การส่งผ่านคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยม
RECTANGULAR WAVEGUIDE FOR ELECTROMAGNETIC WAVE

โครงงานพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2559

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การส่งผ่านคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยม

RECTANGULAR WAVEGUIDE FOR ELECTROMAGNETIC WAVE

T149499

ณัชชา วัจนะรัตน์

หมู่.....
เลขทะเบียน.....149499
วัน,เดือน,ปี.....- 8 ธ.ค. 2561

b.12884258
i.....

โครงงานพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

RECTANGULAR WAVEGUIDE FOR ELECTROMAGNETIC WAVE

NATCHA WATJANARUT

A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR
THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE (APPILED PHYSICS)
DEPARTMENT OF PHYSICS, FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2016

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงงานพิเศษ	การส่งผ่านคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยม Rectangular Waveguide for Electromagnetic Wave
ชื่อนักศึกษา	นางสาวณัชชา วัจนะรัตน์ รหัสนักศึกษา 56051132
ปริญญา	วิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชา	ฟิสิกส์
ปีการศึกษา	2559
อาจารย์ที่ปรึกษา	อ.สุรชาติ กมลดิลก

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) **อนุมัติให้**โครงงานพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต(ฟิสิกส์ประยุกต์) ประจำปีการศึกษา 2559

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.ประธาน บุรณศิริ ประธานกรรมการ	
ดร.วิฑูรย์ ยินดีสุข กรรมการ	
อ.ธรรมรัตน์ แต่งตั้ง กรรมการ	
อ.สุรชาติ กมลดิลก อาจารย์ที่ปรึกษา	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงงานพิเศษ การส่งผ่านคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยม
ชื่อนักศึกษา นางสาวณัชชา วัจนะรัตน์ รหัสนักศึกษา 56051132
ปริญญา วิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชา ฟิสิกส์
คณะ วิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)
ปีการศึกษา 2559
อาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์สุรชาติ กมลดิลก

บทคัดย่อ

โครงงานพิเศษนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการส่งผ่านคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยม และสร้างแบบจำลองของการส่งผ่านคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยม โหมด TE_{01} - TE_{33} ด้วยโปรแกรมแมทแลบ รุ่น R2016a โดยใช้ GUIDE ของแมทแลบในการสร้างส่วนติดต่อกับผู้ใช้งาน (Graphic User Interface) หรือ GUI และใช้เอ็มไฟล์ในการเขียนอัลกอริทึมเพื่อเป็นส่วนประมวลผล ผลการทดลองพบว่า โปรแกรมที่พัฒนาสามารถคำนวณค่าความถี่ตัดและความยาวคลื่นตัด และสามารถจำลองแบบแผนสนามไฟฟ้าตามขวาง นอกจากนั้นยังพบว่าผลการคำนวณของโปรแกรมมีความถูกต้องตรงตามผลทางทฤษฎี

คำสำคัญ : จียูไอ ท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยม แมทแลบ สนามแม่ไฟฟ้าตามขวาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Title	Rectangular Waveguide for Electromagnetic Wave
Students	Miss Natcha Watjanarut Student ID 56051132
Degree	Bachelor of Science (Applied Physics)
Department	Physics
Faculty	Science
University	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)
Academic Year	2016
Advisor	Surachart Kamoldilok

Abstract

This special project aims to study rectangular waveguide for electromagnetic wave and simulate transverse electric (TE) modes: TE_{01} mode - TE_{33} mode for rectangular waveguide by using MATLAB version R2016a in designing graphic user interface (GUI) screen with GUIDE and writing algorithm code in function M-file to analyze the parameters. The simulation result found that the program has the ability to calculate cut-off frequency and cut-off wavelength, and simulate transverse electric mode. Moreover, the results of the calculations are accurate according to the result of theoretical calculations.

Keywords : GUI, Rectangular Waveguide, MATLAB, Transverse Electric (TE)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงงานพิเศษฉบับนี้สำเร็จลุลวงได้ด้วยดีเนื่องจากได้รับความกรุณาอย่างสูงจาก อาจารย์สุรชาติ กมลดลก อาจารย์ที่ปรึกาโครงงานพิเศษที่ได้ให้ความช่วยเหลือให้คำแนะนำและตรวจสอบแก้ไขการดำเนินการจัดโครงงานพิเศษ ผู้จัดทำมีความซาบซึ้งและเป็นพระคุณเป็นอย่างสูง ณ โอกาสนี้

ขอบพระคุณอาจารย์ในสาขาฟิสิกส์ทุกท่านที่ได้กรุณาให้ความรู้ ให้คำแนะนำ และให้ความคิดเห็นเป็นอย่างดีเสมอมา ทำให้ได้ข้อมูลครบถ้วนในงานวิจัยครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ บิดา-มารดา ที่ให้ได้รับการศึกษา ตลอดจนคอยเลี้ยงดูและอบรมสั่งสอน และเป็นกำลังใจและแรงผลักดันในการทำโครงงานพิเศษให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี รวมถึงเพื่อนๆ และบุคคลอื่นๆ ที่ไม่ได้กล่าวมา ผู้จัดทำโครงงานขอขอบคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้

ณัชชา วัจนะรัตน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญ (ต่อ)	จ
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 ท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยม	3
2.2.1 การสร้างสมการ	3
2.2.2 คลื่นสนามแม่เหล็กตามขวางในท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยม (TM Mode)	8
2.2.3 คลื่นสนามไฟฟ้าตามขวางในท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยม (TE Mode)	13
2.2.4 ลักษณะสมบัติของท่อนำคลื่น	21
2.2 โปรแกรม MATLAB	25
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	28
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	
3.1 การวิเคราะห์ปัญหา	29
3.2 การศึกษาการส่งผ่านคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยม	29
3.3 การพัฒนาส่วนติดต่อกับผู้ใช้ด้วยโปรแกรม MATLAB (MATLAB Graphic User Interface; MATLAB GUI)	31
3.4 การออกแบบสร้างโปรแกรม	32
3.5 ขั้นตอนการสร้างโปรแกรม	34
3.6 การพัฒนาโปรแกรม	37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

4.1 ผลการพัฒนาโปรแกรม 42

4.2 ผลการคำนวณค่าความถี่ตัด 43

4.3 ผลการจำลองของการส่งผ่านคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยม โหมด TE_{01} - TE_{33} 44

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย 52

5.2 ข้อเสนอแนะ 52

เอกสารอ้างอิง 54

ภาคผนวก 55

ภาคผนวก ก โค้ดโปรแกรม M-file ต่างๆ 56

1. M-file ของหน้าต่าง GUI 57

2. M-file ของฟังก์ชันที่ใช้จำลองคลื่นในท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยม โหมด TE_{01} - TE_{33} 64

3. M-file ของฟังก์ชันที่ใช้หาค่า m และ n 71

4. M-file ของฟังก์ชันที่ใช้จัดหน้ากราฟ 72

ภาคผนวก ข คุณสมบัติของท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยมมาตรฐาน 73

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

3.1 องค์ประกอบของโปรแกรม 36

4.1 ค่าความถี่ตัดที่ได้จากโปรแกรมเปรียบเทียบกับค่าความถี่ตัดของท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยมมาตรฐานขนาดต่างๆ 43

6.1 ค่าความถี่ตัดของท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยมมาตรฐานขนาดต่างๆ 72

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 สนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าสำหรับโหมดต่างๆ ภายในท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยม	20
3.1 หน้าต่าง MATLAB GUIDE สำหรับสร้าง GUI	32
3.2 การออกแบบ User Interface ของโปรแกรม	32
3.3 หน้าต่างโปรแกรม MATLAB	34
3.4 การเรียกใช้งานโปรแกรม MATLAB GUIDE	34
3.5 หน้าต่างการออกแบบ GUI	35
3.6 ตำแหน่งแต่ละองค์ประกอบของโปรแกรม	36
4.1 โปรแกรมสำหรับจำลองคลื่นในท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยม โหมด TE_{01} – TE_{33}	42
4.2 คลื่นโหมด TE_{10}	45
4.3 คลื่นโหมด TE_{01}	45
4.4 คลื่นโหมด TE_{11}	45
4.5 คลื่นโหมด TE_{12}	46
4.6 คลื่นโหมด TE_{20}	46
4.7 คลื่นโหมด TE_{02}	46
4.8 คลื่นโหมด TE_{21}	47
4.9 คลื่นโหมด TE_{22}	47
4.10 คลื่นโหมด TE_{30}	47
4.11 คลื่นโหมด TE_{03}	48
4.12 คลื่นโหมด TE_{31}	48
4.13 คลื่นโหมด TE_{13}	48
4.14 คลื่นโหมด TE_{32}	49
4.15 คลื่นโหมด TE_{23}	49
4.16 คลื่นโหมด TE_{33}	49
4.17 คลื่นโหมดต่างๆ ในระนาบ xy	50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ท่อนำคลื่น (Waveguide) เป็นทางเลือกที่มีประสิทธิภาพที่สุดในการถ่ายโอนพลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ในปัจจุบันท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมถูกนำมาประยุกต์ใช้ในหลายด้าน เช่น ระบบการสื่อสาร เรดาร์ ชีวการแพทย์ เป็นต้น การสร้างแบบจำลองเพื่อศึกษาคุณสมบัติต่างๆ ของท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยมจึงมีความจำเป็นอย่างมากต่อการออกแบบและการสร้างท่อนำคลื่น

การวิเคราะห์ท่อนำคลื่นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ไม่มีการสูญเสียจะประยุกต์ใช้สมการของแมกซ์เวลกับเงื่อนไขขอบที่เหมาะสมเพื่อให้ได้รับแบบแผนคลื่นของการแพร่กระจายคลื่น (mode of wave propagation) ที่แตกต่างกันออกไป และเพื่อให้ได้รับสนามไฟฟ้า (E) และสนามแม่เหล็ก(H) จะเริ่มต้นด้วยการวิเคราะห์พฤติกรรมทั่วไปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในท่อนำคลื่นสม่ำเสมอที่มีภาคตัดขวางใดๆจุดเริ่มต้นจะเป็นสมการของเฮล์มโฮลตซ์เวกเตอร์ของ E และ H พบว่านอกจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าตามขวาง (TEM) ที่ไม่มีส่วนประกอบของสนามในทิศทางการแพร่กระจายคลื่นแล้ว ยังจะมีคลื่นแม่เหล็กตามขวาง (TM) ที่มีส่วนประกอบสนามไฟฟ้าตามยาว และคลื่นไฟฟ้าตามขวาง (TE) ที่มีส่วนสนามแม่เหล็กตามยาวเกิดขึ้น

