



## การพัฒนาโปรแกรมจำลองผลตอบสนองทางความถี่สำหรับการออกแบบวงจรกรองความถี่ Development of Frequency Response Simulation Program for Filter Circuit Design

ณัฐพงษ์ อินทวิเศษ<sup>1</sup> ศักดิ์ชัย ตันติวิวัฒน์<sup>2\*</sup> อภิรัฐ จันทร์ทอง<sup>3</sup> และ เจษฎา ก้อนแพง<sup>4</sup>

<sup>1</sup> สาขาวิศวกรรมอุตสาหการและเทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา  
128 ถนนห้วยแก้ว อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ 50300

<sup>2</sup> สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย  
1 ถนนราชดำเนินนอก อำเภอเมืองสงขลา จังหวัดสงขลา 90000

<sup>3</sup> สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและการจัดการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย  
99 ตำบลท้องเนียน อำเภอขนอม จังหวัดนครศรีธรรมราช 80210

<sup>4</sup> สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ  
2 ถนนนางลิ้นจี่ แขวงทุ่งมหาเมฆ เขตสาทร กรุงเทพมหานคร 10120

Nattapong Intarawiset<sup>1</sup>, Sugchai Tantivivat<sup>2\*</sup>, Apirun Chanthong<sup>3</sup> and Jessada Konpang<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Department of Industrial Education and Technology, Faculty of Engineering, Rajamangala University of  
Technology Lanna

128 Huay Kaew Road, Muang District, Chiang Mai, Thailand, 50300

<sup>2</sup> Department of Mechanical Engineering Faculty of Industrial Education and Technology, Rajamangala  
University of Technology Srivijaya

1 Ratchadamnoennok Road, Muang District, Songkhla, Thailand, 90000

<sup>3</sup> Department of Electrical Engineering College of Industrial Technology and Management, Rajamangala  
University of Technology Srivijaya

99 Tongnien, Khanom District, Nokhon Si Thammarat, Thailand, 80210

<sup>4</sup> Department of Electrical and Telecommunication Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala  
University of Technology Krungthep

2 Nanglingee Road, Thungmahamek, Sathorn, Bangkok, Thailand, 10120

\* ผู้รับผิดชอบบทความ: sugchai.t@mutsv.ac.th เบอร์โทรศัพท์ 08-8782-6442

Received: 13 November 2022, Revised: 28 April 2023, Accepted: 28 April 2023

### บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการออกแบบโปรแกรมจำลองด้วยการใช้ MATLAB GUI สำหรับการคำนวณค่าองค์ประกอบของวงจรและแสดงผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรกรองความถี่สำหรับระบบการสื่อสารไร้สาย การจำลองสามารถใช้ทฤษฎีการคำนวณแบ่งออกเป็น 3 รูปแบบ ประกอบด้วย การคำนวณด้วยวงจรแบบ T วงจรแบบ Pi และ วงจร K-Inverter ซึ่งผู้ใช้งานสามารถเลือกรูปแบบการคำนวณผลตอบสนองทางความถี่ รูปแบบวงจรกรองความถี่ รูปแบบผลตอบสนอง รวมถึงสามารถกำหนดค่าการกระเพื่อม และ ลำดับของผลตอบสนองได้ ผลจากการใช้งานโปรแกรมจำลองสามารถช่วยให้ลดเวลาในการคำนวณค่าองค์ประกอบ



ต่าง ๆ ของวงจร เนื่องจากการคำนวณค่าอุปกรณ์และค่าตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบวงจรมีการใช้สมการที่ค่อนข้างซับซ้อน สามารถแสดงผลการเปรียบเทียบกราฟผลตอบสนองทางความถี่เพื่อให้ผู้ใช้งานสามารถวิเคราะห์และออกแบบผลตอบสนองทางความถี่ตามความต้องการได้ โดยผลการทดลองโปรแกรมจำลอง มีการเปรียบเทียบผลการจำลองทั้ง 3 รูปแบบ มีผลลัพธ์ที่สอดคล้องกันและมีความถูกต้องตามหลักทฤษฎี สำหรับย่านความถี่ระบบสื่อสารไร้สาย นอกจากนี้การใช้งานโปรแกรมจำลองไม่เพียงแต่สามารถประยุกต์ใช้กับการเรียนการสอนเพื่อให้ผู้เรียนเข้าใจพื้นฐานด้านผลตอบสนองทางความถี่แล้ว ผู้ใช้งานสามารถใช้ผลลัพธ์ในการหาค่าองค์ประกอบของวงจรองความถี่เพื่อประยุกต์ใช้สำหรับการออกแบบวงจรขั้นสูงต่อไปได้ตามลำดับ

**คำสำคัญ** โปรแกรมจำลอง วงจรองความถี่ การสื่อสารไร้สาย

**Abstract**

This paper presents a simulation program that utilizes the MATLAB GUI interface to calculate part values and display frequency responses for wireless communication systems filters. The simulation supports computational theory with three circuit models: T-model, Pi-model, and K-inverter. Users have the flexibility to choose their desired filter response type, schematic, filter type, passband ripple configuration, and response order. The simulation's complex equations enable accurate element value calculation and circuit design. Additionally, users can compare frequency response graphs to facilitate on-demand analysis and design. The simulation results are in agreement with filter theory, making it an effective tool for teaching and learning the fundamentals of frequency response in wireless communication. Furthermore, the filter element values derived from the simulation can be employed in advanced circuit design.

