http://journal.rmutp.ac.th/

การพัฒนาโปรแกรมคำนวณสายส่งสัญญาณตามประเภทการใช้งานและความถี่

รุ่งอรุณ พรเจริญ*

คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
399 ถนนสามเสน แขวงวชิรพยาบาล เขตดุสิต กรุงเทพมหานคร 10300

รับบทความ 21 ธันวาคม 2560; ตอบรับบทความ 5 มีนาคม 2561

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาโปรแกรมคำนวณสายส่งสัญญาณตามประเภทการใช้งานและความถี่ ประกอบด้วย 3 ชนิด ได้แก่ สายส่งสัญญาณแบบสองสาย สายส่งสัญญาณแบบระนาบคู่ และสายส่งสัญญาณแบบโคแอกซ์ โปรแกรมคำนวณนี้พัฒนาขึ้นมาจากระบบกราฟิกของโปรแกรมแมทแลปสำหรับการติดต่อโดยตรงกับผู้ใช้งาน ผลการพัฒนาและทดสอบโปรแกรม พบว่า โปรแกรมสามารถคำนวณค่าความจุ คำนวณค่าความนำ คำนวณค่าความเหนี่ยวนำ คำนวณค่าความต้านทาน และคำนวณค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่งสัญญาณตามประเภทการใช้งานและความถี่ได้อย่างถูกต้อง จากการทดสอบความสามารถของโปรแกรมในด้านต่าง ๆ โดยผู้เชี่ยวชาญจำนวน 5 ท่าน และผู้ใช้งานระบบจำนวน 20 คน พบว่า ผู้เชี่ยวชาญมีค่าเฉลี่ยเลขคณิตเท่ากับ 4.04 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.36 และผู้ใช้งานระบบมีค่าเฉลี่ยเลขคณิตเท่ากับ 3.88 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.48 จึงสรุปได้ว่าประสิทธิภาพของโปรแกรมมีค่าระดับประสิทธิภาพอยู่ในระดับดีมากและสามารถนำไปใช้เป็นสื่อประกอบการเรียนการสอนได้เป็นอย่างดี

คำสำคัญ: โปรแกรมคำนวณ; สายส่งสัญญาณ; ความถี่

** ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทร: +668 4680 7894, ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์: rungaroon.s@rmutp.ac.th*

http://journal.rmutp.ac.th/

Development of The Transmission Line Calculation Program Based on Usage and Frequency

Rungaroon Porncharoen*

Faculty of Industrial Education, Rajamangala University of Technology Phra Nakhon
399 Samsen Road, Vachira Phayaban, Dusit, Bangkok, 10300

Received 21 December 2017; Accepted 5 March 2018

Abstract

The objectives of this research were to develop of transmission line calculation program based on usage and frequency consisting of the two-wire transmission line, twisted pair transmission line, and coaxial transmission line. The program was developed in the form of graphical user interface in Matlab. The developing and testing results found that the program was correctly capable to calculate capacity, conductance, inductance, resistance and impedance for each transmission line usage and frequency. The results from the program with black box testing by five experts and twenty system users found that the average and the standard deviation of results form computer experts were 4.04 and 0.36, respectively, while those of results form the system users were 3.88 and 0.48, respectively. Conclusion, it showed that the efficiency of the calculation program was a high level and can be used as a teaching and learning as well.

Keywords: Calculation Program; Transmission Line; Frequency

*** Corresponding Author. Tel.: +668 4680 7894, E-mail Address: rungaroon.s@rmutp.ac.th***

1. บทนำ

การสื่อสารระหว่างบุคคล หรือระหว่างอุปกรณ์ทางระบบโทรคมนาคมนั้น การรับส่งข้อมูลจากผู้ส่งไปยังผู้รับจะมีตัวกลางเป็นสื่อเพื่อนำข่าวสารที่ทำให้ต้นทางและปลายทางสามารถติดต่อสื่อสารกันได้คือช่องสัญญาณสื่อสาร โดยสัญญาณที่ส่งผ่านช่องทางสื่อสารนี้อยู่ในรูปแบบของพลังงานต่าง ๆ เช่น พลังงานไฟฟ้า พลังงานแสง พลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เป็นต้น โดยทั่วไประบบโทรคมนาคมนั้นมีการใช้งานสายส่งสัญญาณสำหรับการถ่ายโอนพลังงานจากตัวกำเนิดไปยังตัวใช้พลังงาน เช่น สัญญาณเสียงจากห้องจัดรายการวิทยุส่งสัญญาณผ่านสายส่งสัญญาณไปยังเครื่องส่งและเครื่องขยายสัญญาณวิทยุ เพื่อขยายสัญญาณและส่งผ่านสายส่งสัญญาณไปยังสายอากาศที่ควบคุมสัญญาณ [1] ซึ่งสายส่งสัญญาณเป็นวัสดุตัวกลางที่ออกแบบเพื่อเป็นเส้นทางสำหรับนำสัญญาณจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่ง เช่น การส่งสัญญาณระหว่างสายอากาศไปยังเครื่องขยายสัญญาณ หรือการติดต่อสื่อสารระหว่างประเทศที่ห่างไกลกันโดยผ่านเส้นใยนำแสงเป็นต้น สายส่งสัญญาณมีหลากหลายชนิด เช่น สายคู่ขนานช่องเปิด สายคู่ขนานช่องปิด สายตีเกลียวคู่ สายคู่หุ้มด้วยฉนวน สายแกนร่วมและเส้นใยนำแสง เป็นต้น การเลือกใช้สายส่งสัญญาณจะขึ้นกับคุณสมบัติที่ต้องการต่าง ๆ เช่น ความกว้างของแถบความถี่สัญญาณที่ใช้ ระยะทางที่ใช้สายส่ง งบประมาณและสภาพแวดล้อมของจุดติดตั้ง รวมถึงพารามิเตอร์ของสาย เช่น การลดทอนภายในสาย ลักษณะเฉพาะของอิมพีแดนซ์ของสายการเหนี่ยวนำข้ามช่องสัญญาณ หรือครอสทอล์กและการสะท้อนภายในสาย เป็นต้น ทั้งนี้เพื่อให้เกิดประสิทธิรูปสูงสุดเหมาะสมกับการใช้งานประเภทต่าง ๆ [2] แต่การคำนวณพารามิเตอร์ของสายมีตัวแปรจำนวนมากที่ใช้ในการคำนวณเพราะมีความยุ่งยากและซับซ้อนมาก ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงไปตามการใช้งานและความถี่ของสายส่งสัญญาณแต่ละประเภท