คลื่นแม่เหล็กตามขวาง (Transverse Magnetic Wave; TM) จะไม่มีส่วนประกอบของสนามแม่เหล็กในทิศทางการแพร่กระจาย ($H_z = 0$) พฤติกรรมของคลื่น TM สามารถวิเคราะห์ได้โดยการแก้สมการเพื่อหาค่า E_z ภายใต้เงื่อนไขขอบของการนำทาง และค่า E_x, E_y, H_x, H_y ตามลำดับ ส่วนคลื่นไฟฟ้าตามขวาง (Transverse Electric Wave; TE) จะไม่มีส่วนประกอบของสนามไฟฟ้าในทิศทางการแพร่กระจาย ($E_z = 0$) พฤติกรรมของคลื่น TE สามารถวิเคราะห์ได้โดยการแก้สมการเพื่อหาค่า H_z, H_x, H_y และค่า E_x, E_y ตามลำดับ

การคำนวณหาค่าต่างๆ อาจจะเกิดความผิดพลาด อีกทั้งยังจำเป็นต้องใช้ระยะเวลาเป็นอย่างมาก เนื่องจากมีตัวแปรหลายตัวและสมการมีความยุ่งยากซับซ้อน การแก้ปัญหาวิธีการหนึ่งในปัจจุบันคือการคำนวณโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ต่างๆ เช่น ไมโครซอฟต์เอ็กเซล (Microsoft Excel) แมทแลป (Matlab), Visual C# เป็นต้น โปรแกรมที่นิยมนำมาใช้สำหรับวิเคราะห์งานทางด้านวิศวกรรมสนามแม่เหล็กไฟฟ้าได้แก่โปรแกรมแมทแลป เนื่องจากใช้งานง่าย มีความสะดวกในการพัฒนาเป็นโปรแกรมประยุกต์

ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยจึงสร้างแบบจำลองของการส่งผ่านคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยมโหมด TE_{01} – TE_{33} โดยใช้โปรแกรม MATLAB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1) เพื่อศึกษาการส่งผ่านคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยม
2) เพื่อสร้างแบบจำลองของการส่งผ่านคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยม โหมด TE_{01} – TE_{33} โดยใช้โปรแกรม MATLAB

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

สร้างแบบจำลองของการส่งผ่านคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยม โหมด TE_{01} - TE_{33} โดยใช้โปรแกรม MATLAB รุ่น R2016a

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1) มีความรู้ความเข้าใจในหลักการการส่งผ่านคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยม
2) มีทักษะในการใช้โปรแกรม MATLAB เพื่อสร้างแบบจำลองแบบแผนของการส่งผ่านคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการศึกษาการส่งผ่านคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยม ผู้จัดทำแบ่งหัวข้อในการค้นคว้าทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องออกเป็นดังนี้

2.1 ท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยม

2.2 โปรแกรม MATLAB

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยม

2.2.1 การสร้างสมการ

การวิเคราะห์คุณสมบัติของท่อนำคลื่นจะวิเคราะห์ โดยใช้ทฤษฎีสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะให้ผลได้ตรงที่สุด ขั้นตอนในการวิเคราะห์มี 3 ขั้นตอน คือ

1. การสร้างสมการคลื่น
2. การแก้สมการคลื่นเพื่อหาผลเฉลยทั่วไป
3. การหาสมการคลื่นที่เดินทางในท่อนำคลื่นจากผลเฉลยทั่วไป (การหาผลเฉลยเฉพาะ)

สัญลักษณ์พื้นฐานต่างๆ และความหมายที่ควรทราบ

$\vec{E}$ ความเข้มสนามไฟฟ้า (V/m)

$\vec{D}$ ความหนาแน่นของเส้นแรงไฟฟ้า (C/m^2)

Ψ เส้นแรงไฟฟ้า (C)

$\vec{H}$ ความเข้มสนามแม่เหล็ก

$\vec{B}$ ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก (T หรือ Wb/m^2)

ϕ เส้นแรงแม่เหล็ก (Wb)

$\vec{J}$ ความหนาแน่นกระแส (A/m^2)

σ สภาพนำไฟฟ้า (S)

จากองค์ประกอบของสนามไฟฟ้าในทิศทางต่างๆ จะเขียนแสดงได้โดย

$$\vec{E}(x,y,z,t) = E_x(x,y,z,t)\vec{a}_x + E_y(x,y,z,t)\vec{a}_y + E_z(x,y,z,t)\vec{a}_z$$

การแสดงค่าของสนามไฟฟ้า (Electric Field; E) และสนามแม่เหล็ก (Magnetic Field; M) นั้นจะเป็นค่าชั่วขณะที่ตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่ง และที่เวลาในเวลาหนึ่ง ค่า E และ H จะเป็นฟังก์ชันของตำแหน่ง (x, y, z) และเวลา (t) ในการแสดงค่า E และ H นั้น ก็ยังสามารถแสดงให้อยู่ในรูป

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ห้ามมิให้ทำซ้ำ ดัดแปลง หรือนำไปใช้ในการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปของเฟสเซอร์ได้เช่นเดียวกัน คือ การเปลี่ยนแปลงของสนามตามเวลาจะแสดงได้ด้วยตัวประกอบร่วม $e^{j\omega t}$ ส่วน E และ H ส่วนที่เหลือก็จะเป็นฟังก์ชันของตำแหน่งอย่างเดียวกัน ซึ่งเขียนได้เป็น

$$\vec{E}(x,y,z,t) = E(x,y,z) \cdot e^{j\omega t}$$

ถ้าสนามมีเฉพาะองค์ประกอบทิศทางแนวแกน x จะได้

$$\vec{E}(x,y,z,t) = E_x(x,y,z,t)\vec{a}_x$$

หรือเขียนเป็นแบบทั่วไปได้เป็น $\vec{E} = E_x\vec{a}_x$ โดยที่

$$E_x = E_m(x,y,z)\cos(\omega t) = Re\{E_x(x,y,z) \cdot e^{j\omega t}\}$$

$$E_x = E_m(x,y,z) \cdot e^{j\omega t}$$

$$e^{j\omega t} = \cos\omega t + j\sin\omega t$$

$$E_x = E_m(x,y,z)(\cos\omega t + j\sin\omega t)$$

$$E_x = E_m(x,y,z)\cos\omega t + jE_m(x,y,z)\sin\omega t$$

และสำหรับองค์ประกอบของสนามนั้น ถ้าจะสมมุติให้ทุกองค์ประกอบของสนามมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงตามเวลาด้วยตัวประกอบ $e^{j\omega t}$ และมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงตามระยะทางในทิศทางการเคลื่อนที่ด้วยตัวประกอบ $e^{-\gamma z}$ เมื่อมีทิศทางการเคลื่อนที่ไปในแนวแกน z และ γ คือค่าคงที่ของการแพร่กระจายคลื่นของตัวกลาง (Propagation Constant) ดังนั้นจึงสามารถเขียนองค์ประกอบของสนามต่างๆ ได้ ดังเช่น

$$E_x = E_m(x,y) \cdot e^{-\gamma z} \cdot e^{j\omega t}$$

$$E_x = E_m(x,y) \cdot e^{j\omega t - \gamma z}$$

จากสมการข้างบน สามารถดิฟเฟอเรนเชียลองค์ประกอบของสนามต่อได้เป็น

$$\frac{\partial E_x}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t}E_m(x,y) \cdot e^{j\omega t - \gamma z}$$

$$\frac{\partial E_x}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t}E_m(x,y) \cdot e^{j\omega t - \gamma z} \cdot (j\omega)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} = j\omega$$

และสามารถดิฟเฟอเรนเชียลองค์ประกอบของสนามต่อต่อระยะทางในทิศทางการเคลื่อนที่ได้เป็น

$$\frac{\partial E_x}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z}E_m(x,y) \cdot e^{j\omega t - \gamma z}$$

$$\frac{\partial E_x}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z}E_m(x,y) \cdot e^{j\omega t - \gamma z} \cdot (-\gamma)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{\partial}{\partial z} = -\gamma$$

สมการของสนามภายในท่อนำคลื่นนั้นจะเริ่มต้นสร้างสมการคลื่นจากสมกาของแมกซ์-เวลล์ ซึ่งมี 4 สมการ แต่ที่ใช้ในการสร้างสมการคลื่นมี 2 สมการ คือ

$$\vec{\nabla}\times\vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (1)$$

จากสมการแสดงให้เห็นว สนามไฟฟ้า E เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็ก B ตามเวลา t

$$\vec{\nabla}\times\vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$$

จากสมการแสดงให้เห็นว่า สนามแม่เหล็ก (H) เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นของกระแส (J) หรือการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้า (E) ตามเวลา (t) หรือทั้งสองกรณี

และจาก $\vec{D} = \varepsilon\vec{E}$ จะได้

$$\vec{\nabla}\times\vec{H} = \vec{J} + \varepsilon\frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (2)$$

ในการวิเคราะห์สมการของสนามภายในท่อนำคลื่นนั้น จะพิจารณาว่ารูปหน้าตัดของท่อนำคลื่นมีค่าเท่ากันตลอดความยาวของท่อนำคลื่นที่มีความยาวเป็นอนันต์ โดยมีผนังท่อเป็นตัวนำที่สมบูรณ์แบบ และภายในท่อนำคลื่นคือตัวกลาง ซึ่งเป็นฉนวน (dielectric) ที่ไม่มีการสูญเสีย กล่าวคือ มีค่า $\sigma = 0$

จาก $\vec{J} = \sigma\vec{E}$ และ $\sigma = 0$ จะได้

$$\vec{J} = 0$$

แทนค่า $\vec{J}$ ลงในสมการที่ (2) จะได้

$$\vec{\nabla}\times\vec{H} = \varepsilon\frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (3)$$

จาก $\vec{B} = \mu\vec{H}$ แทนค่าลงในสมการที่ (1) จะได้สมการใหม่ คือ

$$\vec{\nabla}\times\vec{E} = -\mu\frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \quad (4)$$