**Keywords:** Simulation program, Filters, Wireless communications

**1. บทนำ**

ปัจจุบันเทคโนโลยีของการสื่อสารไร้สายได้มีการนำไปประยุกต์ใช้ในด้านธุรกิจอุตสาหกรรมในหลายภาคส่วน เช่น ระบบหุ่นยนต์ในงานอุตสาหกรรม อุปกรณ์เซ็นเซอร์ในระบบอุตสาหกรรมการเกษตร เทคโนโลยียานยนต์ไร้คนขับ รวมถึงอุปกรณ์ IoT สำหรับระบบควบคุม ทำให้การใช้งานมีประสิทธิภาพมากขึ้น ทั้งทางด้านธุรกิจสื่อและบันเทิง อุตสาหกรรมการผลิต บริการทางสาธารณสุข และการขนส่ง เป็นต้น ซึ่งการวิเคราะห์และออกแบบวงจรและผลตอบสนองที่เกี่ยวข้องกับการสร้างวงจรความถี่สูง (High Frequency) เพื่อให้รองรับกับระบบสื่อสาร ในภาคส่วนที่สำคัญของวงจรรวม (Integrated Circuits) ที่จะต้องพิจารณาถึงผลตอบสนองทางความถี่ เช่น สายอากาศ (Antenna) [1-3] วงจรแบ่งกำลัง (Power Divider) [4-5] วงจรองความถี่ (Filters) [6], [7] และวงจรที่แยกความถี่ตามช่องสัญญาณ (Multiplexer) ล้วนเป็นวงจรไฟฟ้าความถี่สูงที่สำคัญทั้งสิ้น ที่กล่าวมาข้างต้น

วงจรรองความถี่ (Filters) จะเป็นวงจรที่นักวิจัย ให้ความสนใจเป็นอย่างยิ่ง เนื่องจากเป็นวงจรที่สามารถแยกสัญญาณที่ไม่ต้องการออกจากระบบได้ ตลอดจนสามารถประยุกต์ในการออกแบบได้หลากหลายและได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้วงจรมีคุณสมบัติที่โดดเด่นขึ้น เช่น ขนาดของโครงสร้างที่มีขนาดกะทัดรัด (Compact Size) การตอบสนองได้หลายๆ แถบความถี่ (Multiband Application) วงจรที่ควบคุมความถี่และแบนด์วิดท์ได้ง่าย (High Selectivity and Flexible Control) หรือวงจรที่มีผลตอบสนองที่มีแถบหยุด แถบความถี่กว้าง (Wide- Stopband) ดังนั้นเพื่อให้รองรับกับเทคโนโลยีหรือนวัตกรรมใหม่ ที่เกี่ยวข้องกับระบบการสื่อสารไร้สาย 5G โดยสำหรับการเรียนการสอนที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบวงจรองความถี่ เป็นหัวข้อหรือประเด็นที่สำคัญเนื่องด้วยวงจรมีความสำคัญและสามารถตัดแยกและกรองย่านความถี่ที่ไม่ต้องการออกจากระบบในการสื่อสารไร้สาย [8]



การจัดการเรียนการสอนในปัจจุบันของนักศึกษาระดับปริญญาตรีในสาขาทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้า-โทรคมนาคมได้มีการจัดการเรียนการสอนด้วยรายวิชาพื้นฐานต่าง ๆ สำหรับประยุกต์ใช้งานเทคโนโลยีสื่อสารไร้สาย เช่น คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า การวิเคราะห์วงจรไฟฟ้า วิศวกรรมสายส่ง และวิศวกรรมสายอากาศ เป็นต้น [9], [10] จากรายวิชาที่ยกตัวอย่างมาข้างต้น พบว่า เนื้อหาที่มีความซับซ้อนเนื่องจากมีการคำนวณค่อนข้างเยอะ ไม่สามารถทำให้ผู้เรียนเข้าใจเนื้อหาภายในเวลาจำกัด เป็นการจัดการเรียนผู้สอนมุ่งเน้นการสอนตามตำรา การวัดผลสัมฤทธิ์ด้วยวิธีการทดสอบโดยที่ผู้เรียนเป็นเพียงแค่ผู้รับเพียงอย่างเดียว [11] จะเห็นว่าสื่อที่สามารถทำให้ผู้เรียนคิดวิเคราะห์ถึงความสัมพันธ์ของการคำนวณหาค่าอุปกรณ์ การหาผลตอบสนองทางความถี่ [12] ตลอดจนการออกแบบและสร้างวงจรที่สามารถรองรับกับย่านความถี่ในเทคโนโลยีสื่อสารไร้สายเป็นสิ่งสำคัญ