การคำนวณหาค่าต่าง ๆ ต้องใช้ระยะเวลาเป็นอย่างมาก ดังนั้นการแก้ปัญหาวิธีหนึ่งในปัจจุบันนิยมใช้คอมพิวเตอร์เข้ามาเป็นตัวช่วยในการคำนวณ โดยใช้โปรแกรมต่าง ๆ เช่น ไมโครซอฟต์เอ็กเซล (Microsoft Excel) โปรแกรมแมทแลป (Matlab) หรือโปรแกรมที่ออกแบบเฉพาะทาง สำหรับโปรแกรมที่นิยมนำมาใช้วิเคราะห์งานทางด้านวิศวกรรม ได้แก่ โปรแกรมแมทแลป (Matlab) ซึ่งเป็นโปรแกรมที่สามารถคำนวณเชิงตัวเลขและกราฟิกที่ซับซ้อนให้ง่ายต่อการใช้งานมีความรวดเร็วและการเขียนโปรแกรมไม่ยุ่งยาก เมื่อนำไปใช้งานและสามารถเห็นผลลัพธ์ได้อย่างรวดเร็ว อีกทั้งโปรแกรมยังสามารถสร้างกราฟิกสำหรับการติดต่อโดยตรงกับผู้ใช้งาน (Graphic User Interface : GUI) เพื่อช่วยลดระยะเวลาและความผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นจากการคำนวณและออกแบบให้เหมาะสมการผู้ใช้งานได้อย่างรวดเร็ว

ด้วยเหตุนี้ผู้วิจัยจึงมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาโปรแกรมคำนวณสายส่งสัญญาณตามประเภทการใช้งานและความถี่เพื่อให้ผู้ที่ต้องการออกแบบสายส่งสัญญาณคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ มาสร้างได้ง่ายขึ้น อีกทั้งเพื่อเป็นสื่อการเรียนรู้ให้นักศึกษาสามารถเข้าใจเกี่ยวกับการสร้างสายส่งสัญญาณให้สะดวกในการคำนวณค่าพารามิเตอร์ได้ เนื่องจากข้อดีของโปรแกรมคำนวณ คือ มีความง่ายและสะดวกเมื่อต้องการแสดงภาพความสัมพันธ์ต่าง ๆ ของพารามิเตอร์ทำให้ผู้สนใจหรือนักศึกษามีความเข้าใจอย่างชัดเจนและสามารถปรับเปลี่ยนได้ตามต้องการของผู้สนใจหรือนักศึกษาที่ต้องการออกแบบสายส่งสัญญาณประเภทต่าง ๆ

1.1 ทฤษฎีสายส่งสัญญาณ

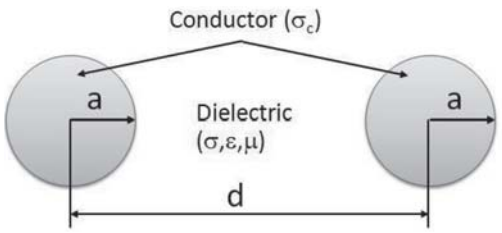
การสื่อสารข้อมูลในย่านความถี่วิทยุหรือความถี่สูงเท่านั้น ซึ่งสามารถจัดจำพวกและชนิดของสายส่งได้หลายประเภท เช่น สายส่งแบบสองสาย (Twin Line) หรือ (Two Wire) สายส่งแบบระนาบคู่ (Twisted Pair)

สายส่งโคแอคเชียล (Coaxial Line) สายส่งแบบเส้นหรือสตริปไลด์ (Strip Line) สายส่งแบบไมโครสตริป (Micro Strip Line) และท่อนำคลื่นสัญญาณ เป็นต้น

การวิเคราะห์สมรรถนะของสายส่งสัญญาณสามารถที่จะแบ่งสายส่งสัญญาณในอากาศออกเป็น 3 ประเภท โดยการจัดประเภทขึ้นอยู่กับการใช้งานและความถี่ [3] ดังนี้

1.1.1 สายส่งสัญญาณแบบสองสาย (Two Wire Transmission Lines)

เป็นสายส่งที่มีตัวนำขนาดเท่ากันสองสายมีรัศมี a และสภาพนำ σ_c โดยมีระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลาง d อยู่ในตัวกลาง มีสภาพให้ซึมได้ μ สภาพยอม e และสภาพนำ σ ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 โครงสร้างของสายส่งสัญญาณแบบสองสาย

กรณีย่านความถี่สูง

ความจุต่อหนึ่งหน่วยความยาวมีค่าดังนี้

$$c = \frac{\pi\varepsilon}{\cosh^{-1}(d/2a)} \quad (1)$$

เมื่อ a << d จะได้

$$c = \frac{\pi\varepsilon}{In(d/a)} \quad (2)$$

สำหรับความเหนี่ยวนำภายนอกต่อหนึ่งหน่วยความยาวหาได้จาก

$$L_{ext} = c = \mu\varepsilon \quad (3)$$

$$L_{ext} = \frac{\mu\varepsilon}{c}$$

$$L_{ext} = \frac{\mu}{\pi}\cosh^{-1}(d/2a)$$

เมื่อ a << d จะได้

$$L_{ext} = \frac{\mu}{\pi} In(d/a) \quad (4)$$

ส่วนความนำต่อหนึ่งหน่วยความยาวอาจเขียนได้จากการตรวจนิพจน์ความจุ จะได้

$$G = \frac{\pi\sigma}{\cosh^{-1}(d/2a)} \quad (5)$$

เมื่อ a << d จะได้

$$G = \frac{\pi\sigma}{In(d/a)} \quad (6)$$

ความต้านทานต่อหนึ่งหน่วยความยาวเป็นสองเท่าของกรณีความต้านทานต่อหนึ่งหน่วยความยาวของตัวนำในของทรงกระบอกที่มีแกนร่วมกัน

$$R = \frac{1}{\pi a \delta \sigma_c} \quad (7)$$

จากค่าความจุต่อหนึ่งหน่วยความยาว และความเหนี่ยวนำภายนอกต่อหนึ่งหน่วยความยาว จะได้ค่าความต้านทานเชิงซ้อนเฉพาะดังนี้

