

การพัฒนาชุดการสอนเรื่องการออกแบบวงจรกรองความถี่ The Development of Instruction Package for Filter Circuit Design

ดิเรก มณีวรรณ¹, พินิจ เนื่องภิรมย์¹, สมศักดิ์ อรรถทิมากุล²

¹สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

²ภาควิชาครุศาสตร์ไฟฟ้า คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

elecdrm@rmutl.ac.th, elecptn@rmutl.ac.th, ssa@kmutnb.ac.th

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาชุดการสอนเรื่องการออกแบบวงจรกรองความถี่ เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัยได้แก่ โปรแกรมจำลอง และชุดสาธิต เครื่องมือที่ใช้ในการหาประสิทธิภาพ ได้แก่ แบบประเมินความเหมาะสมของชุดการสอนสำหรับผู้เชี่ยวชาญ และแบบสอบถามความพึงพอใจสำหรับนักศึกษา กลุ่มตัวอย่างได้แก่นักศึกษาที่ลงทะเบียนวิชาสัญญาณและระบบ ในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตร์อิเล็กทรอนิกส์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา จำนวน 32 คน ผลการวิจัยพบว่าชุดการสอนที่พัฒนาขึ้นผ่านการประเมินจากผู้เชี่ยวชาญ 9 ท่านในระดับมาก(4.40) ด้านการประเมินความพึงพอใจผ่านการประเมินจากนักศึกษาในระดับมาก (4.40) และประสิทธิภาพของชุดการสอนมีประสิทธิภาพ (1.25) สูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานของเมกยูแกนส์ โดยภาพรวมถือว่าชุดการสอนที่พัฒนาขึ้น เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้พัฒนาการเรียนการสอนด้านวิศวกรรมโทรคมนาคมอย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: โปรแกรมจำลอง วงจรกรองความถี่ วิศวกรรมโทรคมนาคม

Abstract

This research articles aims to give the development of an instructional package of filter circuits design. The research instruments were the Simulation tool and the demonstration. The performance instruments were the evaluation form for experts and The Satisfaction form for students. Samples were 32 students who registered in Signal and System subjects in science of Electronic Engineering course of Rajamangala University of Technology Lanna. The research results were as follows, the degree of the opinions of 9 experts was high level(4.40) and the mean of satisfaction of the sampling group was high level (4.40). The efficiency of an instructional package was higher than the standard criteria of meguigans's formula (1.25). Therefore, in conclusion, an instructional package can be applied and developed for learning in telecommunication engineering course.

Keyword: Simulation tool, Filter circuits, Telecommunication Engineering.

1. บทนำ

วงจรรองความถี่มีบทบาทต่อการพัฒนานวัตกรรมอุตสาหกรรม และการใช้งานในชีวิตประจำวันของมนุษย์อย่างหลากหลาย เช่น ระบบที่วีดิทัศน์ (470-862MHz) ระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ (850, 900, 1800, 2100, 2300MHz) ระบบเครือข่ายไร้สาย ตามมาตรฐาน IEEE802.11 a/b/g/n(2.4/5GHz) [1] รวมไปถึงการประยุกต์ใช้ในงานต่างๆ เช่น ระบบอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (Internet of Thing: IOT) [2] ระบบสื่อสารผ่านดาวเทียม [3] เป็นต้น

วงจรรองความถี่ [4] คือวงจรที่เลือกความถี่ให้ผ่านไปโดยใช้คุณสมบัติของอุปกรณ์ประเภท ตัวต้านทาน ตัวเหนี่ยวนำ และตัวเก็บประจุ หรือการประยุกต์ใช้ค่าอุปกรณ์เสมือน บนวัสดุประเภทแผ่นวงจรพิมพ์ [5] บางครั้งเรียกว่า วงจรรองความถี่ไมโครสตริป และวงจรรองความถี่ในท่อนำคลื่น [6] ที่สามารถตอบสนองต่อความถี่สูงย่านไมโครเวฟได้เป็นอย่างดี

