



## การสังเคราะห์วงจรกรองผ่านแถบความถี่ในท่อนำคลื่นด้วยวิธี K-inverter สำหรับการศึกษา ด้านวิศวกรรมไมโครเวฟ

ณัฐพงษ์ อินทวิเศษ\* และ สมศักดิ์ อรรถทิมากุล

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

\* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 08 6776 6548 อีเมล: nattakwan@gmail.com DOI: 10.14416/j.kmutnb.2019.01.004

รับเมื่อ 28 สิงหาคม 2561 แก้ไขเมื่อ 26 พฤศจิกายน 2561 ตอบรับเมื่อ 30 พฤศจิกายน 2561 เผยแพร่ออนไลน์ 15 มกราคม 2562

© 2019 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการสังเคราะห์วงจรกรองผ่านแถบความถี่ในท่อนำคลื่นสำหรับการศึกษาด้านวิศวกรรมไมโครเวฟ ที่สร้างเป็นโปรแกรมจำลองที่ทำงานภายใต้ฟังก์ชัน GUI ของโปรแกรม MATLAB® การสังเคราะห์วงจรกรองผ่านแถบความถี่ จะอาศัยทฤษฎีการประมาณค่าแบบ Chebyshev และใช้เทคนิควิธีการแปลงค่าแบบ K-inverter เพื่อออกแบบโครงสร้างวงจรกรองความถี่ในท่อนำคลื่นที่ใช้แผ่นช่องแคบแบบตัวเหนี่ยวนำที่ทำงานในช่วงความถี่ 8.35–8.65 จิกะเฮิรตซ์ จากนั้นสร้างชิ้นงาน และทดสอบการทำงานโดยการเปรียบเทียบกับโปรแกรมจำลองเชิงพาณิชย์ ผลการวิจัยพบว่าวงจรกรองผ่านแถบความถี่ในท่อนำคลื่นที่ออกแบบโดยใช้โปรแกรมจำลองที่พัฒนาขึ้นให้ผลลัพธ์ที่สอดคล้องกับโปรแกรมจำลองเชิงพาณิชย์และทางทฤษฎีวงจรกรองความถี่ ที่สามารถนำไปสร้างชิ้นงานจริงและใช้เป็นวงจรต้นแบบเพื่อใช้ประกอบการเรียนการสอนทางด้านวิศวกรรมได้อย่างมีประสิทธิภาพ

**คำสำคัญ:** วงจรช่องแคบแบบตัวเหนี่ยวนำ, วงจรกรองแถบผ่านความถี่ในท่อนำคลื่น, โปรแกรมจำลอง, เทคนิคของวิธี K-inverter



## Synthesis of Waveguide Band-pass Filter Using K-inverter Technique for Microwave Engineering Education

Nattapong Intarawiset\* and Somsak Akatimagool

Department of Teacher Training in Electrical Engineering, Faculty of Technical Education, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Bangkok, Thailand

\* Corresponding Author, Tel. 08 6776 6548, E-mail: nattakwan@gmail.com DOI: 10.14416/j.kmutnb.2019.01.004

Received 28 August 2018; Revised 26 November 2018; Accepted 30 November 2018; Published online: 15 January 2019

© 2019 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

### Abstract

This research presents a synthesis of waveguide band-pass filter using the K-inverter technique for microwave engineering education. The simulator based on the K-inverter technique was developed using the GUI function of MATLAB®. The band pass filter was synthesized using the Chebyshev approximation theory and the K-inverter technique to design the structure of inductive iris filter in waveguide. The designed BPF filter was implemented in operating frequency range of 8.35–8.65 GHz and tested in comparison to a commercial simulator. The simulated results of designed waveguide BPF filter using developed simulator are consistent to commercial simulator and filter theory. The designed waveguide band-pass filter using the K-inverter technique can be implemented and used effectively as a prototype filter in engineering education.

**Keywords:** Inductive Iris, Waveguide Bandpass Filter, Simulation Program, K-inverter Technique

Please cite this article as: N. Intarawiset and S. Akatimagool, "Synthesis of waveguide band-pass filter using K-inverter technique for microwave engineering education," *The Journal of KMUTNB*, vol. 29, no. 2, pp. 247–258, Apr.–Jun. 2019 (in Thai).

## 1. บทนำ

ท่อนำคลื่นเป็นอุปกรณ์พาสซีฟชนิดหนึ่งที่มีบทบาทสำคัญที่มีคุณลักษณะความแตกต่างจากวงจรอื่นที่สามารถทนกำลังงานสูงๆ ได้ ดังนั้นจึงได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้งานในหลายๆ ด้าน เช่น ระบบการสื่อสารดาวเทียม ระบบเรดาร์ ระบบสื่อสารโทรคมนาคม เป็นต้น การส่งผ่านพลังงานของคลื่นไมโครเวฟในท่อนำคลื่นจำเป็นต้องมีการแมตซ์ซิงอิมพีแดนซ์ในการเชื่อมต่อทางขาเข้าและทางขาออกเพื่อลดค่าการสูญเสียย้อนกลับระหว่างแหล่งกำเนิดและท่อนำคลื่น และเพื่อให้สามารถส่งผ่านสัญญาณความถี่ที่ต้องการ จำเป็นต้องมีวงจรกรองความถี่เป็นส่วนหนึ่งในระบบการทำงาน ดังนั้นจึงมีนักวิจัยหลายท่านให้ความสนใจและพัฒนางจรกรองความถี่อย่างต่อเนื่อง [1]–[7] ซึ่งพบว่าการออกแบบวงจรกรองความถี่ที่ใช้อุปกรณ์แบบกลุ่มก้อน (Lumped Element) [1] จะทำงานได้ดีในย่านความถี่วิทยุ แต่มีข้อจำกัดในการใช้งานย่านความถี่ไมโครเวฟ ต่อมาได้มีการการออกแบบโดยใช้โครงสร้างวงจรไมโครสตริป [2]–[4] ที่สามารถรองรับกับความถี่ไมโครเวฟได้ดี แต่มีข้อจำกัดในการทนต่อพลังงานสูงๆ ได้ไม่มากนัก ฉะนั้นจึงมีนักวิจัยหลายท่านให้ความสนใจในการออกแบบวงจรกรองความถี่ในท่อนำคลื่นที่ใช้วงจรช่องแคบ [6] แต่ยังคงพบว่ามีข้อจำกัดในการออกแบบโครงสร้างที่มีความยุ่งยาก ดังนั้นจึงมีการนำเสนอการออกแบบโดยการใช้เทคนิควิธีการของ K-inverter [5]–[7] ซึ่งมีจุดเด่นที่สามารถออกแบบและคำนวณโครงสร้างวงจรที่สัมพันธ์กับค่าอุปกรณ์ที่เป็นตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุได้ตามที่ผู้ใช้งานต้องการ ตลอดจนสามารถนำเทคนิควิธีการดังกล่าวไปใช้ในการพัฒนางจรกรองผ่านแถบความถี่ที่เป็นโครงสร้างใหม่ๆ ในท่อนำคลื่นได้อย่างมีประสิทธิภาพ