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L_{ext}}{c}} = \frac{1}{\pi}\sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}}\cosh^{-1}(d/2a) \quad (8)$$

เมื่อ a << d จะได้

$$Z_0 = \frac{1}{\pi}\sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} In(d/a) \quad (9)$$

กรณีย่านความถี่ต่ำ

ที่ย่านความถี่ต่ำ สมมติการแจกแจงกระแสเป็นแบบสม่ำเสมอ จะได้ c และ G เหมือนกับกรณีความถี่สูง ดังนี้

$$c = \frac{\pi\varepsilon}{\cosh^{-1}(d/2a)} \tag{10}$$

$$G = \frac{\pi\sigma}{\cosh^{-1}(d/2a)} \tag{11}$$

แต่ค่าความเหนี่ยวนำต่อหนึ่งหน่วยความยาวเพิ่มขึ้นเป็น สองเท่าของความเหนี่ยวนำภายในของลวดกลมตรง

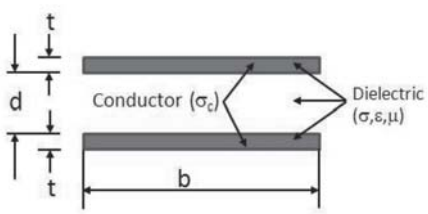
$$L = \frac{\mu}{\pi}\left[\frac{1}{4} + \cosh^{-1}(d/2a)\right] \tag{12}$$

และค่าความต้านทานต่อหนึ่งหน่วยความยาวเป็น 2 เท่าของความต้านทานของลวดที่มีรัศมี a สภาพนำ σ_c และยาวหนึ่งหน่วย ในวงจรกระแสตรง

$$R = \frac{2}{\sigma_c \pi a^2} \tag{13}$$

1.1.2 สายส่งสัญญาณแบบระนาบคู่ (Twisted Pair Transmission Lines)

เป็นสายส่งที่เป็นระนาบขนานกัน ซึ่งระนาบที่ขนานกันเป็นตัวนำที่มีสภาพนำ σ_c หนา t และห่าง d ไดอิเล็กตริกคั่นมีสภาพให้ซึมได้ m สภาพยอม e และสภาพนำ s ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 โครงสร้างของสายส่งสัญญาณแบบระนาบคู่

กรณีย่านความถี่สูง

สายส่งสัญญาณแบบระนาบคู่แต่ละตัวนำมีรัศมี a มีค่าสภาพความนำ σ_c มีระยะห่างจากจุดศูนย์กลางของตัวนำหนึ่งไปยังอีกตัวนำหนึ่งเป็น d วางอยู่ในตัวกลางที่มีค่าความซึมซับแม่เหล็กเป็น m ความยินยอมไฟฟ้าเป็น e และสภาพความนำ s จะหาค่าความจุไฟฟ้าได้จากสมการที่ (1) และ (2) ดังนี้

$$c = \frac{\pi\varepsilon}{\cosh^{-1}(d/2a)}$$

เมื่อ a << d จะได้

$$G = \frac{\pi\sigma}{\cosh^{-1}(d/2a)}$$

สำหรับความเหนี่ยวนำภายนอกต่อหนึ่งหน่วยความยาวหาได้จากสมการที่ (3) และ (4)

$$L_{ext} = c = \mu\varepsilon$$

$$L_{ext} = \frac{\mu}{\pi}\cosh^{-1}(d/2a)$$

เมื่อ a << d จะได้

$$L_{ext} = \frac{\mu}{\pi} In(d/a)$$

ค่าความนำไฟฟ้าต่อหน่วยความยาวอาจจะหาได้ทันทีจากการใช้สมการที่ (5) ของค่าความจุไฟฟ้าเป็นตัวแทน

$$G = \frac{\pi\sigma}{\cosh^{-1}(d/2a)}$$

ค่าความต้านทานต่อหน่วยความยาวมีค่าเป็นสองเท่าของตัวนำตรงกลางของสายโคแอกซ์ จากสมการที่ (7)

$$R = \frac{1}{\pi a \delta \sigma_c}$$

สำหรับค่าสุดท้ายนั้นใช้สมการค่าความจุไฟฟ้าและความเหนี่ยวนำแม่เหล็กมาหาค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ

จากสมการที่ (8)

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L_{ext}}{c}} = \frac{1}{\pi}\sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}}\cosh^{-1}(d/2a)$$

กรณีย่านความถี่ต่ำ

ที่ย่านความถี่ต่ำ กระแสไหลกระจายอย่างสม่ำเสมอ ต้องทำการปรับสมการสำหรับ L และ R แต่ไม่ต้องปรับค่าของ C และ G ซึ่งสามารถใช้จากสมการที่ (1) และ (5)

$$c = \frac{\pi\varepsilon}{\cosh^{-1}(d/2a)}$$

$$G = \frac{\pi\sigma}{\cosh^{-1}(d/2a)}$$

ค่าความเหนี่ยวนำแม่เหล็กต่อหน่วยความยาว จะต้องเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่าของความเหนี่ยวนำภายในของสายตัวนำกลม จากสมการที่ (10)

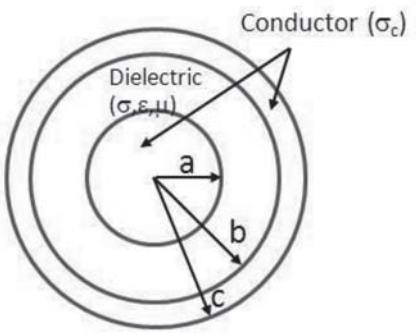
$$L = \frac{\mu}{\pi}\left[\frac{1}{4} + \cosh^{-1}(d/2a)\right]$$

ค่าความต้านทานเป็นสองเท่าของความต้านทานกระแสตรงของสายตัวนำที่มีรัศมี a ค่าสภาพความนำเป็น σ_c และค่าต่อหน่วยความยาว คือ

$$R = \frac{1}{\pi a^2 \sigma_c} \quad (12)$$

1.1.3 สายส่งสัญญาณแบบโคแอกซ์ (Coaxial Transmission Lines)