ที่ผ่านมาเมื่อนักวิจัยได้ทำการออกแบบวงจรรองความถี่บนวัสดุประเภทแผ่นวงจรพิมพ์ และวัสดุประเภทท่อนำคลื่นอย่างแพร่หลาย [5]-[7] โดยการออกแบบจะใช้วิธีที่มีความหลากหลาย และแตกต่างกันออกไปตามความถนัดและรูปแบบการใช้งาน และปัญหาที่พบในด้านการเรียนการสอนรายวิชาที่เกี่ยวข้องกับวิศวกรรมโทรคมนาคม โดยเฉพาะในการออกแบบวงจรมิโครเวฟ มีการคำนวณโดยใช้สมการที่มีขนาดใหญ่ มีขั้นตอนที่ซับซ้อน มีความผิดพลาดจากการคำนวณได้ง่าย และอาศัยเวลาในการคำนวณนาน ส่งผลให้เวลาที่ใช้ในการเรียนการสอนไม่เพียงพอกับเนื้อหา และไม่สามารถสิ้นสุดกระบวนการเรียนการสอนในห้องเรียนได้อย่างสมบูรณ์

ดังนั้นในงานวิจัยครั้งนี้ จึงได้พัฒนาสื่อการสอนเรื่องการออกแบบวงจรรองความถี่ เพื่อลดเวลาและความผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นจากการคำนวณ โดยใช้วิธีการประมาณค่าของเซฟปีเซฟ และบัตเตอร์เวิร์ด จากนั้นจึงทำการแปลงค่าอิมพีแดนซ์ให้เหมาะสม และแปลงเป็นค่าอุปกรณ์ที่ใช้ต่อในวงจร สำหรับการฝึกปฏิบัติในห้องเรียนต่อไป

2. การพัฒนาโปรแกรมจำลองสำหรับออกแบบวงจรรองความถี่

โปรแกรมจำลองที่พัฒนาขึ้นในครั้งนี้ใช้ฟังก์ชัน GUI ของโปรแกรม MATLAB ร่วมกับวิธีการประมาณค่าของเซฟปีเซฟ และบัตเตอร์เวิร์ด [4] อย่างใดอย่างหนึ่งตามการเลือกใช้งานของผู้ใช้ โดยมีกระบวนการพัฒนาโปรแกรมจำลอง ดังนี้

2.1 การเลือกวงจร

วงจรรองความถี่สำหรับงานวิจัยครั้งนี้ที่แบ่งออกเป็น 4 ชนิด ได้แก่ วงจรรองความถี่ต่ำผ่าน วงจรรองความถี่สูงผ่าน วงจรรองความถี่แถบผ่าน และวงจรรองความถี่แถบหยุด

2.2 การกำหนดตัวแปรเริ่มต้น

กำหนดตัวแปรเริ่มต้นเพื่อนำค่าไปใช้สำหรับคำนวณในโปรแกรมจำลอง ได้แก่ จำนวนอันดับของวงจรรองความถี่ ความถี่ใช้งาน ย่านความถี่ และรูปแบบของทฤษฎีการประมาณ

2.3 การคำนวณพารามิเตอร์พื้นฐาน

พารามิเตอร์พื้นฐาน ที่จำเป็นต่อการออกแบบวงจรรองความถี่ โดยใช้สมการสำหรับการคำนวณตามทฤษฎีการประมาณค่าของบัตเตอร์เวิร์ด [4] ดังนี้

$$g_0 = 1.0, \quad g_i = 2 \sin\left(\frac{(2i-1)\pi}{2n}\right), \quad g_{n+1} = 1.0 \quad (1)$$