การศึกษาด้านวิศวกรรมไมโครเวฟในปัจจุบันมักจะประสบปัญหาในด้านการออกแบบวงจรกรองความถี่ย่านไมโครเวฟ เนื่องจากมีเนื้อหาที่ซับซ้อน วิธีการคำนวณมีความยุ่งยาก ดังนั้นนักวิจัยส่วนใหญ่จึงได้ออกแบบและพัฒนาแบบลองผิดลองถูก (Trial and Error) ในการสร้างวงจรกรองความถี่โดยใช้โปรแกรมจำลองเชิงพาณิชย์เพื่อให้ได้ผลการตอบสนองทางความถี่ที่สอดคล้องกับความต้องการของ

ผู้ใช้งาน ซึ่งเป็นอีกวิธีการที่ใช้เวลาในการออกแบบค่อนข้างมาก และต้องใช้ประสบการณ์และความเชี่ยวชาญเฉพาะทางของนักวิจัยจึงจะสามารถสร้างวงจรกรองความถี่ย่านไมโครเวฟที่มีประสิทธิภาพได้

บทความวิจัยนี้ผู้วิจัยมีแนวคิดในการสังเคราะห์วงจรกรองผ่านแถบความถี่ในท่อนำคลื่นโดยใช้เทคนิควิธีการของ K-inverter สำหรับการศึกษาด้านวิศวกรรมไมโครเวฟ และพัฒนาเป็นโปรแกรมจำลองที่ใช้ฟังก์ชัน GUI ของ MATLAB® ที่มีความสามารถในออกแบบวงจรกรองผ่านแถบความถี่และวิเคราะห์ผลตอบสนองการทำงานทางความถี่ ซึ่งผลของงานวิจัยสามารถช่วยในการลดขั้นตอนและความยุ่งยากของการคำนวณและการออกแบบวงจรกรองความถี่ตามที่ผู้ใช้งานต้องการ ตลอดจนสามารถนำไปใช้ประกอบในการเรียนการสอนทางด้านวิศวกรรมไมโครเวฟได้อย่างมีประสิทธิภาพ

## 2. การสังเคราะห์วงจรกรองความถี่

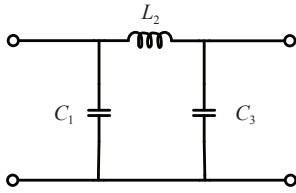
### 2.1 วงจรกรองความถี่ต้นแบบ

การออกแบบวงจรกรองความถี่พื้นฐานโดยใช้ต้นแบบจากอุปกรณ์กลุ่มก้อน (Lumped Element) โดยใช้วิธีการประมาณค่าแบบเซฟปีเซฟ ซึ่งเริ่มต้นด้วยการกำหนดค่า Ripple จำนวนอันดับของวงจร และสร้างวงจรกรองความถี่ต้นแบบอันดับ 3 ดังแสดงในรูปที่ 1 จากนั้นแปลงวงจรต้นแบบให้เป็นวงจรกรองผ่านแถบความถี่ ดังแสดงในรูปที่ 2

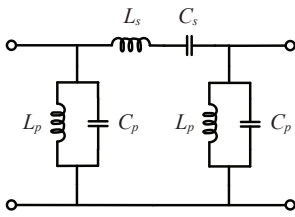
เมื่อพิจารณาสมการที่ (1) สามารถหาค่าอุปกรณ์ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุได้ผลตอบสนองความถี่จากการแปลงเป็นวงจรกรองผ่านแถบความถี่ในช่วงแถบความถี่  $\omega_U - \omega_L$  ที่มีความถี่กลางเท่ากับ  $\omega_0$  เมื่อ  $\omega_0 = \sqrt{\omega_L \omega_U}$  ดังนั้นสามารถหาค่าดิแอมพลิจูดและแอมพลิจูดและซัสเซปแตนซ์ดังในสมการที่ (2) และสมการที่ (3) ซึ่งสามารถเขียนเป็นพารามิเตอร์การส่งผ่าน (Transmission Parameter) ได้ดังสมการที่ (4)

$$\Omega = \frac{\omega_c}{\omega_U - \omega_L} \left( \frac{\omega}{\omega_c} - \frac{\omega_c}{\omega} \right) \quad (1)$$

$$jX_s = \frac{1}{j\omega C_s} + j\omega L_s \quad (2)$$



รูปที่ 1 วงจรกรองความถี่ต้นแบบ



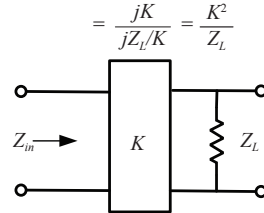
รูปที่ 2 การแปลงวงจรกรองผ่านแถบความถี่

$$jB_p = \frac{1}{j\omega L_p} + j\omega C_p \quad (3)$$

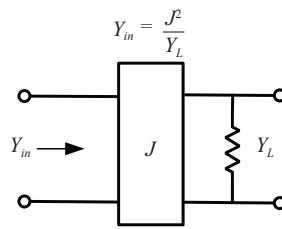
$$[T] = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ jB_p & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & jX_s \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ jB_p & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

2.2 วงจรกรองผ่านแถบความถี่โดยวิธีการแปลงค่าอิมพีแดนซ์

การแปลงวงจรโดยใช้อิมพีแดนซ์อินเวอร์เตอร์ (Impedance Inverters) ที่สามารถเปลี่ยนค่าอิมพีแดนซ์ ( $K$  พารามิเตอร์) หรือค่าแอดมิตแตนซ์ ( $J$  พารามิเตอร์) ซึ่งคุณลักษณะเหล่านี้เป็นการเปลี่ยนวงจรกรองความถี่ให้อยู่ในรูปของวงจรเทียบเคียงที่สามารถนำไปดำเนินการสร้างวงจรไมโครเวฟบนโครงสร้างวงจรไมโครสตริปและท่อนำคลื่นได้อย่างไร้ที่ติ เนื่องจากค่าของอุปกรณ์พาสซีฟที่ต่อแบบขนานและแบบอนุกรมที่ใช้ในการจูนความถี่นั้นทำได้ค่อนข้างยาก ดังนั้นการวิเคราะห์ส่วนใหญ่จึงนิยมอาศัยวงจรต้นแบบในรูปแบบของวงจรอิมพีแดนซ์อินเวอร์เตอร์ (Impedance Inverters) [6] โดยในทางอุดมคติการทำงานของอิมพีแดนซ์อินเวอร์เตอร์ ( $K$  พารามิเตอร์) คล้ายกับการใช้งานสายส่งที่มีความยาว  $\lambda/4$  ที่นำไปใช้ในแต่ละย่านความถี่ การหาความสัมพันธ์ของอินพุตอิมพีแดนซ์เมื่อมีการต่อโหลดเข้าที่ปลายสายส่ง ดังแสดงในรูปที่ 3 สามารถคำนวณหาได้จาก