จากสมการที่ (4) เมื่อทำการเคิร์ลสนามของแต่ละองค์ประกอบ จะได้

$$\vec{\nabla}\times\vec{E} = \left(\frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z}\right)\vec{a}_x + \left(\frac{\partial E_x}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial x}\right)\vec{a}_y + \left(\frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y}\right)\vec{a}_z$$

$$-\mu\frac{\partial \vec{H}}{\partial t} = -\mu\frac{\partial}{\partial t}\left(H_x\vec{a}_x + H_y\vec{a}_y + H_z\vec{a}_z\right)$$

$$= -\mu\frac{\partial}{\partial t}H_x\vec{a}_x - \mu\frac{\partial}{\partial t}H_y\vec{a}_y - \mu\frac{\partial}{\partial t}H_z\vec{a}_z$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อเทียบสัมประสิทธิ์ของผลการเคิร์ลสมการที่ (4) จะได้

$$\frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z} = -\mu \frac{\partial}{\partial t} H_x \tag{5}$$

$$\frac{\partial E_x}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial x} = -\mu \frac{\partial}{\partial t} H_y \tag{6}$$

$$\frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y} = -\mu \frac{\partial}{\partial t} H_z \tag{7}$$

จากสมการที่ (3) ทำการเคิร์ล และเทียบสัมประสิทธิ์เช่นเดียวกันกับสมการที่ (4) จะได้

$$\frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} = \varepsilon \frac{\partial E_x}{\partial t} \tag{8}$$

$$\frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} = \varepsilon \frac{\partial E_y}{\partial t} \tag{9}$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} = \varepsilon \frac{\partial E_z}{\partial t} \tag{10}$$

แทนค่า $\partial/\partial t = j\omega$ และ $\partial/\partial z = -\gamma$ ลงในสมการที่ (6) ถึง (10) จะได้สมการใหม่ ดังนี้

$$\frac{\partial E_z}{\partial y} + \gamma E_y = -\mu j\omega H_x \tag{11}$$

$$\gamma E_x + \frac{\partial E_z}{\partial x} = \mu j\omega H_y \tag{12}$$

$$\frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y} = -\mu j\omega H_z \tag{13}$$

$$\frac{\partial H_z}{\partial y} + \gamma H_y = \varepsilon j\omega E_x \tag{14}$$

$$-\gamma H_x - \frac{\partial H_z}{\partial x} = \varepsilon j\omega E_y \tag{15}$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} = \varepsilon j\omega E_z \tag{16}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการที่ (13) และ (16) ต้องเขียนให้อยู่ในเทอมของสนามในทิศทางของการแพร่กระจายคลื่น (ทิศทางตามแนวแกน z) โดยกระทำดังนี้

จากสมการที่ (14) จัดรูปสมการใหม่ได้เป็น

$$H_y = \frac{1}{\gamma}\left(j\omega\varepsilon E_x - \frac{\partial H_z}{\partial y}\right) \tag{17}$$

โดยแทนสมการที่ (17) ลงในสมการที่ (12) จะได้

$$\gamma E_x + \frac{\partial E_z}{\partial x} = j\omega\mu\left\{\frac{1}{\gamma}\left(j\omega\varepsilon E_x - \frac{\partial H_z}{\partial y}\right)\right\}$$

นำ γ คูณตลอดสมการ จะได้

$$\gamma^2 E_x + \gamma\frac{\partial E_z}{\partial x} = -\omega^2\varepsilon\mu E_x - j\omega\mu\frac{\partial H_z}{\partial y}$$

$$\gamma^2 E_x + \omega^2\varepsilon\mu E_x = -\gamma\frac{\partial E_z}{\partial x} - j\omega\mu\frac{\partial H_z}{\partial y}$$

$$E_x(\gamma^2 + \omega^2\varepsilon\mu) = -\gamma\frac{\partial E_z}{\partial x} - j\omega\mu\frac{\partial H_z}{\partial y}$$

โดยที่ $k = \sqrt{\omega^2\varepsilon\mu + \gamma^2}$ จะได้

$$E_x = -\frac{1}{k^2}\left(\gamma\frac{\partial E_z}{\partial x} + j\omega\mu\frac{\partial H_z}{\partial y}\right) \tag{18}$$

และสามารถแก้สมการหาค่า E_y, H_x และ H_y ได้ในลักษณะเดียวกันคือ

$$E_y = \frac{1}{k^2}\left(-\gamma\frac{\partial E_z}{\partial y} + j\omega\mu\frac{\partial H_z}{\partial x}\right) \tag{19}$$

$$H_x = \frac{1}{k^2}\left(-\gamma\frac{\partial H_z}{\partial x} + j\omega\varepsilon\frac{\partial E_z}{\partial y}\right) \tag{20}$$

$$H_y = -\frac{1}{k^2}\left(\gamma\frac{\partial H_z}{\partial y} + j\omega\varepsilon\frac{\partial E_z}{\partial x}\right) \tag{21}$$

แทนค่าสมการที่ (18) และ (19) ลงในสมการที่ (13) จะได้

$$-j\omega\mu H_z = \frac{\partial}{\partial x}\left\{\frac{1}{k^2}\left(-\gamma\frac{\partial E_z}{\partial y} + j\omega\mu\frac{\partial H_z}{\partial x}\right)\right\} - \frac{\partial}{\partial y}\left\{-\frac{1}{k^2}\left(\gamma\frac{\partial E_z}{\partial x} + j\omega\mu\frac{\partial H_z}{\partial y}\right)\right\}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$-j\omega\mu H_z = -\frac{\gamma}{k^2}\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\partial E_z}{\partial y}\right) + \frac{j\omega\mu}{k^2}\frac{\partial^2 H_z}{\partial x^2} + \frac{j\omega\mu}{k^2}\frac{\partial^2 H_z}{\partial y^2} + \frac{\gamma}{k^2}\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{\partial E_z}{\partial x}\right)$$

$$-j\omega\mu H_z = \frac{j\omega\mu}{k^2}\left(\frac{\partial^2 H_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H_z}{\partial y^2}\right)$$

$$\left(\frac{\partial^2 H_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H_z}{\partial y^2}\right) = -k^2 H_z$$

$$\frac{\partial^2 H_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H_z}{\partial y^2} + k^2 H_z = 0 \qquad (22)$$

และเช่นเดียวกันเมื่อแทนค่าสมการที่ (20) และ (21) ลงในสมการที่ (16) จะได้

$$\frac{\partial^2 E_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E_z}{\partial y^2} + k^2 E_z = 0 \qquad (23)$$

ดังนั้นจะได้สมการคลื่น 2 สมการ เขียนในเทอมองค์ประกอบของสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าในทิศทางแนวแกน z ซึ่งเป็นทิศทางการแพร่กระจายคลื่น ดังนี้

$$\frac{\partial^2 H_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H_z}{\partial y^2} + k^2 H_z = 0$$

$$\frac{\partial^2 E_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E_z}{\partial y^2} + k^2 E_z = 0$$

2.2.2 คลื่นสนามแม่เหล็กตามขวางในท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยม (TM Mode)

การวิเคราะห์สมการของสนามภายในท่อนำคลื่นในโหมด TM นั้นจะเริ่มต้นวิเคราะห์จากสมการคลื่น

$$\frac{\partial^2 H_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H_z}{\partial y^2} + k^2 H_z = 0$$

$$\frac{\partial^2 E_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E_z}{\partial y^2} + k^2 E_z = 0$$

1. การสร้างสมการคลื่น สำหรับคลื่นในโหมด TM นั้น ค่า $H_z = 0$ และจากสมการคลื่นจะหาค่าของสนามได้จาก

$$\frac{\partial^2 E_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E_z}{\partial y^2} + k^2 E_z = 0$$

จากสมการจะเห็นได้ว่ามีเฉพาะองค์ประกอบของสนามไฟฟ้าในแนวแกน z เท่านั้น

เอกสารนี้สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การแก้สมการคลื่นเพื่อหาผลเฉลยทั่วไป

เมื่อให้ $$E_z(x,y,z) = E_{z0}(x,y)e^{-\gamma z} \quad (24)$$

และจากสมการคลื่นสมการที่ (23) จะเขียนสมการใหม่ได้เป็น

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2}E_{z0}(x,y) + \frac{\partial^2}{\partial y^2}E_{z0}(x,y) + k^2E_{z0}(x,y) = 0$$

สำหรับการหาคำตอบของสมการคลื่นจะใช้วิธีการแยกตัวแปร คือ

$$E_{z0}(x,y) = X(x)Y(y) \quad (25)$$

จะเขียนสมการใหม่ได้เป็น

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2}X(x)Y(y) + \frac{\partial^2}{\partial y^2}X(x)Y(y) + k^2X(x)Y(y) = 0$$

$$Y(y)\frac{d^2}{dx^2}X(x) + X(x)\frac{d^2}{dy^2}Y(y) + k^2X(x)Y(y) = 0$$

เมื่อให้ $\frac{1}{X(x)Y(y)}$ คูณตลอดสมการ จะได้

$$\frac{1}{X(x)}\frac{d^2}{dx^2}X(x) + \frac{1}{Y(y)}\frac{d^2}{dy^2}Y(y) + k^2 = 0$$

$$\frac{1}{X(x)}\frac{d^2}{dx^2}X(x) + \frac{1}{Y(y)}\frac{d^2}{dy^2}Y(y) = -k^2$$

และให้ $k^2 = k_x^2 + k_y^2$ จะได้

$$\frac{1}{X(x)}\frac{d^2}{dx^2}X(x) + \frac{1}{Y(y)}\frac{d^2}{dy^2}Y(y) = -k_x^2 - k_y^2$$

สำหรับการแก้สมการคลื่นจะแยกสมการออกเป็นสมการดิฟเฟอเรนเชียล (Differential Equation) สองสมการ ดังนี้

สมการดิฟเฟอเรนเชียลสมการที่ 1

$$\frac{1}{X(x)}\frac{d^2}{dx^2}X(x) = -k_x^2$$

$$\frac{d^2}{dx^2}X(x) + k_x^2X(x) = 0$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการดิฟเฟอเรนเชียลสมการที่ 2

$$\frac{1}{Y(y)}\frac{d^2}{dy^2}Y(y) = -k_y^2$$

$$\frac{d^2}{dy^2}Y(y) + k_y^2 Y(y) = 0$$

จากสมการเป็นสมการดิฟเฟอเรนเชียลอันดับสองที่มีสัมประสิทธิ์เป็นค่าคงที่ ซึ่งแก้สมการโดยวิธีใช้ตัวดำเนินการเชิงอนุพันธ์ (Differential Operator) ได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
\frac{d^2}{dy^2}Y(y) + k_y^2 Y(y) &= 0 \\
(D^2 + k_y^2)Y(y) &= 0 \\
D^2 + k_y^2 &= 0 \\
r^2 + k_y^2 &= 0 \\
r^2 &= -k_y^2 \\
r &= \sqrt{-k_y^2} \\
r &= 0 \pm jk_y
\end{aligned}$$