เป็นสายส่งที่มีลักษณะทรงกระบอกมีตัวนำซ้อนกันและมีไดอิเล็กตริกคั่นกลาง มีการใช้งานในย่านความถี่ 3 ประเภท ได้แก่ ย่านความถี่สูง ย่านความถี่ปานกลาง และย่านความถี่ต่ำ ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 โครงสร้างของสายส่งสัญญาณแบบโคแอกซ์

กรณีย่านความถี่สูง

ทรงกระบอกมีแกนร่วมกันเป็นสายเคเบิ้ล (Cable) ซึ่งเป็นทรงกระบอกตัวนำซ้อนกันและมีไดอิเล็กตริกคั่น จะได้ความจุต่อหนึ่งหน่วยความยาวของทรงกระบอกที่มีแกนร่วมกันมีค่าดังนี้

$$c = \frac{2\pi\varepsilon}{In(b/a)} \quad (13)$$

ค่าของสภาพยอม e ที่ใช้ควรเหมาะสมกับช่วงความถี่ที่ใช้จึงทำให้ความนำต่อหนึ่งหน่วยความยาวมีค่าดังนี้

$$G = \frac{2\pi\sigma}{In(b/a)} \quad (14)$$

เมื่อ σ เป็นสภาพนำของไดอิเล็กตริกที่อยู่ระหว่างตัวนำที่มีความถี่ที่กำลังใช้งาน

ความเหนี่ยนนำต่อหนึ่งหน่วยความยาวของสายเคเบิลที่มีแกนร่วมกันมีค่าดังนี้

$$L_{ext} = \frac{\mu}{2\pi} In(b/a) \quad (15)$$

เมื่อ μ เป็นสภาพให้ซึมได้ของไดอิเล็กตริกที่อยู่ระหว่างตัวนำ โดยทั่ว ๆ ไป μ มีค่าเท่ากับ μ_0

L_{ext} เป็นความเหนี่ยวนำภายนอก ซึ่งไม่เกี่ยวข้องกับฟลักซ์ภายในตัวนำทั้งสอง

สมการดังกล่าวเป็นการประมาณค่าที่ดีมากของความเหนี่ยวนำสำหรับสายส่งความถี่สูง เมื่อความลึกจากผิวมีค่าน้อย อาจทำให้ฟลักซ์ภายในตัวนำทั้งสองและความเหนี่ยวนำภายในได้

$$L_{ext}c = \mu\varepsilon = \frac{1}{v^2} \tag{16}$$

ดังนั้น จึงสามารถหาความเหนี่ยวนำภายนอกสำหรับสายส่งได้ ถ้าทราบความจุและลักษณะเฉพาะของฉนวน หรือทราบค่า μ และ ε ของฉนวน ความต้านทานต่อหนึ่งหน่วยความยาว R ถ้าความถี่มีค่าสูงมากและความลึกจากผิวมีค่าน้อยมาก จะได้ค่าสำหรับ R โดยการแจกแจงกระแสที่มีค่าสม่ำเสมอทั้งหมดโดยทั่วความลึก δ สำหรับตัวนำที่มีพื้นที่ภาคตัดขวางเป็นวงกลมรัศมี a และสภาพนำ σ_c จะได้

$$R_{inner} = \frac{1}{2\pi a\delta\sigma_c} \tag{17}$$

เมื่อ R_{inner} เป็นความต้านทานต่อหนึ่งหน่วยความยาวของตัวนำอันในซึ่งมีรัศมี a ส่วนตัวนำอันนอก ซึ่งมีรัศมีภายใน b สภาพนำ σ_c และความลึกจากผิว δ จะมีความต้านทานต่อหนึ่งหน่วยความยาวดังนี้

$$R_{outer} = \frac{1}{2\pi b\delta\sigma_c} \tag{18}$$

เนื่องจากเส้นทางการไหลของกระแสผ่านความต้านทานที่ต่ออนุกรม ความต้านทานทั้งหมดจึงมีค่า

$$R = R_{inner} + R_{outer} \tag{19}$$

$$R = \frac{1}{2\pi\delta\sigma_c\left(\frac{1}{a}+\frac{1}{b}\right)}$$

กรณีที่ R << ωL และ G << ωC จะได้ความต้านทานเชิงซ้อนสำหรับทรงกระบอกที่มีแกนร่วมกันดังนี้

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R+j\omega L_{ext}}{G+j\omega c}} = \sqrt{\frac{L_{ext}}{c}} \tag{20}$$

$$Z_0 = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}}In\left(\frac{b}{a}\right)$$

กรณีย่านความถี่ต่ำ

ที่ความถี่ต่ำ การแจกแจงกระแสจะสม่ำเสมอโดยทั่วภาคตัดขวาง การแจกแจงกระแสจะไม่มีผลต่อความจุหรือความนำต่อหนึ่งหน่วยความยาว จากสมการที่ (13) และ (14)

$$c = \frac{2\pi\varepsilon}{In(b/a)}$$

$$G = \frac{2\pi\sigma}{In(b/a)}$$

ความต้านทานต่อหนึ่งหน่วยความยาวอาจคำนวณได้โดยวิธีของกระแสตรง

$$R = \frac{L}{\sigma_c A} = \rho\frac{L}{A} \tag{21}$$

เมื่อ L = 1 เมตร σ_c เป็นสภาพนำของตัวนำในและตัวนำนอก และ A เป็นพื้นที่ภาคตัดขวางของตัวนำ ตัวนำในมีพื้นที่ภาคตัดขวาง