รูปที่ 3 การเชื่อมต่ออิมพีแดนซ์ที่มีโหลด



รูปที่ 4 การเชื่อมต่อแอดมิตแตนซ์ที่มีโหลด

สมการที่ (5)

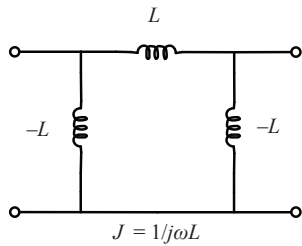
$$Z_{in} = \frac{AZ_L + B}{CZ_L + D} \quad (5)$$

ทำนองเดียวกันในการพิจารณาทางอุดมคติของการแปลงโดยใช้แอดมิตแตนซ์อินเวอร์เตอร์ ( $J$  พารามิเตอร์) จะคล้ายกับการใช้งานสายส่งที่มีความยาว  $\lambda/4$  และเมื่อต่อโหลด  $Y_L$  เข้าไปในวงจร ดังแสดงในรูปที่ 4 สามารถเขียนสมการอินพุตแอดมิตแตนซ์ได้ดังสมการที่ (6)

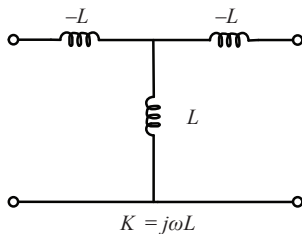
$$Y_{in} = \frac{J^2}{Y_L} \quad (6)$$

ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์และแอดมิตแตนซ์อินเวอร์เตอร์ มีคุณลักษณะคือ  $J = 1/K$  และมีคุณลักษณะเหมือนกันเมื่อค่าของ  $K = J$  มีค่าเท่ากับ 1 เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 5 และรูปที่ 6 โดยแสดงให้เห็นถึงโครงสร้างของสายส่งที่มีความยาว  $\lambda/4$  ที่เขียนเป็นความสัมพันธ์ในรูปของ  $J$  และ  $K$  อินเวอร์เตอร์ ซึ่งจะเห็นได้ว่าโครงสร้างวงจรภายในวงจรกลายเป็น 2 รูปแบบคือ 1) แบบพาย ( $\pi$ -Model) 2) แบบที (T-Mode) ที่ประกอบด้วยตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำที่มีค่าเป็นลบและไม่สามารถนำไปใช้ได้จริงในทางปฏิบัติ

ณัฐพงษ์ อินทวิเศษ และ สมศักดิ์ อรรถคิมากุล, “การสังเคราะห์วงจรกรองผ่านแถบความถี่ในท่อนำคลื่นด้วยวิธี K-inverter สำหรับการศึกษา ด้านวิศวกรรมไมโครเวฟ.”



รูปที่ 5 วงจรเทียบเคียงของ  $J$  อินเวอร์เตอร์



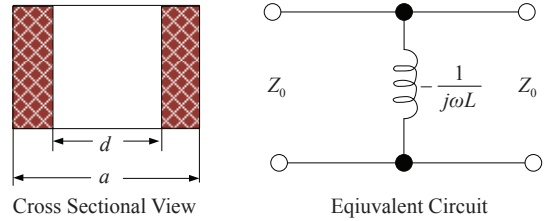
รูปที่ 6 วงจรเทียบเคียงของ  $K$  อินเวอร์เตอร์

จึงจำเป็นต้องต้องปรับลดรูปให้อยู่ในรูปของตัวเรโซเนเตอร์ภายในวงจรความถี่ที่ต้องการใช้งาน

### 2.3 วงจรกรองผ่านแถบความถี่ในท่อนำคลื่น [7]

วงจรกรองความถี่ในท่อนำคลื่นสามารถนำเสนอในรูปแบบความไม่ต่อเนื่อง โดยหลักการทางพื้นฐานของวงจรกรองความถี่ในท่อนำคลื่นจะอาศัยวงจรช่องแคบที่มีลักษณะคล้ายกับตัวเหนี่ยวนำต่อขนานหรือเรียกว่าวงจรช่องแคบหรือไอริส (Iris) มีลักษณะเป็นการนำโลหะแผ่นบางๆ ขนาดความหนาน้อยกว่าความยาวคลื่นที่ใช้งานมากๆ ที่มีสภาพความเป็นตัวนำไฟฟ้าต่ำ โดยวางขวางกันอยู่ด้านในของท่อนำคลื่นในลักษณะที่มีทิศทางการขนานกับสนามไฟฟ้า ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลผ่านและเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็ก โดยวงจรเทียบเคียงทางไฟฟ้าของวงจรช่องแคบแบบตัวเหนี่ยวนำ (Inductive Iris) ดังแสดงในรูปที่ 7

การสร้างวงจรกรองผ่านแถบความถี่ในท่อนำคลื่น จะใช้วิธีการคำนวณของอิมพีแดนซ์อินเวอร์เตอร์ ของโครงสร้างที่ประกอบด้วยชิ้นส่วนวงจรเรโซเนเตอร์ของวงจรช่องแคบที่ต่อเรียงเป็นลำดับ โดยระยะห่างของแต่ละวงจรช่องแคบทำหน้าที่ควบคุมและปรับค่าช่วงแถบความถี่ได้ตามที่ผู้ใช้งาน



$$[T_L] = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{j\omega L} & 1 \end{bmatrix}$$

Inductive Transfer Matrix

รูปที่ 7 วงจรช่องแคบในท่อนำคลื่น

ต้องการ

สำหรับการออกแบบวงจรกรองความถี่ของท่อนำคลื่น จะต้องเลือกโหมดพื้นฐาน ที่มีผลต่อขนาดท่อนำคลื่น ความถี่ใช้งาน ความถี่ตัด ค่าคงที่การแผ่กระจาย และค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ โดยใช้ความสัมพันธ์ดังในสมการที่ (7) และ (8)

$$Z_0 = \frac{\eta \lambda_g}{\lambda_0} = \frac{\eta}{[1 - (\omega_c / \omega)^2]^{1/2}} \quad (7)$$