แสดงว่า r_1 และ r_2 เป็นรากเชิงซ้อน ($r_1 = jk_y$ และ $r_2 = -jk_y$)
รูปแบบคำตอบของรากเชิงซ้อนคือ

$$Y(y) = e^{\alpha y}(c_1 \cos \beta y + c_2 \sin \beta y)$$

จาก $r = 0 \pm jk_y$ เปรียบเทียบกับรูปแบบ $r = \alpha \pm j\beta$
จะได้ $\alpha = 0$ และ $\beta = k_y$ เมื่อแทนค่าลงในสมการรูปแบบคำตอบจะได้

$$Y(y) = (c_1 \cos k_y y + c_2 \sin k_y y)$$

และเช่นเดียวกันก็จะสามารถแก้สมการดิฟเฟอเรนเชียลหาค่า $X(x)$ ได้เป็น

$$X(x) = (c_3 \cos k_x x + c_4 \sin k_x x)$$

3. การหาสมการคลื่นที่เดินทางในท่อนำคลื่นจากผลเฉลยทั่วไป (การหาผลเฉลยเฉพาะ)
แทนค่า $X(x)$ และ $Y(y)$ ลงในสมการ $E_{z0}(x,y) = X(x)Y(y)$ จะได้

$$E_{z0}(x,y) = (c_3 \cos k_x x + c_4 \sin k_x x)(c_1 \cos k_y y + c_2 \sin k_y y)$$

จากสภาวะเงื่อนไขขอบเขตรอยต่อของสนามไฟฟ้าที่เดินทางในท่อนำคลื่นที่ $x = 0$, $x = a$ หรือ $y = 0$, $y = b$ จะทำให้ค่า $E_{z0}(x,y) = 0$ และสามารถเขียนสมการใหม่ได้เป็น

$$E_{z0}(x,y) = (c_3 \cos k_x x + c_4 \sin k_x x)(c_1 \cos k_y y + c_2 \sin k_y y) = 0$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพิจารณาตัวแปร x และ y จากสมการข้างต้น พบว่า $E_{z0}(x,y)=0$ จะเป็นไปตามสภาวะของเงื่อนไขขอบเขตรอยต่อของสนามไฟฟ้าที่เดินทางในท่อนำคลื่นก็ต่อเมื่อ

พิจารณาในแนวแกน x

ที่ $x=0$ จะได้ $E_{z0}(x,y)=0$ ก็ต่อเมื่อ $c_3=0$ ด้วย เขียนสมการได้เป็น

$$(c_4 \sin k_x x)\left(c_1 \cos k_y y + c_2 \sin k_y y\right)=0$$

ที่ $x=a$ จะได้ $E_{z0}(a,y)=0$ ก็ต่อเมื่อ $c_3=0$ และ $\sin k_x a=0$ เขียนสมการได้เป็น

$$(c_4 \sin k_x a)\left(c_1 \cos k_y y + c_2 \sin k_y y\right)=0$$

และที่ $\sin k_x a=0$ เมื่อ $\sin \pi=0$ และ $k_x a=m\pi$ จะได้สมการ

$$k_x=\frac{m\pi}{a} \qquad \text{โดยที่ } m=1,2,3,\ldots$$

แทนค่า k_x ลงในสมการจะได้

$$E_{z0}(a,y)=\left(c_4 \sin\frac{m\pi}{a}a\right)\left(c_1 \cos k_y y + c_2 \sin k_y y\right)=0$$

$$E_{z0}(a,y)=(c_4 \sin m\pi)\left(c_1 \cos k_y y + c_2 \sin k_y y\right)=0$$

ดังนั้น $E_{z0}(a,y)=0$ เมื่อแทน $m=0,1,2,3,\ldots$

พิจารณาในแนวแกน y

ที่ $y=0$ จะได้ $E_{z0}(x,0)=0$ ก็ต่อเมื่อ $c_1=0$ ด้วย เขียนสมการได้เป็น

$$(c_3 \cos k_x x + c_4 \sin k_x x)\left(+c_2 \sin k_y y\right)=0$$

ที่ $y=b$ จะได้ $E_{z0}(x,b)=0$ ก็ต่อเมื่อ $c_1=0$ และ $\sin k_x b=0$ เขียนสมการได้เป็น

$$(c_3 \cos k_x x + c_4 \sin k_x a)\left(c_2 \sin k_y b\right)=0$$

และที่ $\sin k_y b=0$ เมื่อ $\sin \pi=0$ และ $k_y b=n\pi$ จะได้สมการ

$$k_y=\frac{n\pi}{b} \qquad \text{โดยที่ } n=0,1,2,3,\ldots$$

แทนค่า k_y ลงในสมการจะได้

$$E_{z0}(x,b)=(c_3 \cos k_x x + c_4 \sin k_x x)\left(c_2 \sin\frac{n\pi}{b}b\right)=0$$

$$E_{z0}(x,b)=(c_3 \cos k_x x + c_4 \sin k_x x)(c_2 \sin n\pi)=0$$

ดังนั้น $E_{z0}(x,b)=0$ เมื่อแทน $n=0,1,2,3,\ldots$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า สมการคลื่นสนามไฟฟ้า $E_{z0}(x,y)$ ที่เดินทางในท่อนำคลื่นตามสภาวะเงื่อนไขขอบเขตรอยต่อที่ตำแหน่ง x และ y ใดๆ จะสมารถเขียนสมการได้เป็น

$$E_{z0}(x,y) = (c_3 \cos k_x x + c_4 \sin k_x x)(c_1 \cos k_y y + c_2 \sin k_y y)$$

$$E_{z0}(x,y) = \left(c_4 \sin\frac{m\pi}{a}x\right)\left(c_2 \sin\frac{n\pi}{b}y\right)$$

ให้ $E_0 = c_4 c_2$ จะเขียนสมการใหม่ได้เป็น

$$E_{z0}(x,y) = E_0 \sin\left(\frac{m\pi}{a}x\right)\sin\left(\frac{n\pi}{b}y\right)$$

เมื่อนำ E_{z0} ไปแทนลงในสมการที่ (18), (19), (20) และ (21) เพื่อค่าหา E_{x0} , E_{y0} , H_{x0} และ H_{y0} ตามลำดับ ($H_{z0} = 0$) จะได้สมการองค์ประกอบของสนามคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในทิศทางแนวแกนต่างๆ ของโหมด TM ในท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยม

$$E_{x0}(x,y) = -\frac{\gamma E_0}{k^2}\left(\frac{m\pi}{a}\right)\cos\left(\frac{m\pi}{a}x\right)\sin\left(\frac{n\pi}{b}y\right) \quad (26)$$

$$E_{y0}(x,y) = -\frac{\gamma E_0}{k^2}\left(\frac{n\pi}{b}\right)\sin\left(\frac{m\pi}{a}x\right)\cos\left(\frac{n\pi}{b}y\right) \quad (27)$$

$$H_{x0}(x,y) = \frac{j\omega\varepsilon E_0}{k^2}\left(\frac{n\pi}{b}\right)\sin\left(\frac{m\pi}{a}x\right)\cos\left(\frac{n\pi}{b}y\right) \quad (28)$$

$$H_{y0}(x,y) = -\frac{j\omega\varepsilon E_0}{k^2}\left(\frac{m\pi}{a}\right)\cos\left(\frac{m\pi}{a}x\right)\sin\left(\frac{n\pi}{b}y\right) \quad (29)$$

เมื่อ $E_x(x,y,z,t) = E_{x0}(x,y)\cdot e^{-\gamma z}\cdot e^{j\omega t}$

และจาก ที่ $k = \sqrt{\omega^2\varepsilon\mu + \gamma^2}$: wave number

$\gamma = \alpha + j\beta$: propagation constant

เมื่อ α คือ attenuation constant และ β คือ phase constant

เมื่อ $\alpha = 0$ จะได้ค่า $\gamma = j\beta$

จาก $E_x(x,y,z,t) = E_{x0}(x,y)\cdot e^{-\gamma z}\cdot e^{j\omega t}$

$$E_x = E_{x0}\cdot e^{j(\omega t - \beta z)}$$

จึงสามารถหาค่าองค์ประกอบของสนาม E_x , E_y , E_z , H_x , H_y ได้เป็น

$$E_x(x,y) = -\frac{\gamma E_0}{k^2}\left(\frac{m\pi}{a}\right)\cos\left(\frac{m\pi}{a}x\right)\sin\left(\frac{n\pi}{b}y\right)e^{j(\omega t-\beta z)} \quad (30)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E_y(x,y) = -\frac{\gamma E_0}{k^2}\left(\frac{n\pi}{b}\right)\sin\left(\frac{m\pi}{a}x\right)\cos\left(\frac{n\pi}{b}y\right)e^{j(\omega t-\beta z)} \quad (31)$$

$$E_z(x,y) = E_0\sin\left(\frac{m\pi}{a}x\right)\sin\left(\frac{n\pi}{b}y\right)e^{j(\omega t-\beta z)} \quad (32)$$

$$H_x(x,y) = \frac{j\omega\varepsilon E_0}{k^2}\left(\frac{n\pi}{b}\right)\sin\left(\frac{m\pi}{a}x\right)\cos\left(\frac{n\pi}{b}y\right)e^{j(\omega t-\beta z)} \quad (33)$$

$$H_y(x,y) = -\frac{j\omega\varepsilon E_0}{k^2}\left(\frac{m\pi}{a}\right)\cos\left(\frac{m\pi}{a}x\right)\sin\left(\frac{n\pi}{b}y\right)e^{j(\omega t-\beta z)} \quad (34)$$