$$A_{inner} = \pi a^2 \tag{22}$$

ความต้านทานต่อหนึ่งหน่วยความยาวของตัวนำในมีค่า

$$R_{inner} = \frac{1}{\sigma_c\pi a^2} \tag{23}$$

ตัวนำนอกมีพื้นที่ภาคตัดขวาง

$$A_{outer} = \pi\left(c^2 - b^2\right) \tag{24}$$

ความต้านทานต่อหนึ่งหน่วยความยาวของตัวนำนอกมีค่า

$$R_{outer} = \frac{1}{\sigma_c \pi \left(c^2 - b^2\right)} \quad (25)$$

ดังนั้น ความต้านทานทั้งหมดต่อหนึ่งหน่วยความยาวมีค่าดังนี้

$$R = R_{inner} + R_{outer} \quad (26)$$

$$R = \frac{1}{\pi\sigma_c}\left(\frac{1}{a^2} + \frac{1}{c^2 - b^2}\right)$$

กรณีย่านความถี่ปานกลาง

ที่ความถี่ในช่วงที่ความลึกจากผิวไม่มากและไม่น้อยกว่ารัศมี ในกรณีนี้การแจกกจงกระแสถูกควบคุมโดยเบสเซลฟังก์ชัน (Bessel's Function) และทั้งความต้านทานและความเหนี่ยวนำภายในมีค่าซับซ้อน และจำเป็นต้องใช้ค่านี้สำหรับตัวนำที่มีขนาดเล็กมากที่ความถี่สูง และตัวนำที่มีขนาดใหญ่กว่าที่ใช้ในการส่งกำลังที่ความถี่ต่ำ

2. วิธีการดำเนินการวิจัย

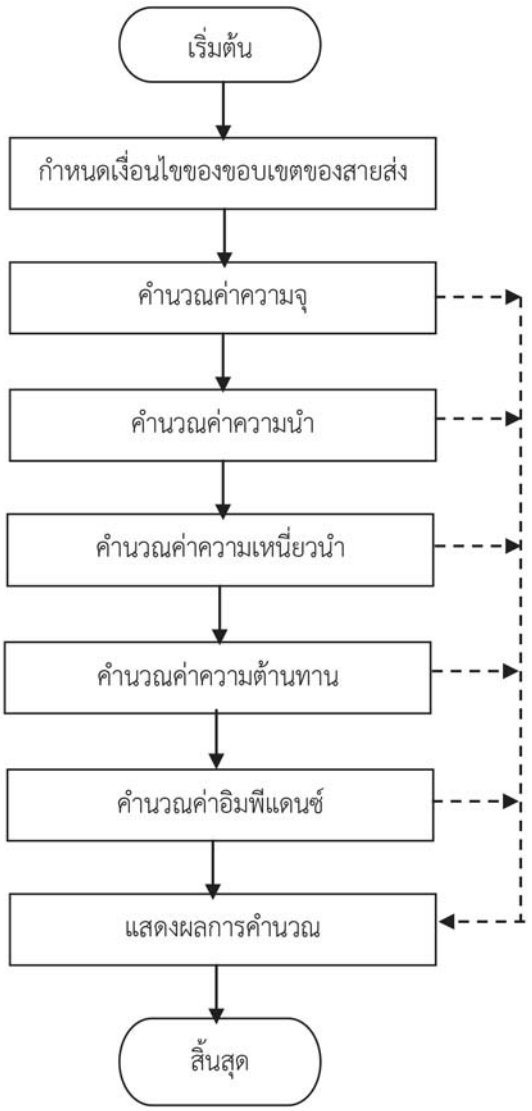
การวิจัยครั้งนี้เป็นการศึกษาความต้องการของระบบเกี่ยวกับพารามิเตอร์ของสายส่งสัญญาณตามประเภทการใช้งานและความถี่ จากนั้นได้กำหนดเงื่อนไขขอบเขตของสายส่งแต่ละประเภทเพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาโปรแกรมคำนวณ [4] ซึ่งมีวิธีดำเนินการวิจัยเป็น 5 ขั้นตอน ได้แก่ 1) ศึกษาและรวบรวมข้อมูล 2) ออกแบบโปรแกรม 3) พัฒนาโปรแกรม 4) ทดสอบโปรแกรมการทำงาน และ 5) ประเมินผลการใช้งานโปรแกรม ดังนี้

2.1 ศึกษาและรวบรวมข้อมูล

ขั้นตอนนี้ได้ทำการศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับสายส่งสัญญาณ จำนวน 3 สายส่งสัญญาณ ได้แก่ สายส่งสัญญาณแบบสองสาย สายส่งสัญญาณแบบระนาบคู่ และสายส่งสัญญาณแบบโคแอกซ์ ซึ่งแต่ละสายส่งสัญญาณจะมีการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของสายส่งสัญญาณไม่เหมือนกัน ดังนั้นการเลือกใช้งานของสายส่งสัญญาณจะขึ้นอยู่กับประเภทการใช้งานและความถี่ที่ต้องการ อีกทั้งยังศึกษาโปรแกรมที่ใช้ในการออกแบบและการวิเคราะห์ทางสถิติวิธีต่าง ๆ โดยการรวบรวมข้อมูลจากหนังสือ งานวิจัย และเอกสารต่าง ๆ เพื่อใช้เป็นแนวทางในการออกแบบ รวมถึงการศึกษาเครื่องมือในการพัฒนาโปรแกรมต่อไป

2.2 ออกแบบโปรแกรม

การออกแบบโปรแกรมนี้เป็นการออกแบบจากโปรแกรมที่สร้างขึ้นโดยใช้ฟังก์ชัน GUI ของโปรแกรม MATLAB เพื่อความสะดวกในการติดต่อกับผู้ใช้งาน โปรแกรมแบ่งการทำงานออกเป็น 3 ส่วนหลัก ๆ ได้แก่ ส่วนการคำนวณสายส่งสัญญาณสองสาย ส่วนการคำนวณสายส่งสัญญาณระนาบคู่ และส่วนการคำนวณสายส่งสัญญาณโคแอกซ์ ซึ่งในการคำนวณโปรแกรมแต่ละส่วนมีหลักการทำงานของโปรแกรม ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 หลักการทำงานของโปรแกรม

จากรูปที่ 4 การคำนวณโปรแกรมแต่ละส่วนมีหลักการทำงานของโปรแกรม แบ่งออกเป็น กำหนดเงื่อนไขของขอบเขตของสายส่ง คำนวณค่าความจุ คำนวณค่าความนำ คำนวณค่าความเหนี่ยวนำ คำนวณค่าความต้านทาน และคำนวณค่าอิมพีแดนซ์ ซึ่งการคำนวณทุกส่วนสามารถแสดงผลการคำนวณ