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{\omega}{v} [1 - (\omega_c / \omega)^2]^{1/2} \quad (8)$$

การวิเคราะห์การทำงานของวงจรสายส่งพื้นฐานจะใช้พารามิเตอร์การส่งผ่าน  $[T_{Line}]$  ดังสมการที่ (9) และการหาค่าเฟส  $\theta$  จะเป็นไปตามสมการที่ (10) เมื่อ  $\lambda_{g0}$  เป็นค่าความยาวคลื่นที่เดินทางในท่อนำคลื่นที่ความถี่กลางและความยาวของท่อนำคลื่น ( $l$ ) มีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่น  $\lambda_{g0}/2$  แสดงดังสมการที่ (11)

$$[T_{Line}] = \begin{bmatrix} \cos \theta & j \sin \theta \\ j \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\theta = \beta l = \frac{2\pi l}{\lambda_g} = \frac{\pi \lambda_{g0}}{\lambda_g} \quad (10)$$

$$l = \frac{\lambda_{g0}}{2} \quad (11)$$



ดังนั้นวิธีการแบบอิมพีแดนซ์อินเวอร์เตอร์จะแสดงความสัมพันธ์ของวงจรช่องแคบแบบตัวเหนี่ยวนำที่วางในท่อนำคลื่น ที่สามารถเขียนเป็นพารามิเตอร์การส่งผ่าน  $[T_L]$  ได้ดังสมการที่ (12) [9] จากนั้นเมื่อนำมาจัดรูปสมการใหม่ โดยรวมกับความยาวทางไฟฟ้า ( $\psi$ ) ของท่อนำคลื่น ดังสมการที่ (13)

$$[T_L] = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -jB_L \lambda_g & 1 \\ \lambda_{g0} & \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\psi = \frac{\psi_0 \lambda_{g0}}{\lambda_g} \quad (13)$$

เมื่อพิจารณาในลักษณะวงจรช่องแคบวางอยู่ในท่อนำคลื่นแบบสมมาตร จะเขียนความสัมพันธ์พารามิเตอร์การส่งผ่าน  $[T]$  ได้ดังสมการที่ (14) และสามารถแสดงเป็นวงจรเทียบเคียงได้ดังรูปที่ 8

$$[T] = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\psi/2) & j \sin(\psi/2) \\ j \sin(\psi/2) & \cos(\psi/2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -jB_L \lambda_g & 1 \\ \lambda_{g0} & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\psi/2) & j \sin(\psi/2) \\ j \sin(\psi/2) & \cos(\psi/2) \end{bmatrix}$$

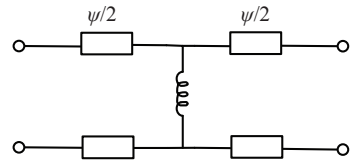
$$[T] = \begin{bmatrix} \cos(\psi) + \frac{B_L \lambda_g}{2 \lambda_{g0}} \sin(\psi) & j \left[ \sin(\psi) + \frac{B_L \lambda_g}{\lambda_{g0}} \sin^2(\psi/2) \right] \\ j \left[ \sin(\psi) - \frac{B_L \lambda_g}{\lambda_{g0}} \cos^2(\psi/2) \right] & \cos(\psi) + \frac{B_L \lambda_g}{2 \lambda_{g0}} \sin(\psi) \end{bmatrix} \quad (14)$$

จากสมการที่ (14) เมื่อจัดรูปใหม่โดยการแปลงเป็น  $K$  อินเวอร์เตอร์ สามารถแสดงดังสมการที่ (15)

$$[T] = \begin{bmatrix} 0 & -j \lambda_{g0} \\ -jK \lambda_g & 0 \\ \lambda_{g0} & \end{bmatrix} \quad (15)$$

จะเห็นว่าค่า  $K$  อินเวอร์เตอร์ เป็นคุณลักษณะของสมการแอดมิตแตนซ์ เมื่อกำหนด  $\lambda_g = \lambda_{g0}$  ดังนั้น

$$\cos(\psi_0) + \frac{B_L \lambda_g}{2 \lambda_{g0}} \sin(\psi_0) = 0 \quad (16)$$



รูปที่ 8 วงจรเทียบเคียงของวงจรช่องแคบในท่อนำคลื่น

โดยค่าของ  $\psi_0$  หาได้ดังสมการที่ (17)

$$\psi_0 = -\tan^{-1} \left( \frac{2}{B_L} \right) \quad (17)$$

จากสมการที่ (14) เมื่อนำค่าจากพารามิเตอร์  $C$  ลบด้วยค่าของพารามิเตอร์  $B$  จะได้ดังสมการที่ (18)

$$K - \frac{1}{K} = B_L [\sin^2(\psi/2) + \cos^2(\psi/2)] = B_L \quad (18)$$

ค่าของซีสเซปแดนซ์ ( $B_L$ ) ของช่องแคบตัวเหนี่ยวนำจะเป็นบวกเมื่อ  $1/K < K > 1$  ดังนั้นจากสมการที่ (14) ค่าของพารามิเตอร์  $A$  เขียนได้ดังสมการที่ (19)

$$A = \cos \left( \frac{\psi_0 \lambda_{g0}}{\lambda_g} \right) + \frac{B_L}{2} \left( \frac{\lambda_{g0}}{\lambda_g} \right) \sin \left( \frac{\psi_0 \lambda_{g0}}{\lambda_g} \right) \quad (19)$$

แทนค่า  $B_L$  จากสมการที่ (17) จะได้ดังสมการที่ (20)

$$\frac{B_L}{2} = -\frac{1}{\tan(\psi_0)} \quad (20)$$

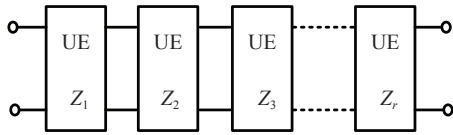
ดังนั้นจะได้พารามิเตอร์  $A$  ใหม่ดังสมการที่ (21)

$$A = \cos \left( \frac{\psi_0 \lambda_{g0}}{\lambda_g} \right) - \left( \frac{2 \lambda_g}{\lambda_{g0} \tan(\psi_0)} \right) \sin \left( \frac{\psi_0 \lambda_{g0}}{\lambda_g} \right) \quad (21)$$