ดังนั้นงานวิจัยนี้ จึงมีแนวคิดสำหรับการสร้างสื่อโปรแกรมจำลองเพื่อเสริมทักษะการเรียนรู้ในการออกแบบวงจรความถี่ สำหรับการประยุกต์ใช้งานระบบสื่อสารไร้สาย ตลอดจนการสร้างสื่อโปรแกรมที่สามารถเรียนรู้ได้ด้วยตนเอง โดยถูกพัฒนามาจากงานวิจัยของ [13] ที่นำทฤษฎี K-Inverter มาประยุกต์ในการสร้างเป็นโปรแกรมจำลองวงจรกรองผ่านแถบความถี่ เพื่อให้ครอบคลุมกับการเรียนการสอนทางด้าน การออกแบบวงจรความถี่สูง ประกอบด้วย การสร้างโปรแกรมจำลองจากสมการเงื่อนไขของวงจรกรองความถี่ต่ำ วงจรกรองผ่านแถบความถี่เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ผลตอบสนองทางความถี่ของวงจร การเปรียบเทียบผลตอบสนองทางความถี่ซึ่งสามารถทำให้ผู้ใช้งานสามารถวิเคราะห์สมการที่ค่อนข้างซับซ้อนได้ง่ายขึ้น ประยุกต์ใช้เป็นสื่อการเรียนการสอน โดยสามารถเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมจำลองที่สอดคล้องกับทฤษฎีและสามารถนำมาใช้ในการประยุกต์ใช้งานระบบสื่อสารไร้สายในยุคปัจจุบันได้อย่างมีประสิทธิภาพ

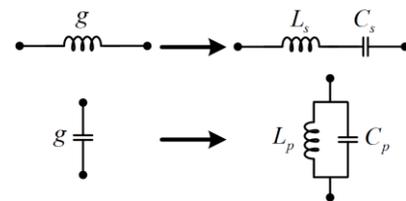
## 2. ทฤษฎีและวิธีการดำเนินการวิจัย

การออกแบบวงจรกรองความถี่มีทฤษฎีที่เกี่ยวข้องสำหรับการออกแบบหลายวิธี โดยส่วนใหญ่การออกแบบเป็นการใช้ทฤษฎีด้วยการประมาณค่าของ Butterworth และ

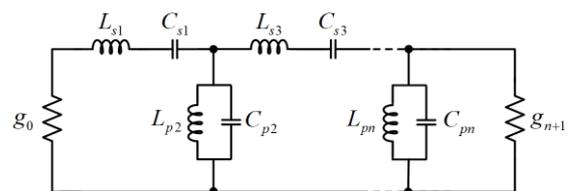
Chebyshev เพื่อออกแบบวงจรกรองความถี่ด้วยอุปกรณ์ Lump-Element ได้ตามหลักการดังต่อไปนี้

### 2.1 หลักการพื้นฐานของการออกแบบวงจรกรองความถี่

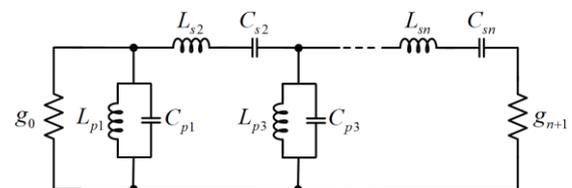
การพิจารณาหลักการของการออกแบบวงจรกรองความถี่ที่มีการนำมาประยุกต์ใช้งานในปัจจุบัน สามารถแบ่งออกเป็น 4 ชนิด ได้แก่ วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน วงจรกรองความถี่สูงผ่าน วงจรกรองผ่านแถบความถี่ และวงจรกรองหยุดแถบความถี่ โดยปกติแล้วมีการใช้โครงสร้างวงจรไฟฟ้าสำหรับการออกแบบ 2 รูปแบบ ได้แก่ Pi-Model และ T-Model โดยอาศัยการสร้างวงจรกรองความถี่ต่ำต้นแบบเป็นวงจรตั้งต้น จากนั้นจึงสามารถแปลงวงจรกรองความถี่ตามที่ใช้ใช้งานต้องการและสามารถคำนวณหาค่าองค์ประกอบต่าง ๆ ได้ [14] ดังเช่นตัวอย่างของการออกแบบวงจรกรองผ่านแถบความถี่โดยใช้ 2 โครงสร้างในการออกแบบดังแสดงรูปที่ 1



(ก) วงจรต้นแบบของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแปลงเป็นวงจรกรองผ่านแถบความถี่



(ข) วงจรกรองผ่านแถบความถี่ แบบ Pi-Model



(ค) วงจรกรองผ่านแถบความถี่ แบบ T-Model

รูปที่ 1 การแปลงวงจรสมมูลของวงจรกรองผ่านแถบความถี่

การหาพารามิเตอร์การส่งผ่านของการออกแบบวงจรกรองผ่านแถบความถี่ (Transmission Parameters) สามารถ

หาค่าอุปกรณ์ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุได้ผลตอบสนองความถี่จากการแปลงเป็นวงจรกรองผ่านแถบความถี่สามารถเขียนเป็นพารามิเตอร์การส่งผ่านด้วยวงจรแบบ Pi-Model และ T- Model ที่มีองค์ประกอบ Reactance ( $X_s$ ) และ Susceptance ( $B_p$ ) ได้ดังสมการที่ (1) และสมการที่ (2) ตามลำดับ

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

$$[T_{Pi-Model}] = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ jB_p & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & jX_s \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ jB_p & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