เมื่อ g คือค่าของอุปกรณ์เสมือน

i หมายถึงลำดับของอุปกรณ์มีค่าตั้งแต่ 1 ถึง n

n หมายถึงจำนวนของอันดับ

ในการทำงานเดียวกันกับทฤษฎีการประมาณค่าของเซฟปีเซฟ [4] สามารถหาค่าของอุปกรณ์แต่ละตัวในวงจรได้ดังนี้

$$g_0 = 1.0, \quad (2)$$

$$g_1 = \frac{2}{\gamma} \sin\left(\frac{\pi}{2n}\right), \quad (3)$$

$$g_i = \frac{1}{g_i - 1} \frac{4 \sin\left[\frac{(2i-1)\pi}{2n}\right] \sin\left[\frac{(2i-3)\pi}{2n}\right]}{\gamma^2 + \sin^2\left[\frac{(i-1)\pi}{n}\right]} \quad (4)$$

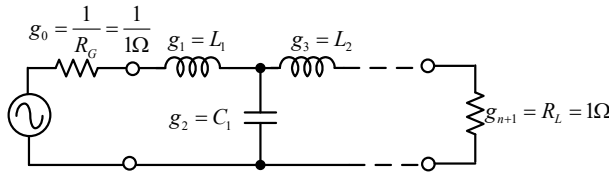
โดยที่ $\beta = \ln[\coth(\alpha_{\max}/17.37)]$

$$\gamma = \sinh(\beta/2n)$$

เมื่อ α_{\max} คือ ค่าการกระเพื่อม (Ripple)

2.4 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านต้นแบบ

วงจรประกอบด้วยแหล่งจ่าย ตัวต้านทาน 1 โอห์มและความถี่คัตออฟที่ 1 rad/s โดยโครงข่ายภายในจะประกอบด้วยอุปกรณ์รีแอคทีฟ (Reactive) แบบขั้นบันได (Ladder) โดยที่จำนวนลำดับ (Order) ของโครงข่ายจะเท่ากับจำนวนอุปกรณ์รีแอคทีฟ แสดงดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 : ตัวอย่างวงจรกรองความถี่ต้นแบบ

2.5 การปรับย่านความถี่และอิมพีแดนซ์

การปรับค่าความต้านทานเดิม (R_{old}) ไปเป็นค่าความต้านทานนอร์มอไลซ์ (R_ϕ) สามารถทำได้โดยการหาความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานเดิมและความต้านทานใหม่ (R_{new}) ที่ต้องการใช้งาน

$$R_\phi = \frac{R_{new}}{R_{old}} \quad (5)$$

การออกแบบใช้งานที่ย่านความถี่ใดๆ ทำได้โดยการหาความสัมพันธ์ระหว่างความถี่เดิม (ω_{old}) และความถี่ใหม่ (ω_{new}) ที่ต้องการใช้งาน เรียกว่าความถี่ของการนอร์มอไลซ์แทนด้วยสัญลักษณ์ ω_ϕ แสดงดังสมการที่ 6

$$\omega_\phi = \frac{\omega_{new}}{\omega_{old}} \quad (6)$$

จัดรูปสมการใหม่เพื่อหาค่าตัวเหนี่ยวนำใหม่ (L_{new})