ทำนองเดียวกันเมื่อแทน  $B_L$  ในพารามิเตอร์  $B$  จะได้ดังสมการที่ (22)

$$B = \sin \left( \frac{\psi_0 \lambda_{g0}}{\lambda_g} \right) - \left( \frac{2 \lambda_g}{\tan(\psi_0) \lambda_{g0}} \right) \sin^2 \left( \frac{\psi_0 \lambda_{g0}}{2 \lambda_g} \right) \quad (22)$$

สำหรับการออกแบบวงจรกรองผ่านแถบความถี่ที่สามารถ



รูปที่ 9 วงจรเทียบเคียงจำนวน N ต่อเรียงตามลำดับ

อาศัยทฤษฎีการประมาณค่าแบบ Chebyshev ที่มีสมการโอนย้าย แสดงดังสมการที่ (23)

$$|S_{21}(j\omega)|^2 = \frac{1}{1 + \varepsilon^2 T_N^2[\alpha \sin(\theta)]} \quad (23)$$

เมื่อ  $\theta = \pi\lambda_{g0}/\lambda_g$  และผลการตอบสนองจะเปลี่ยนไปตามความถี่จะได้ดังสมการที่ (24)

$$|S_{21}(j\omega)|^2 = \frac{1}{1 + \varepsilon^2 T_N^2[\alpha(\lambda_g / \lambda_{g0}) \sin(\pi(\lambda_g / \lambda_{g0}))]} \quad (24)$$

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของโครงสร้างวงจรช่องแคบในท่อนำคลื่น สามารถกำหนดความถี่กลาง ความถี่ตัดด้านต่ำและด้านสูงของแถบความถี่ โดยเขียนอยู่ในรูป UE (Unit Element) ที่นำมาเชื่อมต่อแบบ ลำดับแสดงดังรูปที่ 9 สำหรับสมการที่ใช้ในหาค่าอิมพีแดนซ์ที่มีวงจรจำนวน N ต่อเรียงตามลำดับ

สมการความยาวคลื่นในการกำหนดช่วงแถบผ่านความถี่ หาได้จากสมการที่ (25)

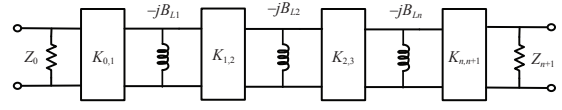
$$\lambda_{g0} = \frac{\lambda_{g1} + \lambda_{g2}}{2} + \frac{1}{\pi} \left[ \frac{\lambda_{g1} \cos \left[ \frac{\pi\lambda_{g2}}{2\lambda_{g1}} \right] + \lambda_{g2} \cos \left[ \frac{\pi\lambda_{g1}}{2\lambda_{g2}} \right]}{\sin \left[ \frac{\pi\lambda_{g2}}{2\lambda_{g1}} \right] + \sin \left[ \frac{\pi\lambda_{g1}}{2\lambda_{g2}} \right]} \right] \quad (25)$$

สามารถคำนวณค่า  $\lambda_{g1}, \lambda_{g2}$  ได้จากสมการที่ (26), (27)

$$\lambda_{g1} = \frac{\lambda_{01}}{\sqrt{1 - (\omega_c / \omega_{f1})}} \quad (26)$$

$$\lambda_{g2} = \frac{\lambda_{02}}{\sqrt{1 - (\omega_c / \omega_{f2})}} \quad (27)$$

การหาค่าอิมพีแดนซ์  $[Z_r]$  ในแต่ละอันดับของผลการ



รูปที่ 10 วงจรเทียบเคียงที่ได้จากการแปลง K-inverter

ตอบสนอง Chebyshev หาได้จากสมการที่ (28)

$$Z_r = \frac{2\alpha}{\eta} \left[ \frac{(2r-1)}{2N} \right] - \frac{1}{4\eta\alpha} \left[ \frac{\eta^2 + \sin^2(r\pi/N)}{\sin[2r+1]\pi/2_N} + \frac{\eta^2 + \sin^2[(r-1)\pi/N]}{\sin[(2r-3)\pi/2_N]} \right] \quad (28)$$

เมื่อค่าอิมพีแดนซ์  $Z_0 = Z_{N+1} = 1$  และค่า  $\alpha$  สามารถหาได้จากสมการที่ (29)

$$\alpha = \left[ \frac{\lambda_{g0}}{\lambda_{g1}} \sin \left( \frac{\pi\lambda_{g0}}{\lambda_{g1}} \right) \right]^{-1} \quad (29)$$

สำหรับการแปลงค่าอิมพีแดนซ์โดยวิธี K-inverter จะใช้สมการที่ (30) และวงจรเทียบเคียงแสดงดังรูปที่ 10

$$K_{r,r+1} = \frac{\sqrt{[\eta^2 + \sin^2(r\pi/N)]}}{\eta} \quad (30)$$

$$K'_{r,r+1} = \frac{K_{r,r+1}}{\sqrt{Z_r Z_{r+1}}} \quad (31)$$

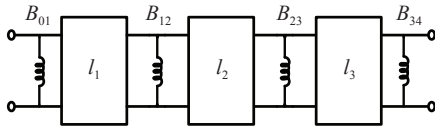
เมื่อ  $\eta$  หาได้จากสมการที่ (32)

$$\eta = \sinh \left[ \frac{1}{N} \sinh^{-1} \left( \frac{1}{\varepsilon} \right) \right] \quad (32)$$

การหาค่าชัศเชิงแบนซ์ของวงจรช่องแคบตัวเห็นวนำ จะใช้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอิมพีแดนซ์และค่าการแปลง โดยใช้อินเวอร์สสมการในวิธี K-inverter ที่สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (33)

$$B_{r,r+1} = \frac{\sqrt{Z_r Z_{r+1}}}{K_{r,r+1}} - \frac{K_{r,r+1}}{\sqrt{Z_r Z_{r+1}}} \quad (33)$$

การหาค่าความยาวทางไฟฟ้า ( $\psi_r$ ) ของท่อนำคลื่น จะใช้สมการที่ (34)



รูปที่ 11 วงจรเทียบเคียงของวงจรกรองผ่านแถบความถี่ที่ใช้ใช้งาน

$$\psi_r = \pi - \frac{1}{2} \left[ \cot^{-1} \left( \frac{B_{r+1,r}}{2} \right) + \cot^{-1} \left( \frac{B_{r,r-1}}{2} \right) \right] \quad (34)$$