2.2. การวิเคราะห์ท่วงจรกรองความถี่ด้วยวิธี K-Inverter

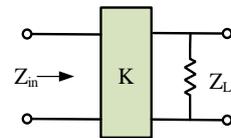
การแปลงวงจรโดยใช้อิมพีแดนซ์อินเวอร์เตอร์ (Immittance Inverters) ที่สามารถเปลี่ยนค่าอิมพีแดนซ์  $K$  พารามิเตอร์ หรือค่าแอดมิตแตนซ์  $J$  พารามิเตอร์ ซึ่งคุณลักษณะเหล่านี้เป็นการเปลี่ยนท่วงจรกรองความถี่ให้อยู่ในรูปของวงจรเทียบเคียงที่สามารถนำไปดำเนินการสร้างวงจรไมโครเวฟบนโครงสร้างวงจรไมโครสตริปและท่อนำคลื่นได้อย่างไรก็ตามเนื่องจากการหาค่าของอุปกรณ์พาสซีฟที่มีการเชื่อมต่อแบบขนานและแบบอนุกรมที่ใช้ในการจูนความถี่นั้นทำได้ค่อนข้างยาก ดังนั้นการวิเคราะห์ส่วนใหญ่จึงนิยมอาศัยวงจรต้นแบบในรูปแบบของวงจรอิมพีแดนซ์อินเวอร์เตอร์ (Impedance Inverters) [13] โดยในทางอุดมคติการทำงานของอิมพีแดนซ์อินเวอร์เตอร์ ( $K$  พารามิเตอร์) คล้ายกับการใช้งานสายส่งที่มีความยาว  $\lambda/4$  เพื่อนำไปใช้ในแต่ละย่านความถี่ ดังนั้นในการหาความสัมพันธ์ของอินพุตอิมพีแดนซ์เมื่อมีการต่อโหลด ( $Z_L$ ) เข้าที่ปลายสายส่ง ( $Z_{in}$ ) แสดงดังรูปที่ 2(ก) สามารถคำนวณหาโดยใช้ ABCD พารามิเตอร์ได้จากสมการที่ (3) และเมื่อเขียนให้อยู่ในรูปแบบสมการการส่งผ่าน ( $T_K$ ) ได้ดังสมการที่ (4) ตามลำดับ

$$Z_{in} = \frac{AZ_L + B}{CZ_L + D} = \frac{jK}{jZ_L / K} = \frac{K^2}{Z_L} \quad (3)$$

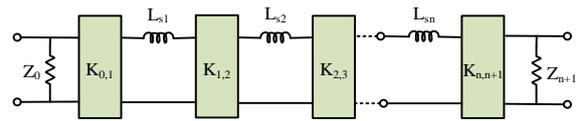
$$T_K = \begin{bmatrix} 0 & jK \\ j/K & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

การออกแบบท่วงจรกรองความถี่ต่ำด้วยวิธีของ K-Inverter สามารถทำได้โดยอาศัยพื้นฐานหลักการแปลงองค์ประกอบ

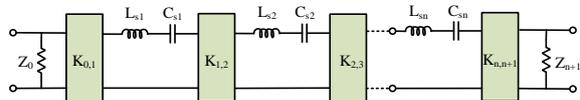
ความถี่ด้วยอุปกรณ์แบบกลุ่มก้อน (Lump Element) ที่มีส่วนประกอบการต่อตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุแบบขั้นบันไดซึ่งจะใช้การต่อแบบอนุกรมและขนาน ดังนั้นเมื่อใช้วิธีการแปลงของวิธี K-Inverter เราจะสามารถแปลงวงจรให้อยู่ในรูปแบบของวงจรอนุกรมเพียงอย่างเดียวได้และสามารถแสดงวงจรเทียบเคียงได้ดังรูปที่ 2(ข) การออกแบบท่วงจรกรองผ่านแถบความถี่ด้วยวิธีของ K-Inverter สามารถทำได้โดยใช้หลักการแปลงองค์ประกอบความถี่จากการแปลงอุปกรณ์ให้อยู่ในรูปของวงจรเรโซแนนซ์ด้วยที่ใช้ตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำ จากนั้นใช้สมการของ K-Inverter เพื่อปรับเปลี่ยนรูปแบบลักษณะของวงจรให้อยู่ในรูปแบบท่วงจรแบบอนุกรมโดยสามารถวงจรเทียบเคียงได้ดังรูปที่ 2(ค) สามารถเขียนเป็นพารามิเตอร์การส่งผ่านทั้ง 2 โครงสร้างได้ดังสมการที่ (5) และสมการที่ (6) โดยที่ค่าองค์ประกอบที่เกี่ยวข้องประกอบด้วยค่าของตัวเหนี่ยวนำ ตัวเก็บประจุ และการหาค่าพารามิเตอร์ของ K-Inverter ของท่วงจรกรองผ่านแถบความถี่สามารถหาได้จากสมการที่ (5) และ (6)



(ก) การเชื่อมต่ออิมพีแดนซ์ที่มีโหลด



(ข) วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านโดยใช้วิธี K-Inverter



(ค) วงจรกรองผ่านแถบความถี่โดยใช้วิธี K-Inverter

รูปที่ 2 วงจรสมมูลของวงจรกรองความถี่โดยใช้ K-Inverter

$$[T_{LPF}] = \begin{bmatrix} /K_{01} & jL \\ jK_{01} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & j\omega L_{s2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} j/K_{12} & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & j\omega L_{s3} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \dots \begin{bmatrix} j/K_{n-1,n} & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & j\omega L_{s,n+1} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} j/K_{n,n+1} & 0 \\ jK_{n,n+1} & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$



$$[T_{BPF}] = \begin{bmatrix} 0 & j/K_{01} \\ jK_{01} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & j\omega L_{s1} + 1/j\omega C_{s1} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & j/K_{12} \\ jK_{12} & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & j\omega L_{s2} + 1/j\omega C_{s2} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & j/K_{23} \\ jK_{23} & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & j\omega L_{s3} + 1/j\omega C_{s3} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & j/K_{34} \\ jK_{34} & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