$$L_{new} = \frac{L_{old} R_\phi}{\omega_\phi} \quad (7)$$

ในทำนองเดียวกันกับตัวเก็บประจุ (C_{new}) หาค่าได้ดังนี้

$$C_{new} = \frac{C_{old}}{R_\phi \omega_\phi} \quad (8)$$

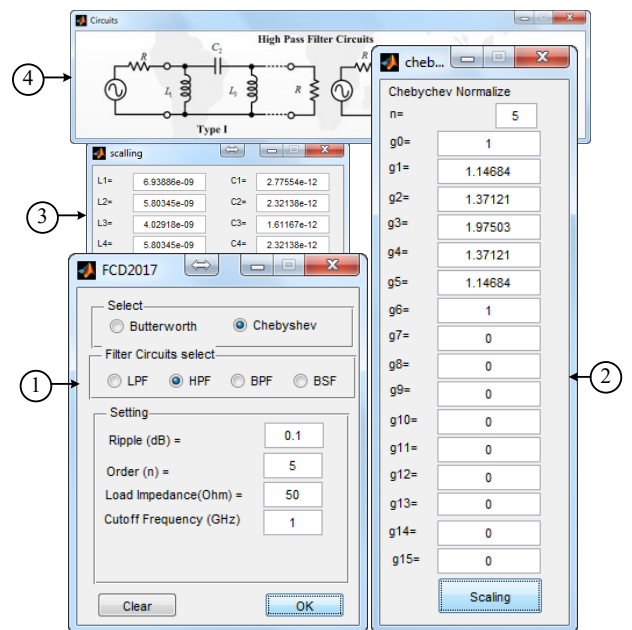
2.6 การแปลงสภาพวงจร

การแปลงสภาพวงจรจากวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน ไปเป็นวงจรต่างๆ ได้แก่

- 1) การแปลงสภาพเป็นวงจรกรองความถี่สูงผ่าน
- 2) การแปลงสภาพเป็นวงจรกรองแถบความถี่ผ่าน
- 3) การแปลงสภาพเป็นวงจรกรองแถบความถี่หยุด

ใช้กระบวนการและสมการในการแปลงซับซ้อนและใช้สมการที่มีขนาดใหญ่ โดยสามารถค้นคว้าเพิ่มเติมได้จากเอกสารอ้างอิง [4]

กระบวนการทั้งหมดที่กล่าวมา คือหลักการและวิธีการในการออกแบบวงจรกรองความถี่ด้วยทฤษฎีการประมาณค่าของเซฟปีเซฟ และบัตเตอร์เวิร์ท และพัฒนาเป็นโปรแกรมจำลองแสดงดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 : หน้าต่างโปรแกรมออกแบบวงจรกรองความถี่

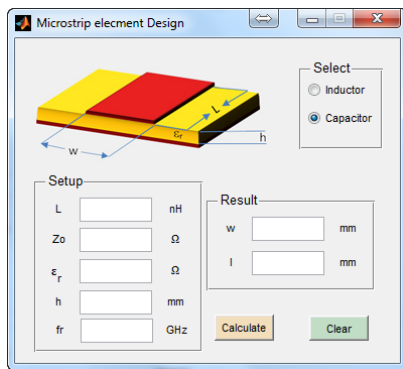
ภาพที่ 2 แสดงหน้าต่างโปรแกรมจำลองการออกแบบวงจรกรองความถี่ ประกอบไป 4 ส่วน ดังนี้

- 1) หน้าต่างโปรแกรมหลัก สำหรับรับค่าตัวแปรเบื้องต้นที่จำเป็นต่อการออกแบบ
- 2) หน้าต่างการคำนวณพารามิเตอร์พื้นฐานที่เป็นตัวประกอบจากการประมาณค่าตามทฤษฎี

3) หน้าต่างการปรับค่าที่เหมาะสมที่ใช้หลักการของการปรับย่านความถี่และอิมพีแดนซ์ และแปลงสภาพวงจรเป็นวงจรองค์ความถี่ต่างๆ ที่ได้เลือกในหน้าต่างโปรแกรมหลัก

4) หน้าต่างแสดงการต่อวงจรพื้นฐาน

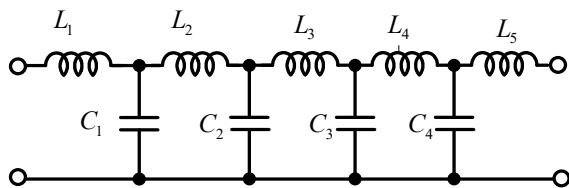
นอกจากนั้น ผู้วิจัยได้สร้างโปรแกรมจำลองสำหรับการแปลงค่าอุปกรณ์ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ เป็นวงจรไมโครสตริป แสดงดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 : โปรแกรมออกแบบวงจรไมโครสตริป