เมื่อ $e^{j(\omega t-\beta z)} = \cos(\omega t-\beta z) + j\sin(\omega t-\beta z)$ จะได้ผลลัพธ์ของสมการเป็นค่าเฉพาะจำนวนจริงดังนี้

$$E_x(x,y,z,t) = \frac{\beta E_0}{k^2}\left(\frac{m\pi}{a}\right)\cos\left(\frac{m\pi}{a}x\right)\sin\left(\frac{n\pi}{b}y\right)\sin(\omega t-\beta z) \quad (35)$$

$$E_y(x,y,z,t) = \frac{\beta E_0}{k^2}\left(\frac{n\pi}{b}\right)\sin\left(\frac{m\pi}{a}x\right)\cos\left(\frac{n\pi}{b}y\right)\sin(\omega t-\beta z) \quad (36)$$

$$E_z(x,y,z,t) = E_0\sin\left(\frac{m\pi}{a}x\right)\sin\left(\frac{n\pi}{b}y\right)\cos(\omega t-\beta z) \quad (37)$$

$$H_x(x,y,z,t) = -\frac{\omega\varepsilon E_0}{k^2}\left(\frac{n\pi}{b}\right)\sin\left(\frac{m\pi}{a}x\right)\cos\left(\frac{n\pi}{b}y\right)\sin(\omega t-\beta z) \quad (38)$$

$$H_y(x,y,z,t) = \frac{\omega\varepsilon E_0}{k^2}\left(\frac{m\pi}{a}\right)\cos\left(\frac{m\pi}{a}x\right)\sin\left(\frac{n\pi}{b}y\right)\sin(\omega t-\beta z) \quad (39)$$

$$H_z(x,y,z,t) = 0 \quad (40)$$

2.2.3 คลื่นสนามไฟฟ้าตามขวางในท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยม (TE Mode)

การวิเคราะห์สมการของสนามภายในท่อนำคลื่นในโหมด TM นั้นจะเริ่มต้นวิเคราะห์จากสมการคลื่น

$$\frac{\partial^2 H_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H_z}{\partial y^2} + k^2 H_z = 0$$

$$\frac{\partial^2 E_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E_z}{\partial y^2} + k^2 E_z = 0$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. การสร้างสมการคลื่น สำหรับคลื่นในโหมด TE นั้น ค่า $E_z = 0$ และจากสมการคลื่นจะหาค่าของสนามได้จาก

$$\frac{\partial^2 H_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H_z}{\partial y^2} + k^2 H_z = 0$$

จากสมการจะเห็นได้ว่ามีเฉพาะองค์ประกอบของสนามแม่เหล็กในแนวแกน z เท่านั้น

2. การแก้สมการคลื่นเพื่อหาผลเฉลยทั่วไป สำหรับการหาคำตอบของสมการคลื่นจะใช้วิธีแยกตัวแปร

เมื่อ $$H_z(x,y,z) = X(x)Y(y)Z(z)$$

$$= X(x)Y(y)e^{-\gamma z}$$

$$= H_{z0}(x,y)e^{-\gamma z}$$

โดยพิจารณาให้ $Z = 0$ กล่าวคือ คลื่นยังไม่มีการเดินทางไปตามท่อนำคลื่น

จะได้ $$H_{z0}(x,y) = X(x)Y(y)$$

แทนลงในสมการที่ (22) จะได้

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} H_{z0}(x,y) + \frac{\partial^2}{\partial y^2} H_{z0}(x,y) + k^2 H_{z0}(x,y) = 0$$

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} X(x)Y(y) + \frac{\partial^2}{\partial y^2} X(x)Y(y) + k^2 X(x)Y(y) = 0$$

$$Y(y)\frac{d^2}{dx^2}X(x) + X(x)\frac{d^2}{dy^2}Y(y) + k^2 X(x)Y(y) = 0$$

นำ $\frac{1}{X(x)Y(y)}$ คูณตลอดสมการ จะได้

$$\frac{1}{X(x)}\frac{d^2}{dx^2}X(x) + \frac{1}{Y(y)}\frac{d^2}{dy^2}Y(y) + k^2 = 0$$

$$\frac{1}{X(x)}\frac{d^2}{dx^2}X(x) + \frac{1}{Y(y)}\frac{d^2}{dy^2}Y(y) = -k^2$$

และให้ $k^2 = k_x^2 + k_y^2$ จะได้

$$\frac{1}{X(x)}\frac{d^2}{dx^2}X(x) + \frac{1}{Y(y)}\frac{d^2}{dy^2}Y(y) = -k_x^2 - k_y^2$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับการแก้สมการคลื่นจะแยกสมการออกเป็นสมการดิฟเฟอเรนเชียล (Differential Equation) สองสมการ ดังนี้

สมการดิฟเฟอเรนเชียลสมการที่ 1

$$\frac{1}{X(x)}\frac{d^2}{dx^2}X(x) = -k_x^2$$

$$\frac{d^2}{dx^2}X(x) + k_x^2 X(x) = 0$$

สมการดิฟเฟอเรนเชียลสมการที่ 2

$$\frac{1}{Y(y)}\frac{d^2}{dy^2}Y(y) = -k_y^2$$

$$\frac{d^2}{dy^2}Y(y) + k_y^2 Y(y) = 0$$

จากสมการเป็นสมการดิฟเฟอเรนเชียลอันดับสองที่มีสัมประสิทธิ์เป็นค่าคงที่ ซึ่งแก้สมการโดยวิธีใช้ตัวดำเนินการเชิงอนุพันธ์ (Differential Operator) ได้ดังนี้

$$\frac{d^2}{dy^2}Y(y) + k_y^2 Y(y) = 0$$

$$\left(D^2 + k_y^2\right)Y(y) = 0$$

$$D^2 + k_y^2 = 0$$

$$r^2 + k_y^2 = 0$$

$$r^2 = -k_y^2$$

$$r = \sqrt{-k_y^2}$$

$$r = 0 \pm jk_y$$

แสดงว่า r_1 และ r_2 เป็นรากเชิงซ้อน ($r_1 = jk_y$ และ $r_2 = -jk_y$)

รูปแบบคำตอบของรากเชิงซ้อนคือ

$$Y(y) = e^{\alpha y}(c_1 \cos \beta y + c_2 \sin \beta y)$$

จาก $r = 0 \pm jk_y$ เปรียบเทียบกับรูปแบบ $r = \alpha \pm j\beta$

จะได้ $\alpha = 0$ และ $\beta = k_y$ เมื่อแทนค่าลงในสมการรูปแบบคำตอบจะได้

$$Y(y) = \left(c_1 \cos k_y y + c_2 \sin k_y y\right)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และเช่นเดียวกันก็จะสามารถแก้สมการดิฟเฟอเรนเชียลหาค่า $X(x)$ ได้เป็น

$$X(x) = (c_3 \cos k_x x + c_4 \sin k_x x)$$

แทนค่าคำตอบทั้งสองลงในสมการ $H_{z0}(x,y) = X(x)Y(y)$ จะได้

$$H_{z0}(x,y) = (c_3 \cos k_x x + c_4 \sin k_x x)\left(c_1 \cos k_y y + c_2 \sin k_y y\right)$$

3. การหาสมการคลื่นที่เดินทางในท่อนำคลื่นจากผลเฉลยทั่วไป (การหาผลเฉลยเฉพาะ)

สำหรับผลเฉลยเฉพาะนั้นจะหาได้โดยการพิจารณาจากเงื่อนไขขอบเขตที่รอยต่อและจากองค์ประกอบของสนามไฟฟ้าในแนวขวาง

จากเงื่อนไขขอบเขตที่รอยต่อระหว่างผนังท่อนำคลื่นกับไดอิเล็กตริก สนามไฟฟ้าในแนวขนานกับผนังท่อนำคลื่นจะมีค่าเป็นศูนย์ ($E_z = 0$) และจากองค์ประกอบของสนามไฟฟ้าในแนวขวาง

$$E_x = -\frac{1}{k^2}\left(\gamma \frac{\partial E_z}{\partial x} + j\omega\mu \frac{\partial H_z}{\partial y}\right)$$

$$E_y = -\frac{1}{k^2}\left(\gamma \frac{\partial E_z}{\partial y} + j\omega\mu \frac{\partial H_z}{\partial x}\right)$$

จะได้ $$E_x = -\frac{j\omega\mu}{k^2}\frac{\partial H_z}{\partial y} \qquad (41)$$

$$E_y = -\frac{j\omega\mu}{k^2}\frac{\partial H_z}{\partial x} \qquad (42)$$

พิจารณาในแนวแกน x โดยแทนค่า H_z ลงในสมการที่ (41)

$$E_x = -\frac{j\omega\mu}{k^2}\frac{\partial}{\partial y}(c_3 \cos k_x x + c_4 \sin k_x x)\left(c_1 \cos k_y y + c_2 \sin k_y y\right)$$

$$E_x = -\frac{j\omega\mu}{k^2}(c_3 \cos k_x x + c_4 \sin k_x x)\left(-c_1 k_y \sin k_y y + c_2 k_y \cos k_y y\right)$$

องค์ประกอบของสนามไฟฟ้าในแนวแกน x จะมีค่าเป็นศูนย์ที่รอยต่อ ที่ตำแหน่ง $y = 0$ และ $y = b$

พิจารณาที่ $y = 0$ จะได้ $E_x = 0$ ก็ต่อเมื่อ $c_2 = 0$ ด้วย เขียนสมการได้เป็น

$$0 = -\frac{j\omega\mu}{k^2}(c_3 \cos k_x x + c_4 \sin k_x x)\left(-c_1 k_y \sin k_y y\right)$$

พิจารณาที่ $y = b$ จะได้ $E_x = 0$ ก็ต่อเมื่อ $c_2 = 0$ และ $\sin k_y b = 0$ เขียนสมการได้เป็น

$$0 = -\frac{j\omega\mu}{k^2}(c_3 \cos k_x x + c_4 \sin k_x x)\left(-c_1 k_y \sin k_y b\right)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

เมื่อ $\sin k_y b = 0$ และจาก $\sin n\pi = 0$ จะได้

$$k_y b = n\pi$$

$$k_y = \frac{n\pi}{b} \qquad \text{โดยที่ } n = 0, 1, 2, 3, \ldots$$

พิจารณาในแนวแกน y โดยแทนค่า H_z ลงในสมการที่ (42)

$$E_y = \frac{j\omega\mu}{k^2}\frac{\partial}{\partial x}(c_3 \cos k_x x + c_4 \sin k_x x)\left(c_1 \cos k_y y + c_2 \sin k_y y\right) \qquad (43)$$

$$E_y = \frac{j\omega\mu}{k^2}(-c_3 k_x \sin k_x x + c_4 k_x \cos k_x x)\left(c_1 \cos k_y y + c_2 \sin k_y y\right)$$

องค์ประกอบของสนามไฟฟ้าในแนวแกน y จะมีค่าเป็นศูนย์ที่รอยต่อ ที่ตำแหน่ง $x = 0$ และ $x = a$