การหาค่าของตัวเหนี่ยวนำ  $L_{si}$  และตัวเก็บประจุ  $C_{si}$  โดยใช้วิธีการแปลงจากวงจรกรองความถี่ต่ำต้นแบบเป็นวงจรกรองผ่านแถบความถี่ สามารถเขียนสมการ (7) และ (8)

$$L_{si} = \left( \frac{\Omega_c}{FBW \omega_0} \right) \left( L_i \times Z_0 / Z_{n+1} \right) \Big|_{i=1 \text{ to } n} \quad (7)$$

$$C_{si} = \left( \frac{FBW}{\omega_0 \Omega_c} \right) \frac{1}{C_i (Z_0 / Z_{n+1})} \Big|_{i=1 \text{ to } n} \quad (8)$$

การหาค่าพารามิเตอร์ของ K-Inverter ในแต่ละส่วนของวงจรกรองผ่านแถบความถี่โดยใช้องค์ประกอบวงจรกรองความถี่ต่ำ ( $g_i$ ) สามารถหาได้จากสมการ (9) (10) และ (11)

$$K_{0,1} = \sqrt{\frac{Z_0 FBW \omega_0 L_{s1}}{g_0 g_1}} \quad (9)$$

$$K_{i,i+1} = \frac{FBW \omega_0}{\Omega_c} \sqrt{\frac{L_{si} L_{s(i+1)}}{g_i g_{i+1}}} \Big|_{i=1 \text{ to } n-1} \quad (10)$$

$$K_{n,n+1} = \sqrt{\frac{FBW \omega_0 L_{sn} Z_{n+1}}{\Omega_c g_n g_{n+1}}} \quad (11)$$

จากสมการข้างต้นจะเห็นว่า เป็นสมการที่ค่อนข้างซับซ้อน และในกรณีที่จะต้องมีการคำนวณ ส่งผลให้เกิดความล่าช้าในการวิเคราะห์เพื่อหาค่าตอบของตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบวงจรกรองผ่านแถบความถี่ ดังนั้นในส่วนถัดไปเป็นการประยุกต์ใช้สมการต่าง ๆ เพื่อแปลงรูปสมการให้อยู่ส่วนของ GUI ทำให้ผู้เรียนหรือผู้ใช้งานในการออกแบบวงจรสามารถวิเคราะห์ค่าของอุปกรณ์ได้ง่ายและสะดวกยิ่งขึ้น

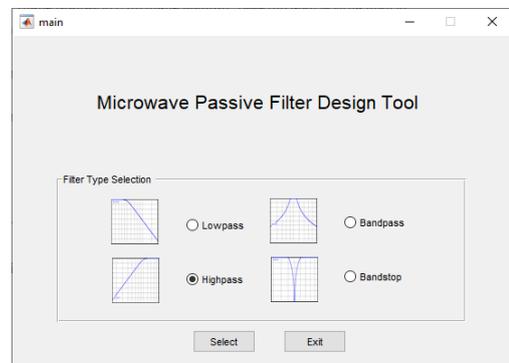
### 2.3 การออกแบบโปรแกรมจำลองวงจรกรองความถี่

การออกแบบโปรแกรมจำลองวงจรกรองความถี่ในงานวิจัยนี้ได้นำทฤษฎีของการออกแบบวงจรกรองความถี่พื้นฐานจากอุปกรณ์กลุ่มก้อน (Lumped Element) เทคนิคการแปลงวงจรด้วยวิธีเคอเนเตอร์ (K-Inverter) และวิธีการประมาณค่าแบบ Butterworth และ Chebyshev ที่สามารถกำหนดค่า Ripple รวมถึงการวิเคราะห์จำนวนอันดับของวงจรที่ใช้ในการออกแบบวงจรกรองผ่านแถบความถี่

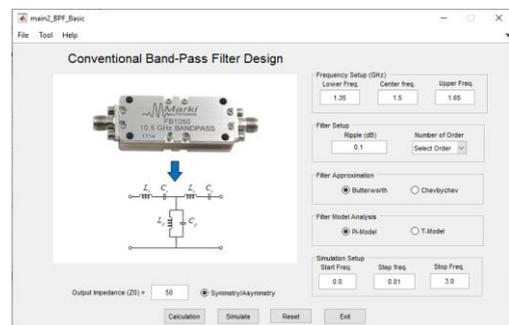
สำหรับการหาผลตอบสนองทางความถี่ได้โดยใช้การแปลงกลับของพารามิเตอร์การส่งผ่าน (ABCD) ให้เป็นพารามิเตอร์กระจาย (S-Parameters) เพื่อหาค่าการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ ( $S_{11}$ ) และค่าสูญเสียจากการใส่แทรก ( $S_{21}$ ) ดังสมการที่ (12) และสมการที่ (13) เมื่อ ( $Z_{01}$ ) คืออิมพีแดนซ์ขาเข้าและ ( $Z_{02}$ ) คืออิมพีแดนซ์ขาออก สามารถสร้างเป็นโปรแกรมจำลองโดยใช้ฟังก์ชัน GUI ของ MATLAB Version 2022a [15] โดยหน้าต่างโปรแกรมหลักและหน้าต่างโปรแกรมย่อยสำหรับการใส่ค่าตัวแปรที่เกี่ยวข้องสำหรับการออกแบบวงจรแสดงดังรูปที่ 3 และมีผังการทำงานดังแสดงในรูปที่ 4 ซึ่งผู้ใช้งานสามารถเลือกชนิดของวงจรกรองความถี่ กำหนดความถี่เริ่มต้น ความถี่สิ้นสุด ความละเอียดของการจำลอง รวมถึงสามารถกำหนดค่าการกระเพื่อม และลำดับของผลตอบสนองค่า Output Impedance ได้ ตามลำดับ