ดังนั้นระยะห่างระหว่างวงจรช่องแคบ ( $l_r$ ) ที่นำไปใช้งานสามารถหาค่าได้จากสมการที่ (35)

$$l_r = \frac{\psi_r}{\pi} \frac{\lambda_{g0}}{2} \quad (35)$$

การหาค่าความกว้างของช่องแคบสามารถวิเคราะห์จากความสัมพันธ์ของค่าซีสเซพแดนซ์ของวงจรช่องแคบแต่ละตัวที่วางเรียงเป็นลำดับภายในท่อนำคลื่น โดยจำเป็นต้องปรับปรุ่ค่า Susceptance ให้สัมพันธ์กับความถี่และค่าอิมพีแดนซ์ที่ใช้ใช้งาน ที่สามารถหาค่าได้จากสมการที่ (36) [10] โดยมีวงจรเทียบเคียงแสดงดังในรูปที่ 11

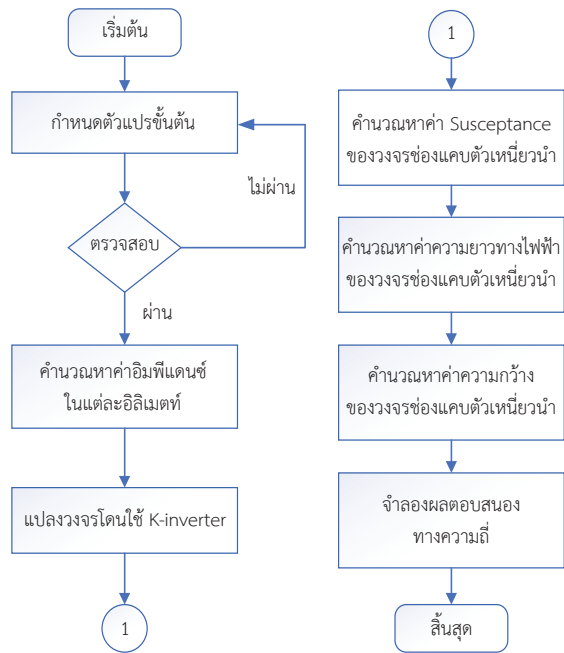
$$B_i = \frac{\lambda_{g0}}{a} \cot^2 \left( \frac{\pi d}{2a} \right) \quad (36)$$

### 3. การออกแบบโปรแกรมจำลอง

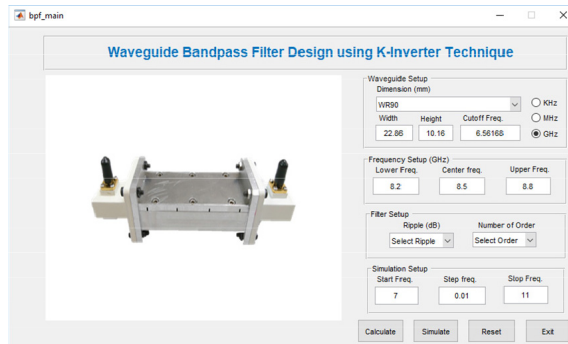
การออกแบบโปรแกรมจำลองวงจรกรองผ่านแถบความถี่ในท่อนำคลื่นด้วยเทคนิควิธี K-inverter จะถูกสร้างโดยใช้ฟังก์ชัน GUI (Graphic User Interface) ของโปรแกรม MATLAB ในการหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของท่อนำคลื่นสามารถแสดงขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมที่สร้างขึ้นดังรูปที่12

สำหรับการออกแบบโปรแกรมมีลำดับขั้นตอนดังนี้

- 1) กำหนดค่าพารามิเตอร์ ได้แก่ ขนาดท่อนำคลื่น จำนวนอันดับ ค่า Ripple แถบความถี่ และความถี่ตัด
- 2) คำนวณค่าอิมพีแดนซ์ของวงจรกรองความถี่ที่ใช้การประมาณค่าแบบ Chebyshev
- 3) แปลงค่าอิมพีแดนซ์ให้อยู่ในรูปของ K-inverter



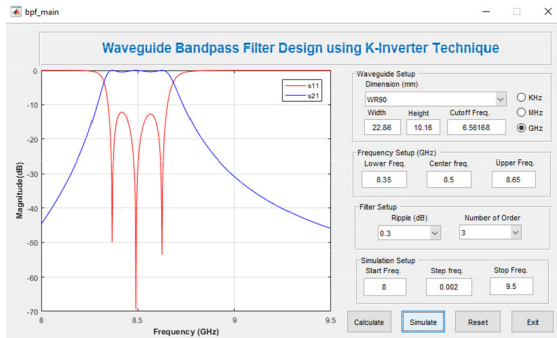
รูปที่ 12 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม



รูปที่ 13 หน้าต่างโปรแกรมจำลองที่พัฒนาขึ้น

- 4) คำนวณค่าซีสเซพแดนซ์ของวงจรช่องแคบตัวเหนี่ยวนำ โดยแปลงกลับจากสมการของวิธี K-inverter
- 5) คำนวณค่าของระยะห่างระหว่างช่องแคบโดยใช้สมการความสัมพันธ์ของความยาวทางไฟฟ้า
- 6) คำนวณหาค่าความกว้างของช่องแคบ
- 7) จำลองผลตอบสนองทางความถี่ที่ได้สำหรับผลของโปรแกรมจำลองที่พัฒนาขึ้นโดยใช้โปรแกรม GUI ของ MATLAB แสดงดังรูปที่ 13 และ 14



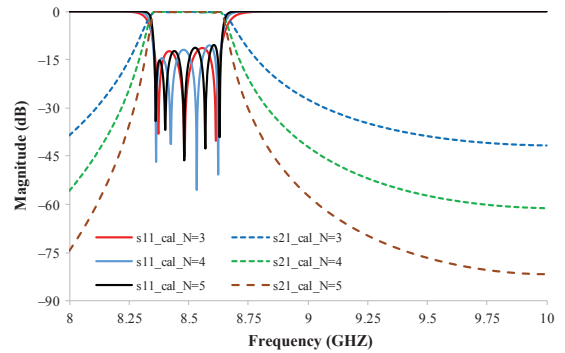


รูปที่ 14 หน้าต่างของผลการจำลองของโปรแกรม

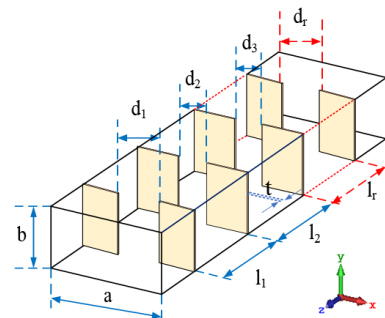
สำหรับการทดสอบการทำงานโปรแกรมจำลองจะใช้ขนาดของท่อนำคลื่นตามมาตรฐาน WR90 มีการป้อนสัญญาณแหล่งจ่ายที่ความถี่กลางเท่ากับ 8.5 จิกะเฮิรตซ์ ความกว้างของแถบความถี่เท่ากับ 300 เมกะเฮิรตซ์ ค่าของ Ripple เท่ากับ 0.3 เดซิเบล ผลการออกแบบโครงสร้างวงจรของความถี่ที่มีจำนวนอันดับ (N) เท่ากับ 3, 4 และ 5 โดยใช้โปรแกรมจำลองที่พัฒนาขึ้น แสดงได้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ที่ออกแบบจากโปรแกรมจำลอง