พิจารณาที่ $x = 0$ จะได้ $E_y = 0$ ก็ต่อเมื่อ $c_4 = 0$ ด้วย เขียนสมการได้เป็น

$$0 = \frac{j\omega\mu}{k^2}(-c_3 k_x \sin k_x x)\left(c_1 \cos k_y y + c_2 \sin k_y y\right)$$

พิจารณาที่ $x = a$ จะได้ $E_y = 0$ ก็ต่อเมื่อ $c_4 = 0$ และ $\sin k_x a = 0$ เขียนสมการได้เป็น

$$0 = \frac{j\omega\mu}{k^2}(-c_3 k_x \sin k_x a)\left(c_1 \cos k_y y + c_2 \sin k_y y\right)$$

เมื่อ $\sin k_x a = 0$ และจาก $\sin m\pi = 0$ จะได้

$$k_x a = m\pi$$

$$k_x = \frac{m\pi}{a} \qquad \text{โดยที่ } m = 0, 1, 2, 3, \ldots$$

ดังนั้นจากผลที่ได้จึงสามารถเขียนสมการของ $H_{z0}(x, y)$ ได้เป็น

$$H_{z0}(x, y) = (c_3 \cos k_x x + c_4 \sin k_x x)\left(c_1 \cos k_y y + c_2 \sin k_y y\right)$$

$$H_{z0}(x, y) = (c_3 \cos k_x x)\left(c_1 \cos k_y y\right)$$

จะเห็นได้ว่า สมการคลื่นสนามแม่เหล็ก $H_{z0}(x, y)$ ในท่อนำคลื่นขึ้นอยู่กับฟังก์ชัน cos ที่ตำแหน่ง x และ y ใดๆ โดยสนามที่ผนังท่อนำคลื่นเป็นไปตามเงื่อนไขขอบเขต

เมื่อ $k_x = \frac{m\pi}{a}$ และ $k_y = \frac{n\pi}{b}$ จะเขียนสมการผลเฉพาะได้เป็น

$$H_{z0}(x, y) = H_0 \cos\left(\frac{m\pi}{a}x\right)\cos\left(\frac{n\pi}{b}y\right)$$

โดยที่ $H_0 = c_1 c_3$ เป็นค่าของกำลังคลื่นที่ต้องการส่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

149499

นำค่า H_{z0} ไปแทนลงในสมการหาค่า E_x , E_y , H_x และ H_y $(H_z = 0)$

$$E_x = -\frac{1}{k^2}\left(\gamma\frac{\partial E_z}{\partial x} + j\omega\mu\frac{\partial H_z}{\partial y}\right)$$

$$E_y = \frac{1}{k^2}\left(-\gamma\frac{\partial E_z}{\partial y} + j\omega\mu\frac{\partial H_z}{\partial x}\right)$$

$$H_x = \frac{1}{k^2}\left(-\gamma\frac{\partial H_z}{\partial x} + j\omega\varepsilon\frac{\partial E_z}{\partial y}\right)$$

$$H_y = -\frac{1}{k^2}\left(\gamma\frac{\partial H_z}{\partial y} + j\omega\varepsilon\frac{\partial E_z}{\partial x}\right)$$

เมื่อ $e^{j(\omega t-\beta z)} = \cos(\omega t - \beta z) + j\sin(\omega t - \beta z)$ จะได้ผลลัพธ์ของสมการเป็นเฉพาะค่าจำนวนจริงดังนี้

$$\vec{E}(x,y,z,t) = E_x(x,y,z,t)\vec{a}_x + E_y(x,y,z,t)\vec{a}_y + E_z(x,y,z,t)\vec{a}_z$$

$$E_x(x,y,z,t) = \frac{\omega\mu H_0}{k^2}\left(\frac{n\pi}{b}\right)\cos\left(\frac{m\pi}{a}x\right)\sin\left(\frac{n\pi}{b}y\right)\sin(\omega t - \beta z)$$

$$E_y(x,y,z,t) = \frac{\omega\mu E_0}{k^2}\left(\frac{m\pi}{a}\right)\sin\left(\frac{m\pi}{a}x\right)\cos\left(\frac{n\pi}{b}y\right)\sin(\omega t - \beta z)$$

$$E_z(x,y,z,t) = 0$$

$$H_x(x,y,z,t) = -\frac{\beta H_0}{k^2}\left(\frac{m\pi}{a}\right)\sin\left(\frac{m\pi}{a}x\right)\cos\left(\frac{n\pi}{b}y\right)\sin(\omega t - \beta z)$$

$$H_y(x,y,z,t) = -\frac{\beta H_0}{k^2}\left(\frac{n\pi}{b}\right)\cos\left(\frac{m\pi}{a}x\right)\sin\left(\frac{n\pi}{b}y\right)\sin(\omega t - \beta z)$$

$$H_z(x,y,z,t) = H_0\cos\left(\frac{m\pi}{a}x\right)\cos\left(\frac{n\pi}{b}y\right)\cos(\omega t - \beta z)$$

เมื่อกล่าวโดยสรุปแล้ว คลื่นที่ส่งผ่านไปตามท่อนำคลื่นได้นั้นจะมีคลื่น TE และคลื่น TM ซึ่งทั้งสองคลื่นนี้จะมีผลเฉลยที่มีรูปแบบการกระจายของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ไม่ซ้ำแบบกัน โดยทั่วไปจะระบุในรูป TE_{mn} และ TM_{mn} ซึ่งหมายถึงโหมด TE อันดับ mn และโหมด TM อันดับ mn ตามลำดับ

จากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่แสดงไว้ในสมการสำหรับโหมด TM_{mn} จะเห็นได้ว่า m และ n จะเป็นศูนย์ไม่ได้ เพราะจะทำให้ E_z เป็นศูนย์ และจะทำให้ส่วนประกอบอื่นๆ เป็นศูนย์ด้วย

$$E_{z0}(x,y) = E_0\sin\left(\frac{m\pi}{a}x\right)\sin\left(\frac{n\pi}{b}y\right)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E_x = -\frac{1}{k^2}\left(-\gamma\frac{\partial E_z}{\partial x}\right)$$

$$E_y = \frac{1}{k^2}\left(\gamma\frac{\partial E_z}{\partial y}\right)$$

$$H_x = \frac{1}{k^2}\left(j\omega\varepsilon\frac{\partial E_z}{\partial y}\right)$$

$$H_y = -\frac{1}{k^2}\left(j\omega\varepsilon\frac{\partial E_z}{\partial x}\right)$$

ส่วนโหมด TE_{mn} นั้น m และ n จะเป็นศูนย์พร้อมกันไม่ได้ เพราะจำทำให้เป็นค่าคงที่ และจะมีผลทำให้ส่วนประกอบอื่นๆ เป็นศูนย์หมด

$$H_{z0}(x,y) = H_0\cos\left(\frac{m\pi}{a}x\right)\cos\left(\frac{n\pi}{b}y\right)$$

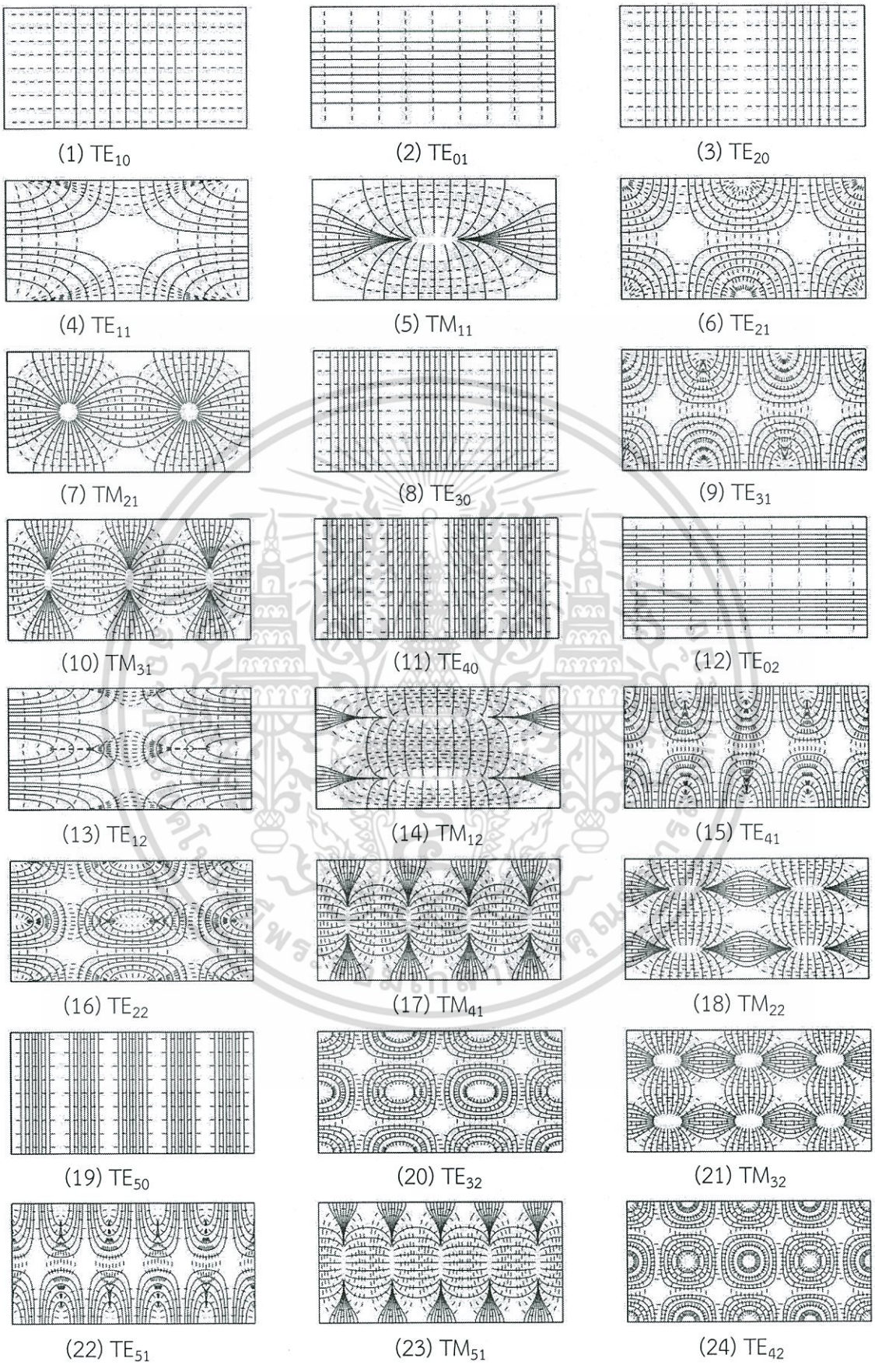
$$H_x = \frac{1}{k^2}\left(-\gamma\frac{\partial H_z}{\partial x}\right)$$

$$H_y = -\frac{1}{k^2}\left(\gamma\frac{\partial H_z}{\partial y}\right)$$

$$E_x = -\frac{1}{k^2}\left(j\omega\mu\frac{\partial H_z}{\partial y}\right)$$

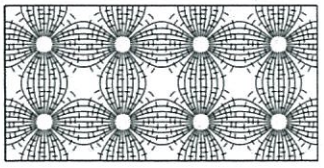
$$E_y = \frac{1}{k^2}\left(j\omega\mu\frac{\partial H_z}{\partial x}\right)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