$$S_{11} = \frac{(A \times Z_{02} + B - C \times Z_{01} \times Z_{02} - D \times Z_{01})}{(A \times Z_{02} + B + C \times Z_{01} \times Z_{02} + D \times Z_{01})} \quad (12)$$

$$S_{21} = \frac{(2 \times (A \times D) - (B \times C) \times \sqrt{Z_{01} \times Z_{02}})}{(A \times Z_{02} + B + C \times Z_{01} \times Z_{02} + D \times Z_{01})} \quad (13)$$



(ก) หน้าต่างโปรแกรมหลัก

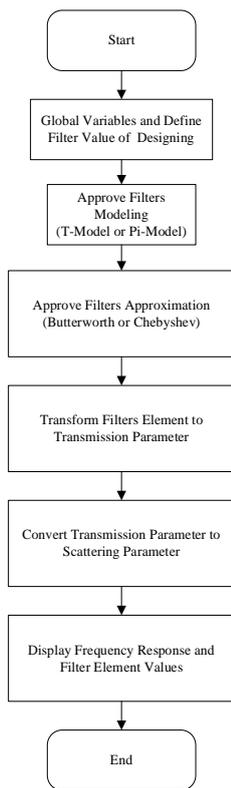


(ข) หน้าต่างโปรแกรมย่อย

รูปที่ 3 หน้าต่างโปรแกรมการออกแบบวงจรกรองความถี่



การทดสอบการทำงานของโปรแกรมที่ได้พัฒนาขึ้นสามารถนำมาออกแบบวงจรกรองผ่านแถบความถี่โดยใช้วิธีการแบบดั้งเดิมและวิธีของ K-Inverter ตามลำดับ ในส่วนแรกจะเป็นการทดสอบสำหรับการออกแบบวงจรกรองความถี่ต่ำที่กำหนดความถี่ตัดเท่ากับ 1.5 GHz โดยใช้การประมาณค่าแบบ Chebyshev จำนวนอันดับเท่ากับ 3 ค่า Ripple เท่ากับ 0.1 ส่วนที่สองเป็นการออกแบบวงจรกรองผ่านแถบความถี่ที่กำหนดเงื่อนไขการใช้งานที่ความถี่กลางเท่ากับ 1.5 GHz ความกว้างของแถบความถี่เท่ากับ 300 MHz จำนวนอันดับเท่ากับ 3 ค่า Ripple เท่ากับ 0.1 จากนั้นกำหนดความถี่ที่ใช้ในการจำลองการทำงานตั้งแต่ 0-3 GHz ผลการจำลองการทำงานในการหาผลตอบสนองทางความถี่แสดงดังรูปที่ 5(ก) และ 5(ข) โดยผลของการคำนวณหาค่าอุปกรณ์ในการออกแบบแสดงดังรูปที่ 5(ค) และ 5(ง) ตามลำดับ



รูปที่ 4 ขั้นตอนการใช้งานโปรแกรมจำลองสำหรับการวิเคราะห์องค์ประกอบวงจรกรองผ่านแถบความถี่

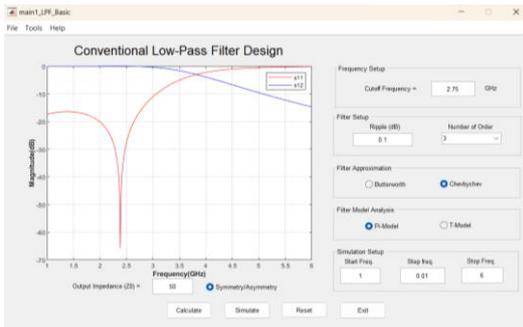
ขั้นตอนการกำหนดค่าในการใช้งานโปรแกรมออกแบบวงจรกรองความถี่โดยใช้โปรแกรมจำลองที่พัฒนาขึ้นสามารถแสดงดังรูปที่ 5 มีรายละเอียดดังนี้

- 1) กำหนดความถี่ตัดตามเงื่อนไขในการออกแบบวงจรกรองความถี่ ความถี่ตัด หรือช่วงแถบผ่านความถี่ (ย่านความถี่ GHz)
- 2) กำหนดค่าของวงจรกรองความถี่ได้แก่ จำนวนอันดับ (n=1 ถึง n=5) และค่า Ripple
- 3) เลือกชนิดของการประมาณค่าโดยเลือกเป็นแบบ Chebyshev หรือ Butterworth
- 4) กำหนดค่าในการจำลองการทำงานโดยกำหนดความถี่เริ่มต้น ความถี่สิ้นสุด และจำนวนจุดในการ sampling
- 5) กำหนดค่าเอ๊าต์พุตอิมพีแดนซ์
- 6) กำหนดค่าชนิดของวงจรเป็น Symmetry หรือ Asymmetry