พารามิเตอร์ (มิลลิเมตร)	N=3	N=4	N=5
ความกว้าง (a)	22.86	22.86	22.86
ความสูง (b)	10.16	10.16	10.16
ความหนา (t)	0.1	0.1	0.1
ความกว้าง (d1)	10.72	10.61	10.56
ความกว้าง (d2)	6.91	6.69	6.61
ความกว้าง (d3)	6.91	6.18	6.02
ความกว้าง (d4)	10.72	6.69	6.02
ความกว้าง (d5)	-	10.61	6.61
ความกว้าง (d6)	-	-	10.56
ความยาว (l1)	24.24	24.36	24.42
ความยาว (l2)	25.93	26.20	26.27
ความยาว (l3)	24.24	26.20	26.43
ความยาว (l4)	-	24.36	26.27
ความยาว (l5)	-	-	24.42



รูปที่ 15 การเปรียบเทียบผลตอบสนองของจำนวนอันดับ

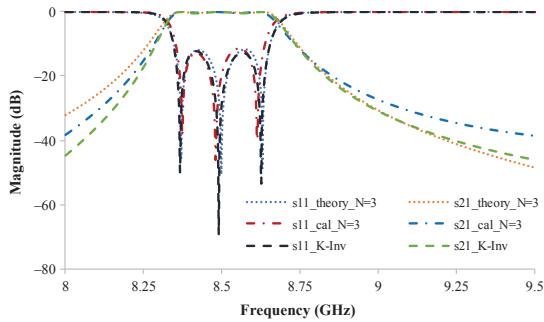


รูปที่ 16 วงจรกรองผ่านแถบความถี่ในท่อนำคลื่น

ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบโปรแกรมจำลองที่พัฒนาขึ้นโดยจำลองการทำงานของวงจรกรองความถี่ ที่มีค่าอันดับเท่ากับ 3 ถึง 5 โดยใช้ค่าพารามิเตอร์จากตารางที่ 1 ซึ่งผลการจำลอง แสดงดังรูปที่ 15 ที่พบว่าผลตอบสนองในแต่ละอันดับ จะมีค่าการลดทอนและค่าการสูญเสียย้อนกลับที่สัมพันธ์กับจำนวนอันดับของวงจรที่ออกแบบ โดยจะมีความชันมากเมื่ออันดับของวงจรมีค่าสูง ซึ่งเห็นว่ามีคุณสมบัติคล้ายกันกับผลทางทฤษฎี

หลังจากนั้นนำโครงสร้างของวงจรกรองผ่านแถบความถี่ที่มีอันดับเท่ากับ 3 ไปออกแบบวงจรแสดงดังรูปที่ 16 และผลการเปรียบเทียบการทำงานของโปรแกรมจำลอง การคำนวณทางทฤษฎี และการใช้อุปกรณ์กลุ่มก้อน แสดงดังรูปที่ 17

รูปที่ 17 แสดงผลการเปรียบเทียบการตอบสนองทางความถี่ของวงจรกรองผ่านแถบความถี่ที่ออกแบบระหว่างโปรแกรมจำลองที่ใช้วิธี K-inverter ทฤษฎีพื้นฐาน และวงจรที่สร้างจากอุปกรณ์แบบกลุ่มก้อน



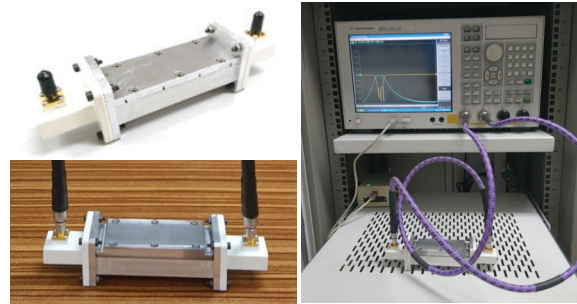
รูปที่ 17 การเปรียบเทียบผลตอบสนองของโปรแกรมจำลอง กับทฤษฎีพื้นฐาน

ซึ่งพบว่าแถบความถี่ที่ได้จากโปรแกรมจำลองจะมีค่ามากกว่าประมาณ 10 เมกะเฮิร์ตซ์ ที่เกิดจากผลกระทบของความหนาของวงจรช่องแคบที่มีความแตกต่างกันส่งผลทำให้มีค่าคลาดเคลื่อนเล็กน้อย แต่อย่างไรก็ตามผลของการเปรียบเทียบทั้ง 3 วิธี จะให้ผลการตอบสนองในย่านความถี่ใช้งานมีความสอดคล้องกันและมีค่าผิดพลาดไม่เกินกว่า  $\pm 4\%$

4. ผลของการวิจัย

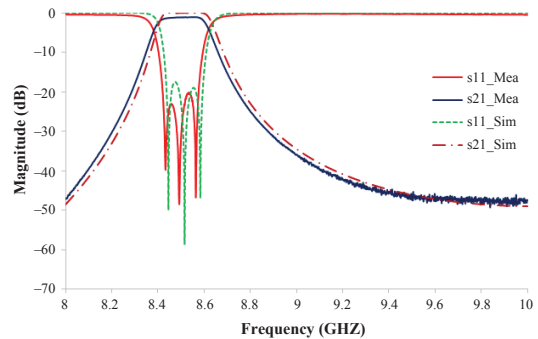
จากการออกแบบวงจรกรองผ่านแถบความถี่ในท่อนำคลื่นด้วยวิธี K-inverter สำหรับการศึกษาทางด้านวิศวกรรมไมโครเวฟ ได้นำค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรมจำลองที่สร้างขึ้น นำมาออกแบบและปรับปรุงประสิทธิภาพด้วยโปรแกรมจำลองสำเร็จรูปเชิงพาณิชย์ CST Microwave Studio® ที่ใช้วงจรอันดับเท่ากับ 3 เพื่อให้สามารถนำไปสร้างเป็นชิ้นงานจริง โดยค่าพารามิเตอร์ที่ปรับปรุงใหม่ แสดงดังตารางที่ 2

