: 227-232.
- [2] Fallahzadeh, S. and Tayarani, M. 2009. A compact microstrip bandstop filter. Progress In Electromagnetics Research Letters. 11:167-172.
- [3] Liu, H., Knoechel, R.H. and Schuenemann, K.F. 2007. Miniaturized bandstop filter using meander spurline and capacitively loaded stubs. ETRI Journal. 29(5): 614-618.
- [4] Tu, W.H. and Chang, K. 2005. Compact microstrip bandstop filter using open stub and spurline. IEEE Transactions on Microwave and Wireless Components Letters. 15(4): 268- 270.
- [5] Bates, R.N. 1977. Design of microstrip spur-line band-stop filters. IEE Journal on Microwaves, Optics and Acoustics. 1(6): 209-214.
- [6] Lu, K., Wang, G.M. and Xu, H.X. 2011. Compact and sharp-rejection bandstop filter using uniplanar double spiral resonant cells. Radioengineering. 20(2): 468-471.
- [7] Woo, D.J., Lee, T.K., Lee, J.W., Pyo, C.S. and Choi, W.K. 2006. Novel U-slot and V-slot DGSs for bandstop filter with improved Q factor. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 54(6): 2840-2847.
- [8] Wang, X.H., Wang, B.Z., Zhang, H. and Chen, K.J. 2007. A tunable bandstop resonator based on a compact slotted ground structure. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 55(9): 1912-1918.
- [9] นวัตกรรม วิศวกรรมศาสตร์. 2554. เทคโนโลยีในการออกแบบวงจรกรองความถี่แถบหยุดผ่านไมโครสตริป. วารสารวิชาการ วิศวกรรมศาสตร์ ม.อ. 4(2): 35-49.
- [10] Hong, J.S. and Lancaster, M.J. 2001. Microstrip filters for RF/microwave applications, New York: John Wiley & Son Inc.
- [11] Lu, J.H. and Li, Y.H. 2011. Planar multi-band T-shaped monopole antenna with a pair of mirrored L-shaped strips for WLAN/WIMAX operation. Progress In Electromagnetics Research. 21: 33-44.