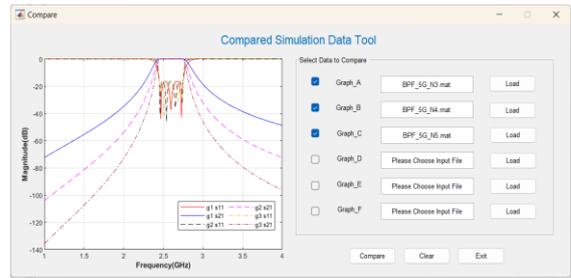
นอกจากนี้ผู้วิจัยได้พัฒนาฟังก์ชันของโปรแกรมเพิ่มเติมเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบกราฟผลตอบสนองทางความถี่ของการออกแบบวงจรกรองความถี่ ผู้ใช้งานสามารถเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของการออกแบบวงจรที่ใช้วิธีการประมาณค่า โดยผลตอบสนองแบบ Chebyshev หรือ Butterworth จำนวนอันดับ ค่าการกระเพื่อม ที่แตกต่างกัน ส่งผลให้ผู้ใช้งานเข้าใจผลตอบสนองของค่าตัวแปรพารามิเตอร์การส่งผ่าน และพารามิเตอร์ค่าการสูญเสียจากการย้อนกลับ แสดงดังรูปที่ 6 ทำให้เห็นถึงลักษณะของผลตอบสนองทางความถี่ที่แตกต่างกันและสามารถเข้าใจถึงผลตอบสนองทางความถี่ เพื่อนำองค์ความรู้ออกแบบวงจรได้ง่ายขึ้น

### 3. ผลการวิจัยและอภิปราย

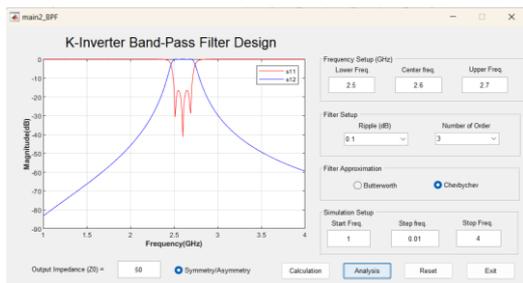
การพัฒนาโปรแกรมจำลองที่พัฒนาขึ้นสำหรับใช้ในการออกแบบวงจรกรองความถี่ในการประยุกต์ใช้งานกับระบบสื่อสารไร้สาย จุดเด่นของโปรแกรมจำลองที่พัฒนาขึ้นประกอบด้วยการวิเคราะห์วงจรที่ หลากหลายทั้งโครงสร้างแบบ Pi-Model วงจรแบบ T-Model และวิธีของ K-Inverter โปรแกรมเปรียบเทียบผลตอบสนองการออกแบบวงจรกรองความถี่ด้วยการเพิ่มกราฟเปรียบเทียบผลตอบสนองที่แตกต่างและสามารถบันทึกผลตอบสนองทางความถี่ที่ได้จากการจำลอง โดยทดสอบการออกแบบวงจรกรองความถี่ต่ำและวงจรกรองผ่านแถบความถี่ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้



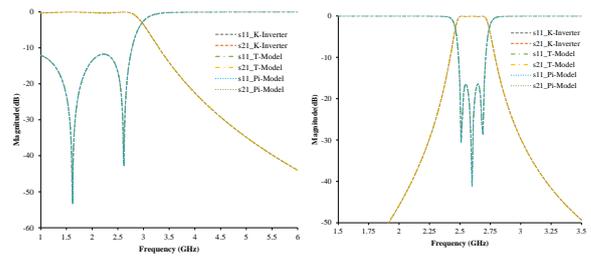
(ก) ผลตอบสนองของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน



รูปที่ 6 ฟังก์ชันการเปรียบเทียบผลตอบสนองทางความถี่ที่ได้จากการจำลองผลตอบสนองของวงจร