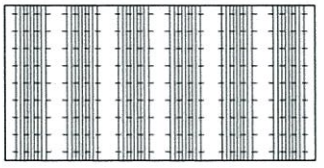


รูปที่ 2.1 สนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าสำหรับโหมดต่างๆ ภายในท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยม

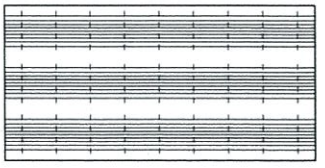
เอกสารนี้เป็น[illegible]การค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



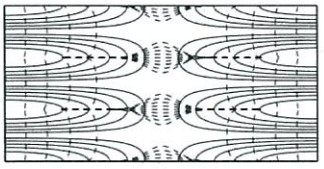
(25) TM_{42}



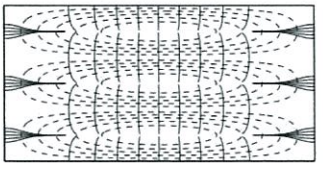
(26) TE_{60}



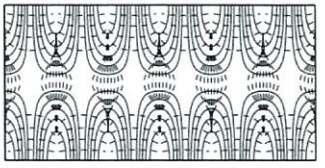
(27) TE_{03}



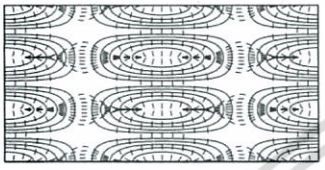
(28) TE_{13}



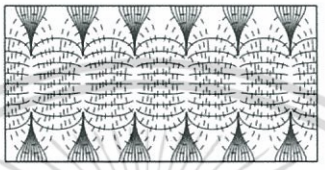
(29) TM_{13}



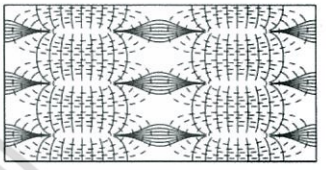
(30) TE_{61}



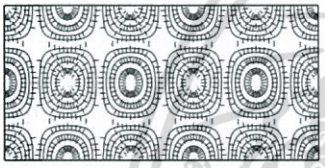
(31) TE_{23}



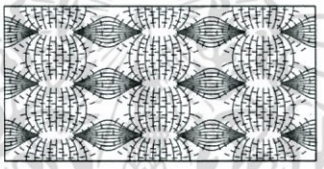
(32) TM_{61}



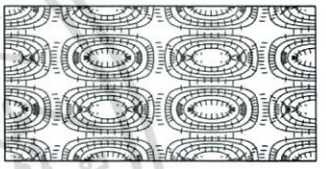
(33) TM_{23}



(34) TE_{52}



(35) TM_{33}



(36) TE_{33}

รูปที่ 2.1 (ต่อ) สนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าสำหรับโหมดต่างๆ ภายในท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยม

2.2.4 ลักษณะสมบัติของท่อนำคลื่น

อิมพีแดนซ์คลื่น คือ อิมพีแดนซ์ของตัวกลางที่คลื่นส่งผ่านซึ่งเท่ากับอัตราส่วนระหว่างสนามไฟฟ้ากับสนามแท่เหล็กในระนาบตั้งฉากกับการเคลื่อนที่

$$Z = \frac{E_x}{H_y} = \frac{E_y}{H_x}$$

ในโหมด TM จะหาค่าอิมพีแดนซ์คลื่นได้จาก

$$Z_{TM} = \frac{\gamma}{\sigma + j\omega\varepsilon}$$

ในโหมด TE จะหาค่าอิมพีแดนซ์คลื่นได้จาก

$$Z_{TM} = \frac{j\omega\varepsilon}{\gamma}$$

เมื่อคลื่นเดินทางไปในท่อนำคลื่น แอมพลิจูดของคลื่นจะถูกลดทอนตามระยะทางที่เพิ่มขึ้น การลดทอนกำลังคลื่นในท่อนำคลื่นส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นเนื่องจากผนังท่อนำคลื่นทำด้วยโลหะที่มีค่าการนำไฟฟ้าจำกัด ส่วนการสูญเสียในตัวกลางอาจจะมีค่าสูงได้เมื่อเกิดความชื้นในอากาศภายใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ท่อนำคลื่น แต่หากตัวกลางหรือภายในท่อนำคลื่นบรรจุไว้ด้วยก๊าซจะมีค่าการสูงเสียในตัวกลางต่ำมาก เนื่องจากก๊าซจะไม่ดูดกลืนกำลังงานของคลื่น

$k = \sqrt{\omega^2\varepsilon\mu + \gamma^2}$: เลขคลื่น (wave number)

$\gamma = \alpha + j\beta$: ค่าคงที่การแพร่กระจายของคลื่น (propagation constant)

เมื่อ α คือ attenuation constant และ β คือ phase constant

ถ้าให้ Z คงที่ ค่าคงที่การแพร่กระจายของคลื่น (γ) จะเป็นตัวบ่งบอกว่าคลื่นสามารถเดินทางไปในท่อนำคลื่นได้หรือ7อไม่ โดย γ เปลี่ยนแปลงไปตามความถี่ (f)

จากสมการ $k = \sqrt{\omega^2\varepsilon\mu + \gamma^2}$

จะได้ $\gamma^2 = k^2 - \omega^2\varepsilon\mu$

เมื่อ $k^2 = k_x^2 + k_y^2 = \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2$

จะได้ $\gamma = \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2 - \omega^2\varepsilon\mu}$

หรือ $\gamma = \sqrt{k^2 - \omega^2\varepsilon\mu}$

จากสมการสามารถสรุปได้เป็น 3 กรณี ดังนี้

<u>กรณีที่ 1</u> ที่ความถี่ต่ำกว่าความถี่คัตออฟ ทำให้ค่าของ $\omega^2\varepsilon\mu < k^2$ และจะมีผลให้ γ เป็นค่าจริง

$\gamma = \sqrt{k^2 - \omega^2\varepsilon\mu} = \alpha$

ในกรณีนี้คลื่นจะไม่สามารถเคลื่อนไปในท่อนำคลื่นได้ เนื่องจากคลื่นถูกลดทอนขนาด

$Ae^{-\gamma z} = Ae^{-\alpha z}$

<u>กรณีที่ 2</u> ที่ความถี่เท่ากับความถี่คัตออฟ ทำให้ค่าของ $\omega^2\varepsilon\mu = k^2$ และจะมีผลให้ γ มีค่าเป็นศูนย์

$$\omega\sqrt{\varepsilon\mu} = \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2}$$

$$0 = \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2 - \omega^2\varepsilon\mu}$$

ในกรณีนี้คลื่นจะไม่ถูกลดทอนขนาด โดยเรียกความถี่นี้ว่า ความถี่คัตออฟ (cuff-off frequency) ซึ่งเป็นความถี่ที่ต่ำที่สุดที่คลื่นสามารถเคลื่อนที่ไปในท่อนำคลื่น

$Ae^{-\gamma z} = Ae^{-(0)z} = A$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จาก $$\omega\sqrt{\varepsilon\mu} = \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2}$$

$$2\pi f\sqrt{\varepsilon\mu} = \pi\sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2}$$

จะได้ $$f_c = \frac{1}{2\sqrt{\varepsilon\mu}}\sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2}$$

หรือ $$\lambda_c = \frac{v_0}{f_c} = 2\sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2}$$

<u>กรณีที่ 3</u> ที่ความถี่สูงกว่าความถี่คัตออฟ ทำให้ค่าของ $\omega^2\varepsilon\mu > k^2$ และจะมีผลให้ γ เป็นค่าจินตภาพ

$$\gamma = \sqrt{k^2 - \omega^2\varepsilon\mu} = j\beta$$

ในกรณีนี้คลื่นจะสามารถเคลื่อนไปในท่อนำคลื่นได้ โดยไม่มีการลดทอนขนาด

$$Ae^{-\gamma z} = Ae^{-j\beta z} = A(\cos\beta z - j\sin\beta z)$$

จะได้ $$\beta = \sqrt{\omega^2\varepsilon\mu - k^2}$$

หรือ $$\beta = \sqrt{\omega^2\varepsilon\mu - \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 - \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2}$$

เมื่อ $\beta = \frac{2\pi}{\lambda_g}$ เป็นค่าคงที่เฟสของคลื่นในท่อนำคลื่น

$$\lambda_g = \frac{2\pi}{\beta} = \frac{2\pi}{\sqrt{\omega^2\varepsilon\mu - \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 - \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2}}$$

$$\lambda_g = \frac{2\pi}{\sqrt{\left(\frac{\omega}{v_0}\right)^2 - \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 - \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2}}$$

$$\lambda_g = \frac{2\pi}{\sqrt{\left(\frac{2\pi f}{v_0}\right)^2 - \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 - \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2}}$$

$$\lambda_g = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{f}{v_0}\right)^2 - \left(\frac{m}{2a}\right)^2 - \left(\frac{n}{2b}\right)^2}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\lambda_g = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{\lambda^2} - \frac{1}{4}\left[\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2\right]}}$$

และจากสมการ $$\lambda_c = \frac{2}{\sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2}}$$

จะได้ $$\lambda_c^2 = \frac{4}{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2}$$

$$\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2 = \frac{4}{\lambda_c^2}$$

แทนค่าในสมการข้างบนในสมการ λ_g จะได้

$$\lambda_g = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{\lambda^2} - \frac{1}{4}\left[\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2\right]}}$$

$$\lambda_g = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{\lambda^2} - \frac{1}{4}\left[\frac{4}{\lambda_c^2}\right]}}$$

$$\lambda_g = \frac{1}{\lambda\sqrt{\frac{1}{\lambda^2} - \frac{1}{\lambda_c^2}}}$$

$$\lambda_g = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_c}\right)^2}}$$