2.3 พัฒนาแบบโปรแกรม

การพัฒนาโปรแกรมคำนวณสายส่งสัญญาณตามประเภทการใช้งานและความถี่ แบ่งตามประเภทของการคำนวณ ได้ดังนี้

2.3.1 การคำนวณค่าพารามิเตอร์ของสายส่งสัญญาณแบบสองสาย

มีขั้นตอนการพัฒนาการคำนวณค่าพารามิเตอร์ของสายส่งสัญญาณแบบสองสาย เริ่มจากการเลือกย่านความถี่ใช้งาน จากนั้นป้อนค่าพารามิเตอร์ของสายส่ง ได้แก่ รัศมี (a) ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลาง (d) สภาพซึมซาบ (μ) สภาพยอม (ε) และสภาพนำ (σ) (σ_c) และความถี่ (f) เมื่อป้อนค่าต่าง ๆ โปรแกรมจะทำการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญของสายส่งสัญญาณแบบสองสาย เพื่อนำไปสร้างชิ้นงานจริงหรือนำไปประยุกต์ใช้งานต่อไป

2.3.2 การคำนวณค่าพารามิเตอร์ของสายส่งสัญญาณแบบระนาบคู่

มีขั้นตอนการพัฒนาการคำนวณค่าพารามิเตอร์ของสายส่งสัญญาณแบบระนาบคู่ เริ่มจากการเลือกย่านความถี่ใช้งาน จากนั้นป้อนค่าพารามิเตอร์ของสายส่ง ได้แก่ ความยาวของสาย (b) ระยะห่างระหว่างไดอิเล็กตริก (d) สภาพซึมซาบ (μ) สภาพยอม (ε) และสภาพนำ (σ), (σ_c) และความถี่ (f) เมื่อป้อนค่าต่าง ๆ โปรแกรมจะทำการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญของสายส่งสัญญาณแบบสองสาย เพื่อนำไปสร้างชิ้นงานจริงหรือนำไปประยุกต์ใช้งานต่อไป ซึ่งสมการคำนวณจะแตกต่างจากการคำนวณค่าพารามิเตอร์ของสายส่งสัญญาณแบบสองสาย

2.3.3 การคำนวณค่าพารามิเตอร์ของสายส่งสัญญาณแบบโคแอกซ์

มีขั้นตอนการพัฒนาการคำนวณค่าพารามิเตอร์ของสายส่งสัญญาณแบบโคแอกซ์เริ่มจากการเลือก

ย่านความถี่ใช้งาน จากนั้นป้อนค่าพารามิเตอร์ของสายส่ง ได้แก่ รัศมีของทรงกระบอกใน (a), รัศมีภายในของทรงกระบอกนอก (b), รัศมีภายนอกของทรงกระบอกนอก (c) สภาพซึมซาบ (μ) สภาพยอม (ε) และสภาพนำ (σ), (σ_c) และความถี่ (f) เมื่อป้อนค่าต่าง ๆ โปรแกรมจะทำการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญของสายส่งสัญญาณแบบโคแอกซ์ เพื่อนำไปสร้างชิ้นงานจริงหรือนำไปประยุกต์ใช้งานต่อไป

2.4 ทดสอบโปรแกรมการทำงาน

การพัฒนาโปรแกรมครั้งนี้ใช้การทดสอบหาประสิทธิภาพของโปรแกรม โดยวิธีการทดสอบแบบกล่องดำ (Black Box Testing) [5] เป็นการทดสอบฟังก์ชันการทำงานต่าง ๆ ของโปรแกรม เพื่อทดสอบความสมบูรณ์ของระบบโดยผู้เชี่ยวชาญและผู้ใช้งานจริง โดยกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของสายส่งสัญญาณเข้าไปในโปรแกรม แล้วให้โปรแกรมทำการประมวลผลและแสดงผลลัพธ์ จากนั้นนำผลลัพธ์ที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณด้วยตนเอง

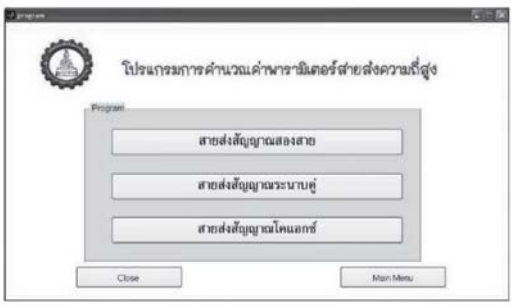
2.5 ประเมินผลการใช้งานโปรแกรม

การประเมินผลประสิทธิภาพของโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นในด้านต่าง ๆ โดยใช้แบบสอบถามเป็นเครื่องมือในการเก็บข้อมูลกับผู้เชี่ยวชาญจำนวน 5 คน และผู้ใช้งานจำนวน 20 คน ซึ่งมีการประเมินประสิทธิภาพแบ่งออกเป็น 3 ด้าน ได้แก่ ด้านความสามารถของโปรแกรมต่อความต้องการของผู้ใช้ ด้านความถูกต้องของโปรแกรม และด้านผลลัพธ์ที่ได้จากการพัฒนาโปรแกรม [6] ซึ่งเกณฑ์การประเมินประสิทธิภาพของโปรแกรมได้กำหนดเกณฑ์ตามวิธีของลิเคิร์ท (Likert) [7] โดยประกอบด้วยมาตราอันดับ (Rating Scale) เชิงคุณภาพ 5 ระดับ