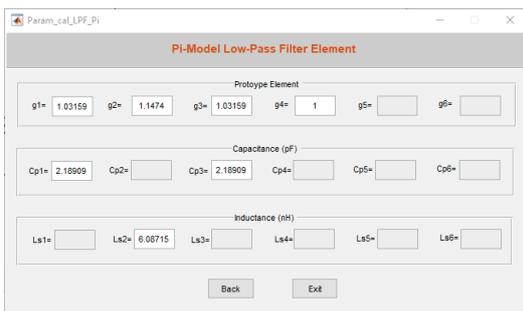


(ข) ผลตอบสนองของวงจรกรองผ่านแถบความถี่



(ก) Lowpass Filter

(ข) Bandpass Filter



(ค) ค่าอุปกรณ์ของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน



(ง) ค่าอุปกรณ์ของวงจรกรองผ่านแถบความถี่

รูปที่ 5 ผลตอบสนองทางความถี่และผลการคำนวณหาค่าอุปกรณ์ที่ได้จากโปรแกรมจำลอง

รูปที่ 7 ผลการเปรียบเทียบการตอบสนองทางความถี่ของวงจรจากโปรแกรมจำลองที่พัฒนาขึ้น

#### 4. บทสรุป

บทความวิจัยครั้งนี้ได้นำเสนอการพัฒนาสื่อโปรแกรมจำลองเพื่อเสริมทักษะการเรียนรู้พื้นฐานในการออกแบบวงจรกรองความถี่สำหรับการประยุกต์ใช้งานระบบสื่อสารไร้สายที่สังเคราะห์จากวงจรกรองความถี่ต้นแบบที่มีโครงสร้าง Pi-Model และ T-Model รวมถึงเทคนิควิธีแปลงวงจรให้อยู่ในรูปแบบโครงสร้างของ K-Inverter โดยออกแบบโปรแกรมจำลองนั้น สามารถคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ และจำลองการทำงานของวงจรกรองความถี่ได้ด้วยฟังก์ชัน GUI ของ MATLAB® พบว่าสามารถให้ผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองผลตอบสนองทางความถี่ และค่าองค์ประกอบของอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องได้อย่างถูกต้อง ช่วยลดเวลา และความยุ่งยากในการคำนวณ เป็นไปตามความต้องการของผู้ใช้งาน อย่างไรก็ตาม ผลของงานวิจัยนี้ใช้สำหรับใช้เป็นสื่อในการประกอบการเรียนการสอนทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้า-โทรคมนาคม ช่วยส่งเสริมให้ผู้เรียนสามารถเข้าใจถึงแนวทางในการคำนวณและการออกแบบวงจรกรองความถี่ สำหรับประยุกต์ที่รองรับกับการใช้งานระบบสื่อสารไร้สายได้อย่างมีประสิทธิภาพต่อไป



## 5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณงบประมาณจากแหล่งทุนวิจัย งบประมาณ  
ด้าน ววน. Full Proposal ประจำปีงบประมาณ พ.ศ.2564  
รหัสโครงการ 50072 รหัสข้อเสนอการวิจัย 64A171000001

## 6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Zhang W, Weng Z, Wang L. Design of a dual-band MIMO antenna for 5G smartphone application. In 2018 International Workshop on Antenna Technology (IWAT) 2018 Mar 5. pp. 1-3.
- [2] Fernandez-Martinez P, Martin-Anton S, Segovia-Vargas D. Design of a wideband Vivaldi antenna for 5G base stations. In 2019 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting 2019 Jul 7. pp. 149-150.
- [3] Parchin NO, Abd-Alhameed RA, Shen M. Design of low cost FR4 wide-band antenna arrays for future 5G mobile communications. In 2019 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP) 2019 Oct 27. pp. 1-3.
- [4] Adya S, Jain A, Sharma D, Gupta A, Bhalla V. Design and fabrication of microstrip equal Wilkinson RF power divider at 650MHz using MWO. In 2017 IEEE Applied Electromagnetics Conference (AEMC) 2017 Dec 19. pp. 1-2.
- [5] Lu J, Shi J, Xu K, Cao Q. A microstrip differential power divider. In 2016 IEEE International Workshop on Electromagnetics: Applications and Student Innovation Competition (IWEM) 2016 May 16. pp. 1-3.
- [6] Haddi SB, Zugari A, Zakriti A, Achraou S. A compact microstrip T-shaped resonator band pass filter for 5G applications. In 2020 International Conference on Intelligent Systems and Computer Vision (ISCV) 2020 Jun 9. pp. 1-5.
- [7] Al-Yasir YI, Parchin NO, Alabdallah A, Abdulkhaleq AM, Abd-Alhameed RA, Noras JM. Design of bandpass tunable filter for green flexible RF for 5G. In 2019 IEEE 2nd 5G World Forum (5GWF) 2019 Sep 30. pp. 194-198.
- [8] Cameron RJ, Kudsia CM, Mansour RR. Microwave filters for communication systems: fundamentals, design, and applications. John Wiley & Sons; 2018 Apr 17.
- [9] Liu Y, Cheng Q S. Microwave engineering course for engineering education accreditation: exploration and practice in SUSTech. In 2019 IEEE International Conference on Engineering, Technology and Education (TALE); 2019 Dec 10-13; Yogyakarta, Indonesia. 2019. p. 1-4.
- [10] Yang Z, Lili S. Application of electromagnetic simulation in the course of “Microwave technology and antenna”. In 2020 International Conference on Computers, Information Processing and Advanced Education (CIPAE); 2020 Oct 16-18; Ottawa, ON, Canada. 2020. p. 161-163.
- [11] Wang SC, Li MJ, Tong MS. Incorporation of Modeling and Simulation Techniques with the Education on Electromagnetics and Microwave Technology. In 2019 Photonics & Electromagnetics Research Symposium-Fall (PIERS-Fall) 2019 Dec 17. pp. 1058-1062.
- [12] Klinbumrung K, Tansriwong S, Akatimagool S. The development of instructional package on high-frequency transmission line engineering using REPEA learning model. In 2015 The 3rd International Conference on Technical Education 2015 (pp. 19-22).



[13] Intarawiset N, Akatimagool S, Narongkul S. Analysis of microwave filter based on LC chips in microstrip circuitry using K-inverter approach. In 2019 6th International Conference on Technical Education (ICTechEd6) 2019 Mar 19. pp. 1-4.

[14] Hong JS, Lancaster MJ. Microstrip filters for RF/microwave applications. John Wiley & Sons; 2004 Apr 7.

[15] MATLAB version: 9.12 (R2022a), Natick, Massachusetts: The MathWorks Inc.; 2022.