3. การพัฒนาชุดสาธิตวงจรองค์ความถี่

การพัฒนาชุดสาธิตเรื่องวงจรองค์ความถี่ในงานวิจัยครั้งนี้ มุ่งเน้นที่วงจรในย่านความถี่ไมโครเวฟ และยกตัวอย่างการออกแบบวงจรองค์ความถี่ต่ำผ่าน โดยใช้สายส่งไมโคร สตริป แบบ Stub Impedance อันดับ 9 ใช้วิธีการประมาณค่าแบบเซฟ บีเซฟ โดยกำหนด $Z_0 = 50\Omega$ ความถี่คัตออฟ $f_c = 1.5\text{GHz}$ แสดงวงจรดังภาพที่ 4



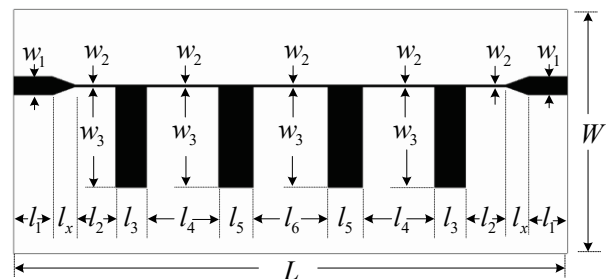
ภาพที่ 4 : วงจรองค์ความถี่ต่ำผ่านต้นแบบ

1) ออกแบบวงจรองค์ความถี่ต่ำผ่านต้นแบบ โดยใช้สมการที่ (2) – (4) และกำหนดค่า L และ C ดังภาพที่ 2 จะได้ค่าอุปกรณ์ ต้นแบบ ดังนี้ $L_1=L_5=1.1957\text{H}$, $L_2=L_4=2.13457\text{H}$, $L_3=2.20539\text{H}$, $C_1=C_4=1.4426\text{F}$ และ $C_2=C_3=1.61671\text{F}$

2) ปรับย่านความถี่และอิมพีแดนซ์ เพื่อให้ตรงกับความถี่ใช้งาน และค่าอิมพีแดนซ์ที่กำหนด โดยใช้สมการที่ (5) – (8) และ

ได้ค่าอุปกรณ์ใหม่ดังนี้ $L_1=L_5=6.34\text{nH}$, $L_2=L_4=11.3\text{nH}$, $L_3=11.7\text{nH}$, $C_1=C_4=3.06\text{pF}$ และ $C_2=C_3=3.43\text{pF}$

3) นำค่าอุปกรณ์ที่ได้ไปแปลงเป็นวงจรไมโครสตริปที่ใช้หลักการและสมการตามทฤษฎี [4] และในงานวิจัยครั้งนี้ได้พัฒนาเป็นโปรแกรมจำลองที่ได้กล่าวมาก่อนหน้านี้ (ภาพที่ 4) ได้ค่าอุปกรณ์ $W = 90.5\text{mm}$, $L = 40\text{mm}$, $w_1=3\text{mm}$, $w_2=0.18\text{mm}$, $w_3=16.5\text{mm}$, $l_1=6.35\text{mm}$, $l_2=7.42\text{mm}$, $l_3=6.62\text{mm}$, $l_4=13.25\text{mm}$, $l_5=7.32\text{mm}$, $l_6=13.7\text{mm}$, $l_x=3.65\text{mm}$ แสดงดังภาพที่ 5



ภาพที่ 5 : โครงสร้างวงจรองค์ความถี่ต่ำผ่าน

4) นำค่าที่ได้ไปจำลองการทำงานด้วยโปรแกรมจำลองเชิงพาณิชย์และสร้างเป็นชิ้นงานจริง แสดงดังภาพที่ 6