สำหรับการสร้างเป็นชิ้นงานจริงที่มีโครงสร้างเป็นแท่งอะลูมิเนียมสี่เหลี่ยมทำการตัดเฉือนโลหะและใช้การกัดเซาะร่องทางไฟฟ้าที่มีอิเล็กทรอนิกส์เป็นตัวนำไฟฟ้าด้วยเครื่อง EDM (Electrical Discharge Machining) ให้เป็นวงจรช่องแคบจำนวน 4 ตัว วางอยู่ในกล่องสี่เหลี่ยม ดังรูปที่ 18 (ก) แล้วจึงนำไปวัดและทดสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์ที่โครงข่ายทางไฟฟ้า ยี่ห้อ Agilent รุ่น E5071C ดังรูปที่ 18 (ข) และได้ผลการทดสอบการทำงานดังรูปที่ 19



(ก) ชิ้นงานจริง (ข) การวัดทดสอบ

รูปที่ 18 วงจรกรองแถบผ่านความถี่ในท่อนำคลื่น



รูปที่ 19 ผลการเปรียบเทียบผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรกรองผ่านแถบความถี่ที่ออกแบบ

ตารางที่ 2 ค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองความถี่ที่ได้จากการปรับปรุงประสิทธิภาพ

พารามิเตอร์	ขนาดโครงสร้าง (มิลลิเมตร)
ความกว้าง (a)	22.86
ความสูง (b)	10.16
ความหนา (t)	1.00
ความกว้าง (d1)	11.40
ความกว้าง (d2)	7.10
ความกว้าง (d3)	7.10
ความกว้าง (d4)	10.72
ความยาว (l1)	24.00
ความยาว (l2)	25.90
ความยาว (l3)	24.00

ผลการวัดทดสอบวงจรกรองความถี่ในท่อนำคลื่น ด้วย เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายทางไฟฟ้าที่หือ Agilent รุ่น E5071C เปรียบเทียบผลกับโปรแกรมจำลอง CST พบว่ามีผลการตอบสนองความถี่ที่ความถี่กลางเท่ากับ 8.49 จิกะเฮิร์ตซ์ และ 8.51 จิกะเฮิร์ตซ์ แบนด์วิดท์มีค่าเท่ากับ 250 เมกะเฮิร์ตซ์ และ 250 เมกะเฮิร์ตซ์ ตามลำดับ ภายในแถบความถี่ผ่านเกิดความสูญเสียเนื่องจากการใส่แทรกมีค่าเท่ากับ 0.07 เดซิเบล และ 1.1 เดซิเบล ตามลำดับ และมีการสูญเสียการย้อนกลับสูงสุดมีค่าประมาณ 48 เดซิเบล และ 58 เดซิเบล ตามลำดับ ประสิทธิภาพของวงจรให้ผลที่สอดคล้องกันกับผลการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม

## 5. สรุป

บทความวิจัยครั้งนี้ได้นำเสนอการสังเคราะห์วงจรกรองผ่านแถบความถี่ในท่อนำคลื่นด้วยวิธี K-inverter สำหรับการศึกษาด้านวิศวกรรมไมโครเวฟ ที่สังเคราะห์จากวงจรกรองผ่านความถี่ต้นแบบจากนั้นแปลงวงจรให้อยู่ในรูปแบบวิธี K-inverter โดยออกแบบและสร้างเป็นโปรแกรมจำลองที่สามารถคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ และจำลองการทำงานของวงจรกรองผ่านแถบความถี่ในท่อนำคลื่นได้ด้วยฟังก์ชัน GUI ของ MATLAB® พบว่าสามารถให้ผลลัพธ์ได้อย่างถูกต้องตามความต้องการของผู้ใช้งาน ที่ช่วยลดเวลาและความยุ่งยากในการคำนวณ ทั้งนี้ผลการเปรียบเทียบการทำงานของวัดจากชิ้นงานจริงและการจำลองมีค่าการสูญเสียเกิดขึ้นเล็กน้อยเนื่องจาก Waveguide Adaptor และโครงสร้างวงจรที่มีความละเอียดและมีขนาดค่อนข้างเล็ก อย่างไรก็ตาม ผลของงานวิจัยนี้สามารถประยุกต์ใช้สำหรับการเรียนการสอนทางด้านวิศวกรรมไมโครเวฟ เพื่อช่วยส่งเสริมให้ผู้เรียนสามารถเข้าใจถึงแนวทางในการคำนวณและการออกแบบวงจรกรองผ่านแถบความถี่ในท่อนำคลื่นได้อย่างมีประสิทธิภาพ

## เอกสารอ้างอิง

[1] T.-H. Lee, B. Lee, and J. Lee, "First-order reflectionless lumped-element lowpass filter

- (LPF) and bandpass filter (BPF) design," Presented at the 2016 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS), San Francisco, CA, 2016.
- [2] A. Adabi and M. Tayarani, "Substrate integration of dual inductive post waveguide filter," *Progress in Electromagnetics Research B*, vol. 7, pp. 321–329, 2008.
- [3] S. Zhang, L. Zhu, and R. Weerasekera, "Synthesis of inline mixed coupled quasi-elliptic bandpass filters based on  $\lambda/4$  Resonators," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 63, no. 10, pp. 3487–3493, 2015.
- [4] Wu, L. Zhu and X. Zhang, "Filtering patch antenna on  $\lambda/4$ -resonator filtering topology: Synthesis design and implementation," *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, vol. 11, no. 15, pp. 2241–2246, 12 10 2017.
- [5] Q. Zhang and Y.-L. Lu, "Dimensional synthesis for wide-band bandpass filters with quarter-wavelength resonators," *Progress in Electromagnetics Research B*, vol. 17, pp. 213–231, 2009.
- [6] Q. Wang and J. Bornemann, "Synthesis and design of direct-coupled rectangular waveguide filters with arbitrary inverter sequence," presented at the 2014 16th International Symposium on Antenna Technology and Applied Electromagnetics (ANTEM), Victoria, BC, Canada, 2014.
- [7] S. Upadhyay, C. Panchal, P. K. Atrey, and R. Singh, "Development of narrowband microwave bandpass filter for Ku band," presented at the 2016 International Conference on Wireless Communications, Signal Processing and Networking (WISPNET), Chennai, India, 2016.



- [8] G. Matthaei, L. Young, and E. M. T. Jones, *Microwave Filters, Impedance-matching Networks and Coupling Structures*. New York: McGraw-Hill, 1964.
- [9] I. C. Hunter, *Theory and Design of Microwave Filters*. England: MPG Books Ltd., 2001.
- [10] N. Marcuvitz, *Waveguide Handbook*. London: Short Run Press Ltd., 1986.