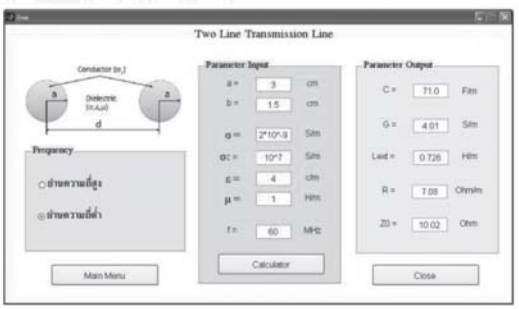
3. ผลการวิจัย

3.1 ผลที่ได้จากการพัฒนาโปรแกรม

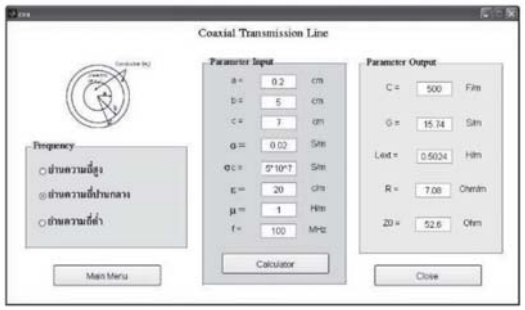
ผลการพัฒนาโปรแกรมสามารถคำนวณค่าพารามิเตอร์ของสายส่งในแต่ละประเภทตามการใช้งานและความถี่ โดยเลือกการคำนวณสายส่งสัญญาณได้ 3 สายส่งสัญญาณ ได้แก่ สายส่งสัญญาณแบบสองสาย สายส่งสัญญาณแบบระนาบคู่ และสายส่งสัญญาณแบบโคแอกซ์ จากนั้นการเลือกย่านความถี่ใช้งาน จากนั้นป้อนค่าพารามิเตอร์ของสายส่งสัญญาณ โปรแกรมจะทำการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญของสายส่งสัญญาณและแสดงผลลัพธ์การคำนวณทันที ดังรูปที่ 5 – รูปที่ 7



รูปที่ 5 หน้าจอแสดงการเลือกการคำนวณสายส่งสัญญาณแบบต่าง ๆ



รูปที่ 6 การคำนวณค่าพารามิเตอร์ของสายส่งสัญญาณแบบสองสาย



รูปที่ 7 การคำนวณค่าพารามิเตอร์ของสายส่งสัญญาณแบบโคแอกซ์

3.2 ผลการทดสอบโปรแกรม

3.2.1 ผลการทดสอบโปรแกรมจากผู้เชี่ยวชาญ

เป็นการทดสอบโปรแกรมจากผู้เชี่ยวชาญ จำนวน 5 คน ประกอบด้วย ผู้เชี่ยวชาญด้านคอมพิวเตอร์ จำนวน 2 คน และผู้เชี่ยวชาญด้านวิศวกรรมโทรคมนาคม จำนวน 3 คน ซึ่งการประเมินผลการทดสอบโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น พบว่า โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นมีประสิทธิภาพการทำงานอยู่ในระดับดีมาก ($\bar{x}\bar{x}$ = 4.04, S.D. = 0.36) เมื่อพิจารณาเป็นรายด้าน พบว่า ด้านที่มีค่าเฉลี่ยดีมากที่สุด ได้แก่ ด้านความถูกต้องของโปรแกรม ($\bar{x}\bar{x}$ = 4.30, S.D. = 0.53) รองลงมา ได้แก่ ด้านผลลัพธ์ที่ได้จากการพัฒนาโปรแกรม ($\bar{x}\bar{x}$ = 4.13, S.D. = 0.31) และด้านความสามารถของโปรแกรมต่อความต้องการของผู้ใช้ ($\bar{x}\bar{x}$ = 3.68, S.D. = 0.24) จึงสรุปได้ประสิทธิภาพการทำงานของโปรแกรมคำนวณสายส่งสัญญาณที่พัฒนาขึ้น สามารถนำไปใช้งานจริงได้ในการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ที่รวดเร็วยิ่งขึ้น และช่วยในการคำนวณการออกแบบสายส่งสัญญาณแต่ละประเภทได้อย่างแม่นยำ ดังตารางที่ 1

3.2.2 ผลการทดสอบโปรแกรมจากผู้ใช้งาน

เป็นการทดสอบโปรแกรมจากผู้ใช้งาน ได้แก่ นักศึกษาสาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร จำนวน 20 คน ซึ่งการประเมินผลการทดสอบโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น พบว่า โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นมีประสิทธิภาพการทำงานอยู่ในระดับดีมาก ($\bar{x}\bar{x}$ = 3.88, S.D. = 0.42) เมื่อพิจารณาเป็นรายด้าน พบว่า ด้านที่มีค่าเฉลี่ยดีมากที่สุด ได้แก่ ด้านผลลัพธ์ที่ได้จากการพัฒนาโปรแกรม ($\bar{x}\bar{x}$ = 3.96, S.D. = 0.31) รองลงมาได้แก่ ด้านความถูกต้องของโปรแกรม ($\bar{x}\bar{x}$ = 3.90, S.D. = 0.71) และด้านความสามารถของโปรแกรมต่อความต้องการของผู้ใช้ ($\bar{x}\bar{x}$ = 3.79, S.D. = 0.42) จึงสรุปได้ว่าประสิทธิภาพการทำงานของโปรแกรมคำนวณสายส่งสัญญาณที่พัฒนาขึ้น สามารถนำไปใช้งานจริงได้ ดังตารางที่ 2

3.2.3 เปรียบเทียบผลการคำนวณจากโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นกับผลการคำนวณทางทฤษฎี

กรณีผลการคำนวณค่าพารามิเตอร์ของสายส่งสัญญาณแบบสองสาย ที่ย่านความถี่ต่ำ f = 60 Hz กำหนดให้ สายส่งที่มีตัวนำขนาดเท่ากันสองสายมีรัศมี a = 3 cm สภาพนำ σc = 107 S/m โดยมีระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลาง b = 1.5 cm อยู่ในตัวกลางที่มีสภาพให้ซึมซาบได้ μ = 1 H/m สภาพยอม ε = 4 c/m และสภาพนำ σ = 2x10-9 S/m ผลจากการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์จากโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นกับการคำนวณด้วยตนเอง พบว่า มีผลการคำนวณที่ตรงกัน จึงแสดงให้เห็นว่า โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นสามารถนำไปใช้แทนการคำนวณด้วยมือได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 1 ผลการประเมินประสิทธิภาพของโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นจากผู้เชี่ยวชาญ

รายการประเมิน	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	แปลผล
ด้านความสามารถของโปรแกรมต่อความต้องการของผู้ใช้	3.68	0.24	ดีมาก
ด้านความถูกต้องของโปรแกรม	4.30	0.53	ดีมาก
ด้านผลลัพธ์ที่ได้จากการพัฒนาโปรแกรม	4.13	0.31	ดีมาก
เฉลี่ยภาพรวม	**4.04**	**0.36**	**ดีมาก**