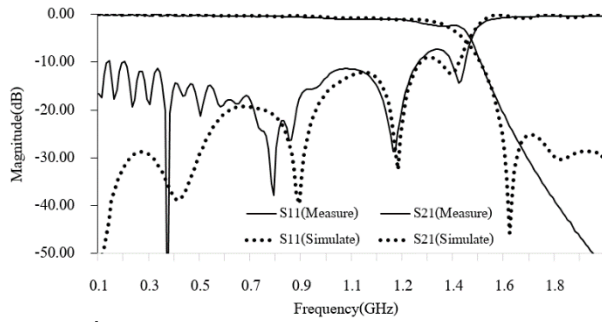
ภาพที่ 6 : วงจรองค์ความถี่ต่ำผ่าน

4. ผลการวิจัย

การพัฒนาชุดการสอนเรื่องการออกแบบวงจรองค์ความถี่ มีผลการวิจัยดังนี้

4.1 ผลการทดสอบชุดการสอน

โปรแกรมจำลองที่พัฒนาขึ้นสามารถออกแบบวงจรองค์ความถี่ที่กำหนดได้อย่างถูกต้องตามหลักการทางทฤษฎี [4] และเมื่อนำไปสร้างชิ้นงานจริงสำหรับนำเสนอเป็นชุดสาธิต ทำการวัดและทดสอบเทียบกับการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมจำลองเชิงพาณิชย์ ผลที่ได้แสดงดังภาพที่ 7



ภาพที่ 7 : ผลการตอบสนองต่อความถี่ของวงจรที่นำเสนอ

ภาพที่ 7 แสดงผลการเปรียบเทียบการตอบสนองต่อความถี่ที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายเวกเตอร์ และการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรมจำลองเชิงพาณิชย์ พบว่าความถี่ตัดมีค่าเท่ากับ 1.5 GHz และ 1.47GHz ตามลำดับของการวัดทั้งสองแบบ และให้ผลที่สอดคล้องกัน

4.2 ผลการประเมินชุดการสอนโดยผู้เชี่ยวชาญ

การแบบประเมินความเหมาะสมของชุดการสอน โดยผู้เชี่ยวชาญจำนวน 9 ท่าน ให้คะแนนแบบ 5 ระดับ [8] ผลการประเมินพบว่า ชุดสื่อการสอนที่พัฒนาขึ้นมีความเหมาะสมอยู่ในระดับมาก ที่ระดับค่าเฉลี่ย 4.40 และค่า S.D. = 0.26 แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ผลการวิเคราะห์คุณภาพชุดการสอนโดยผู้เชี่ยวชาญ

รายการ	\bar{X}	S.D.
1. ด้านสื่อโปรแกรมจำลอง		
1.1 เหมาะสมกับระดับผู้เรียน	4.67	0.50
1.2 เหมาะสมกับวัตถุประสงค์การสอน	4.56	0.53
1.3 ใช้งานง่ายและสะดวก	4.33	0.50
1.4 ผลลัพธ์มีความถูกต้อง	4.78	0.44
1.5 สามารถส่งเสริมให้ผู้เรียนเกิดการเรียนรู้ได้ดี	4.44	0.53
ค่าผลเฉลี่ย	4.56	0.22
2. ด้านชุดสาธิต		
2.1 เหมาะสมกับระดับผู้เรียน	4.11	0.78
2.2 เหมาะสมกับวัตถุประสงค์การสอน	4.11	0.66
2.3 ใช้งานง่ายและสะดวก	4.22	0.67
2.4 ผลลัพธ์มีความถูกต้อง	4.67	0.50
2.5 สามารถส่งเสริมให้ผู้เรียนเกิดการเรียนรู้ได้ดี	4.11	0.60
ค่าผลเฉลี่ย	4.24	0.43
รวมทั้งรวม	4.40	0.26