ตารางที่ 2 ผลการประเมินประสิทธิภาพของโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นจากผู้ใช้งาน

รายการประเมิน	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	แปลผล
ด้านความสามารถของโปรแกรมต่อความต้องการของผู้ใช้	3.79	0.42	ดีมาก
ด้านความถูกต้องของโปรแกรม	3.90	0.71	ดีมาก
ด้านผลลัพธ์ที่ได้จากการพัฒนาโปรแกรม	3.96	0.31	ดีมาก
เฉลี่ยภาพรวม	**3.88**	**0.48**	**ดีมาก**

ตารางที่ 3 ผลการเปรียบเทียบระหว่างผลการคำนวณจากโปรแกรมกับการคำนวณทางทฤษฎีกรณีสายส่งสัญญาณแบบสองสาย

ค่าพารามิเตอร์	ผลการคำนวณจากโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น	ผลการคำนวณด้วยตนเอง	ผลการเปรียบเทียบ
ค่าความจุ (C)	71.00 F/m	71.05 F/m	ตรงกัน
ค่าความนำ (G)	4.01 S/m	3.99 S/m	ตรงกัน
ค่าความเหนี่ยวนำ (Lext)	0.72 H/m	0.71 H/m	ตรงกัน
ค่าความต้านทาน (R)	7.08 Ohm/m	7.07 Ohm/m	ตรงกัน
ค่าอิมพีแดนซ์ (Z0)	10.02 Ohm	10.00 Ohm	ตรงกัน

4. สรุป

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาโปรแกรมคำนวณสายส่งสัญญาณตามประเภทการใช้งานและความถี่ เพื่อให้ผู้ที่ต้องการสร้างเสาอากาศสามารถเลือกใช้สายส่งสัญญาณและมีคุณสมบัติเหมาะสมตามประเภทการใช้งาน ซึ่งโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นได้พัฒนามาจากโปรแกรม Matlab ที่สามารถส่วนติดต่อกับผู้ใช้งานได้อย่างสะดวก จากการประเมิน ผลโปรแกรมในด้านต่าง ๆ ได้แก่ ด้านความสามารถในการทำงานตามความต้องการของผู้ใช้ ด้านความถูกต้องของระบบ และด้านการใช้งานของระบบด้วยวิธี Black Box Testing โดยผู้เชี่ยวชาญพบว่า โปรแกรมที่พัฒนา ขึ้นมีประสิทธิภาพอยู่ในระดับมากสามารถคำนวณได้อย่างถูกต้องและรวดเร็ว สอดคล้องกับการประเมินโปรแกรมโดยผู้ใช้งานที่ประเมินประสิทธิภาพอยู่ในระดับมากเช่นเดียวกัน จึงสรุปได้ว่าความสามารถของโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น สามารถตอบสนองต่อความต้องการของผู้ใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ สอดคล้องกับงานวิจัยที่รุ่งอรุณ พรเจริญ [8] ได้พัฒนาโปรแกรมจำลองการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญของสาย

อากาศสำหรับประยุกต์ใช้ในการเรียนการสอนด้านวิศวกรรมโทรคมนาคมทำให้สะดวกในการคำนวณเพื่อนำไปสร้างสายอากาศได้ง่ายขึ้น และงานวิจัยของสมมารถ ขำเกลี้ยง [9] ที่นำเอาโปรแกรม Matlab ในฟังก์ชัน GUI มาพัฒนาโปรแกรมเพื่อช่วยวิเคราะห์และจำลองแบบแผนสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่สามารถใช้เป็นสื่อการสอนและเสริมจินตนาการของผู้เรียนตรงตามความต้องการของผู้ใช้งาน ดังนั้นการพัฒนาโปรแกรมคำนวณสายส่งสัญญาณตามประเภทการใช้งานและความถี่จึงเป็นไปตามจุดมุ่งหมายของงานวิจัยในครั้งนี้ สามารถคำนวณและออกแบบสายส่งสัญญาณได้อย่างมีประสิทธิภาพถูกต้อง แม่นยำ สะดวกและรวดเร็วมากยิ่งขึ้น

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ที่ให้การสนับสนุนทุนอุดหนุนการวิจัยมา ณ ที่นี้

6. เอกสารอ้างอิง

[1] S. Khamkleang and S. Akatimagool, "Microwave planner circuit design tool in the teaching of microwave engineering," in *Proceeding of 6th Electrical Engineering/ Electronics, Computer, in Telecommunication and Information Technology (ECTI-CON), Chonburi, Thailand,* 2009, pp. 830-833.

[2] S. Akatimagool, *Microwave circuit analysis and design*, 1st ed. Bangkok: King Mongkut's University of Technology North Bangkok, 2008.

[3] Q. Sui, L. Zhang and H. Jia, "Interactive Matlab Programs for Impedance Matching Teaching in Microwave Engineering," in *Proceeding of Computational Intelligence and Software Engineering (CiSE), Wuhan, China,* 2009, pp. 1-4.

[4] O. Iam-siriwong, *System analysis and design*, 1st ed. Bangkok: Se-education, 2005.

[5] M.E. Khan and F. Khan, "A comparative study of white box, black box and grey box testing techniques," *International Journal of Advanced Computer Science and Applications (IJACSA)*, vol. 3, no. 6, pp. 12-15. 2012.

[6] S. Nidhra and J. Dondetj, "Black box and white box testing techniques – A literature review," *International Journal of Embedded Systems and Applications (IJESA)*, vol. 2, no. 2, pp. 29-50, June 2012.

[7] H.N. Boone and D.A. Boone, "Analyzing likert data," *Journal of Extension*, vol 50, no. 2, pp. 1-5, April 2012.

[8] R. Porncharoen, "Using graphical user interface of MATLAB in teaching telecommunication engineering," in *Proceeding of 2016 International Conference on Education, Psychology, and Learning – Fall Session (ICEPL 2016-Fall),* Hanyang University, Korea, 2016, pp. 155–160.

[9] S. Khamkleang, "$WGDP_{TETM}$: Simulation program of transverse electric (TE) and magnetic (TM) mode in rectangular waveguides using GUI of MATLAB," in *Proceeding of 8th National Conference on Technical Education*, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Thailand, 2015, pp. 31-36.