4.3 ผลการประเมินความพึงพอใจ

ผู้วิจัยได้นำชุดการสอน ไปใช้กับกลุ่มตัวอย่างในระดับปริญญาตรี ที่ลงทะเบียนเป็นวิชาสัญญาณและระบบ ในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี จำนวน 32 คน ซึ่งหลังจากการเรียนรู้ด้วยชุดสื่อการสอน พบว่าผู้เรียนมีความรู้ความเข้าใจเพิ่มมากขึ้น และผลความพึงพอใจของนักศึกษาต่อชุดการสอนชุดนี้อยู่ในระดับมาก ค่าเฉลี่ยโดยรวมของชุดการสอนทั้งหมดมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.40 ค่า S.D. เท่ากับ 0.18 แสดงในตารางที่ 2

4.4 ผลการหาประสิทธิภาพชุดการสอน

การหาประสิทธิภาพชุดการสอน ที่ประกอบไปด้วยโปรแกรมจำลองและชุดสาธิต ใช้เกณฑ์การหาประสิทธิภาพของมาตรฐานการหาประสิทธิภาพของเมกยูแกนส์ [9] แสดงดังสมการที่ (9)

$$MaguigansRatio = \frac{M_2 - M_1}{P - M_1} + \frac{M_2 - M_1}{P} \quad (9)$$

เมื่อ M_1 คือ คะแนนเฉลี่ยจากการทดสอบก่อนเรียน
 M_2 คือ คะแนนเฉลี่ยจากการทดสอบหลังเรียน
 P คือ คะแนนเต็มของแบบทดสอบ

ตารางที่ 2 ผลการประเมินความพึงพอใจ

รายการ	\bar{X}	S.D.
1. ด้านสื่อโปรแกรมจำลอง		
1.1 เหมาะสมกับระดับผู้เรียน	4.44	0.58
1.2 เหมาะสมกับวัตถุประสงค์การสอน	4.32	0.63
1.3 ใช้งานง่ายและสะดวก	4.56	0.58
1.4 ผลลัพธ์มีความถูกต้อง	4.56	0.58
1.5 สามารถส่งเสริมให้ผู้เรียนเกิดการเรียนรู้ได้ดี	4.28	0.61
ค่าผลเฉลี่ย	4.43	0.30
2. ด้านชุดสาธิต		
2.1 เหมาะสมกับระดับผู้เรียน	4.40	0.65
2.2 เหมาะสมกับวัตถุประสงค์การสอน	4.28	0.61
2.3 ใช้งานง่ายและสะดวก	4.32	0.68
2.4 ผลลัพธ์มีความถูกต้อง	4.40	0.76
2.5 สามารถส่งเสริมให้ผู้เรียนเกิดการเรียนรู้ได้ดี	4.44	0.58
ค่าผลเฉลี่ย	4.37	0.30
รวมทั้งรวม	4.40	0.18

ค่าอัตราส่วนที่ได้จากสูตรนี้ จะมีช่วงอยู่ระหว่าง 0-2 ถ้าค่าที่คำนวณได้ มีค่ามากกว่า 1 ถือว่าได้เกณฑ์มาตรฐานของเมทริกซ์ และผลที่ได้จากการหาประสิทธิภาพ แสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์การหาประสิทธิภาพ

คะแนน	คะแนนเฉลี่ย(เต็ม20)	ค่าร้อยละ
แบบทดสอบก่อนเรียน (M_1)	5.5	31
แบบทดสอบหลังเรียน (M_2)	16	77.5
ประสิทธิภาพชุดการสอน	1.25	

จากตารางที่ 3 พบว่าประสิทธิภาพชุดการสอนตามมาตรฐานเมทริกซ์มีค่าที่ 1.25 ซึ่งถือผ่านเกณฑ์การประเมิน และมีประสิทธิภาพทางการเรียนรู้

5. สรุปผล

บทความวิจัยนี้เป็นการนำเสนอการพัฒนาชุดการสอนเรื่องการออกแบบวงจรกรองความถี่ ที่ประกอบไปด้วยโปรแกรมจำลองและชุดสาธิต ผลการวิจัยสรุปได้ดังนี้

- 1) โปรแกรมจำลองพัฒนาในรูปแบบของส่วนประสานงานทางกราฟิกกับผู้ใช้ (GUI) สามารถออกแบบวงจรกรองความถี่ได้อย่างถูกต้องและสอดคล้องกับโปรแกรมจำลองเชิงพาณิชย์
- 2) ชุดสาธิตที่พัฒนาขึ้นโดยใช้วงจรของจริงทำการวัดและทดสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายเวกเตอร์ ผลที่ได้มีความถูกต้องและสอดคล้องกัน เมื่อเทียบกับโปรแกรมจำลองเชิงพาณิชย์
- 3) ผลการประเมินชุดการสอนโดยผู้เชี่ยวชาญ ผ่านการประเมินที่ระดับมากที่สุดที่คะแนนเฉลี่ย 4.40
- 4) ผู้เรียนมีความพึงพอใจต่อชุดการสอนที่พัฒนาขึ้น ที่ระดับมากที่สุดที่ค่าเฉลี่ย 4.40
- 5) ประสิทธิภาพของชุดการสอนผ่านมาตรฐานการหาประสิทธิภาพของเมทริกซ์ ที่ระดับ 1.25

โดยภาพรวม ชุดการสอนที่พัฒนาขึ้น มีประสิทธิภาพอยู่ในระดับมากที่สุด และมีการทำงานถูกต้องตามเกณฑ์ทางวิศวกรรม นอกจากนี้ยังพบว่า สมการพื้นฐานของการประมาณค่าวงจรกรองความถี่ สามารถพัฒนาในรูปแบบของอัลกอริทึม ผ่านการ

ประยุกต์ใช้ด้วยฟังก์ชัน GUI ของโปรแกรม MATLAB และสามารถนำไปใช้กับการเรียนการสอนได้อย่างมีประสิทธิภาพ

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ให้โอกาสและสนับสนุนทุนวิจัย รหัสโครงการ 59NHRENCM201

7. เอกสารอ้างอิง

- สำนักงาน กสทช., “รายงานการศึกษา แนวทางการจัดสรรคลื่นความถี่ สำหรับการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีเครือข่ายไร้สาย WiMAX ในประเทศไทย,” 2549.
- Wen-Chung Tsai, You-Jyun Shih and Ting-Ming Tsai, "IoT-type Electric Fan: Remote-Controlled by Smart-Phone," Third International Conference on Computing Measurement Control and Sensor Network (CMCSN), 2016.
- Farhad Bagheroskouei, Shahab Karbasian, Maryam Baghban and Reza Amjadifard, "Design and implementation of the electrical power subsystem for a small satellite," In 8th International Conference on Recent Advances in Space Technologies (RAST), 2017.
- Jia-Sheng Hong and M.J.Lancaster, “Microstrip Filters for RF/Microwave Applications,” United States of America: A Wiley-Interscience publication, 2001.
- Bunga Dwi Wulandari and Achmad Munir, "Equivalent circuit for microstrip bandpass filter," In The 2nd International Conference on Wireless and Telematics (ICWT), 2016.
- S.Chocadee and S.Akatimagool, “Development of efficient EM simulation tool for capacitive and inductive obstacle analysis,” in Electrical Engineering/Electronics Computer Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), 2010. pp.1154-1158.
- Jin Chen, Hui Zhang and Zengrui Li, "Analysis of sinusoidal shaped microstrip bandstop filter by the static circuit parameters method," In The 6th International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation, and EMC Technologies (MAPE), 2015.
- ชานินทร์ ศิลป์จารุ, “การวิจัยและวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติด้วย SPSS และ AMOS,” พิมพ์ครั้งที่ 13. เอส.อาร์.พรินต์ติ้ง แมสโปรดักส์.กรุงเทพฯ, 2555.
- เสาวนีย์ ลิกขามันจิด, "เทคโนโลยีทางการศึกษา," กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2528.