และ $$v_p = \frac{\omega}{\beta} = \frac{\omega}{\sqrt{\frac{\omega}{v_0} - \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 - \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2}}$$

$$v_p = \frac{2\pi f}{2\pi\sqrt{\left(\frac{f}{v_0}\right)^2 - \left(\frac{m}{2a}\right)^2 - \left(\frac{n}{2b}\right)^2}}$$

$$v_p = \frac{f}{\sqrt{\frac{1}{\lambda^2} - \frac{1}{4}\left[\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2\right]}}$$

จาก $$\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2 = \frac{4}{\lambda_c^2}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทนค่าในสมการจะได้

$$v_p = \frac{f}{\sqrt{\frac{1}{\lambda^2} - \frac{1}{4}\left[\frac{4}{\lambda_c^2}\right]}}$$

$$v_p = \frac{v}{\lambda\sqrt{\frac{1}{\lambda^2} - \frac{1}{\lambda_c^2}}}$$

$$v_p = \frac{v}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_c}\right)^2}}$$

2.2 โปรแกรม MATLAB

MATLAB เป็นโปรแกรมสำหรับการคำนวณเชิงตัวเลขและ Visualization ที่มีประสิทธิภาพสูง ชื่อของโปรแกรม MATLAB ย่อมาจาก MATrix LABoratory และเป็นเครื่องหมายการค้าของบริษัท MathWorks ซึ่งการทำงานภายในโปรแกรม MATLAB อยู่บนพื้นฐานของการคำนวณทางเมทริกซ์ (Matrix Manipulation and Computation) เป็นหลัก โปรแกรมนี้สามารถทำงานได้ทั้งแบบโต้ตอบ (interactive) ซึ่งคล้ายกับภาษา Basic ในโปรแกรม QBasic และแบบ compiled mode คล้ายกับภาษา C และ Pascal นอกจากนี้ยังสามารถใช้เป็นเสมือนเครื่องคิดเลข ทำการคำนวณทางคณิตศาสตร์ได้ทันที

การใช้โปรแกรม MATLAB สามารถทำได้ง่ายเมื่อเทียบกับภาษาโปรแกรมอื่นๆ เนื่องจากสามารถสร้างและกำหนดค่าตัวแปรได้ทันทีโดยไม่ต้องประกาศตัวแปรก่อน ซึ่งสะดวกในการเขียนโปรแกรมเพราะผู้ใช้ไม่ต้องกังวลในเรื่องโครงสร้างของภาษา แต่มาสนใจอัลกอริทึมในการแก้โจทย์ปัญหาเป็นหลัก

ข้อมูลไม่ว่าจะเป็นตัวเลขหรือตัวอักษร (strings) จะถูกจัดเก็บในรูปแบบของแถวและหลัก หรือ array ซึ่งคือเมทริกซ์ เช่น จำนวนสเกลล่าร์ (scalar) จะถูกแทนด้วยเมทริกซขนาด 1×1 ข้อมูลที่เป็นเวกเตอร์จะถูกแทนที่ด้วยเมทริกซ์ที่มีเพียง 1 แถว ในกรณีที่เป็นเวกเตอร์แบบแถว (Row vector) หรือถูกแทนที่ด้วยเมทริกซ์ที่มีเพียง 1 หลักในกรณีที่เป็นเวกเตอร์แบบหลัก (Column vector) เป็นต้น การที่ MATLAB ถูกออกแบบมาให้มีการทำงานภายในเช่นนี้ทำให้การเขียนโปรแกรมแก้โจทย์ปัญหาที่มีลักษณะของเวกเตอร์และเมทริกซ์เป็นเรื่องง่าย ตัวอย่างเช่น การแกระบบสมการเชิงเสน ซึ่งระบบสมการ สามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบ [A]{x} = {b} ได เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความสามารถของโปรแกรม MATLAB เบื้องต้นมีดังนี้

- MATLAB เปนโปรแกรมเพื่อการคำนวณและแสดงผลได ทั้งตัวเลขและรูปภาพซึ่งมีประสิทธิภาพสูงสามารถทำการเขียนกราฟทั้ง 2 มิติและ 3 มิติได อยางงายดายและมีประสิทธิภาพ
- สามารถควบคุมการทำงานของ MATLAB ดวยชุดคำสั่ง (command line) และยังสามารถรวบรวมชุดคำสั่งเปนโปรแกรม (script file) ไดดวย
- ลักษณะการเขียนโปรแกรมใน MATLAB จะใกลเคียงการเขียนสมการคณิตศาสตรที่คุนเคยจึงงายกวาการเขียนโปรแกรมดวยภาษาชั้นสูง เชน ภาษา C, Pascal, Fortran และอื่นๆ
- MATLAB มีฟงกชันสำเร็จรูป (built-in function) เพื่อทำงานเฉพาะทางมากมาย นอกจากนี้ผูใชยังสามารถเขียนฟงกชั่นขึ้นมาใหมโดยใชประโยชนจากฟงกชั่นที่มีอยูเดิมไดเพื่อใหเหมาะสมกับงานของผูใชแตละกลุม สำหรับผูใชที่ตองการใชงานเฉพาะทางขั้นสูง เชน งานดาน Control, Image Processing, Artificial Neural Network หรืออื่นๆ MATLAB ก็มี toolbox หรือชุดฟงก์ชันพิเศษ เพื่อทำงานเฉพาะทางนั้นๆ ดวย
- MATLAB สามารถเชื่อมโยงหรือสงขอมูลแบบ Dynamic Link กับโปรแกรมอื่นๆ ไดเชน Excel หรือโปรแกรมที่เขียนขึ้นเองจากภาษา C หรือ Visual Basic ที่รวมทำงานอยูบนระบบปฏิบัติการ Windows

2.2.1 ระบบการทำงานของ MATLAB

ในการทำงานของ MATLAB เพื่อให้การทำงานเป็นไปตามจุดมุ่งหมาย MATLAB ได้แบ่งส่วนการทำงานของโปรแกรมออกเป็นส่วนหลักที่สำคัญ 5 ส่วน ซึ่งแต่ละส่วนจะมีหน้าที่ควบคุมการทำงาน และประสานการทำงานระหว่างส่วนต่างๆ ไปพร้อมกันด้วย รายละเอียดในการทำงานของส่วนต่างๆ มีดังนี้

2.2.1.1 Development Environment

ในส่วนนี้จะเป็นชุดเครื่องมือที่ช่วยให้สามารถใช้ฟังก์ชันและไฟล์ต่างๆ โดยเครื่องมือหลายตัวในนี้จะมีลักษณะเป็น graphical user interface (ส่วนต่อประสานกราฟฟิกกับผู้ใช้) ซึ่งไปรวมถึง MATLAB Desktop, command windows, command history และ browsers สำหรับเพื่อใช้ดู help, workspace, files และ search path

2.2.1.2 The MATLAB Mathematical Function Library

ในส่วนนี้จะเป็นที่รวบรวมส่วนของโปรแกรมที่ได้รวบรวมเป็นไฟล์ย่อยๆ ไว้ ไฟล์แต่ละไฟล์จะเป็นไฟล์ที่เขียนขึ้นมาเพื่อใช้กำหนดลักษณะในการคำนวณหรืออัลกอริทึมแบบต่างๆ อาทิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฟังก์ชันง่ายๆ เช่น การบวก ฟังก์ชันตรีโกณมิติพื้นฐาน เช่น sine, cosine ไปจนถึงฟังก์ชันที่มีความซับซ้อนมีขั้นตอนในการคำนวณมากมาย เช่น การหา inverse ของ matrix การหา eigenvalues และ eigenvector หรือ fast fourier transforms เป็นต้น

2.2.1.3 The MATLAB Language

ส่วนนี้จะเป็นภาษาระดับสูงที่ใช้ตัวแปรเป็น matrix หรือ array ซึ่งมีคำสั่งที่ใช้ในการควบคุมการทำงานของโปรแกรม การทำงานของฟังก์ชัน การกำหนดโครงสร้างของตัวแปรแบบต่างๆ กำหนด input และ output ของโปรแกรม ซึ่งทั้งหมดนี้จะช่วยทำให้ในการเขียนโปรแกรม MATLAB แต่ละโปรแกรมจะเป็นโปรแกรมที่มีขนาดเล็กกว่าเมื่อเทียบกับโปรแกรมที่ใช้เพื่อวัตถุประสงค์เดียวกันแต่ผู้ใช้ต้องเขียนฟังก์ชันการทำงานทุกขั้นตอน

2.4.1.4 Handle Graphics

ส่วนนี้จะเป็นส่วนที่ใช้แสดงกราฟฟิกและรูปภาพต่างๆ รวมถึงคำสั่งระดับสูงที่ใช้ในการแสดงผลในสองและสามมิติ การจัดรูปแบบในลักษณะ image processing การทำภาพเคลื่อนไหว นอกจากนี้ในส่วนนี้ยังได้รวมเอาภาษาในระดับต่ำไว้เพื่อให้สามารถปรับแก้รูปภาพต่างๆ ให้เป็นไปตามที่ต้องการได้มากที่สุด รวมถึงการสร้าง Graphic User Interface ภายใต้การทำงานของ MATLAB ด้วย

2.2.1.5 The MATLAB Application Program Interface (API)

ส่วนนี้จะเป็น library ที่ให้สามารถที่จะเขียนโปรแกรมขึ้นในภาษา C หรือ Fortran แล้วมีการเชื่อมโยงการทำงานเข้ากับ MATLAB ซึ่งในส่วนนี้ยังได้รวมถึงการเขียนโปรแกรมขึ้นมาแล้วเรียกฟังก์ชันของ MATLAB ไปใช้งาน (dynamic linking), ซึ่งจะทำให้ MATLAB มีหน้าที่เสมือน engine ในการคำนวณ รวมถึงสามารถที่จะเขียนหรืออ่าน MAT-file ได้ด้วย

2.2.2 การสร้าง GUI ด้วย GUIDE

GUI ย่อมาจาก Graphical User Interface คือ การติดต่อกับผู้ใช้โดยใช้ภาพสัญลักษณ์เป็นการออกแบบส่วนของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ให้มีการโต้ตอบกับผู้ใช้ โดยการใช้ไอคอน รูปภาพและสัญลักษณ์อื่นๆ เพื่อแทนลักษณะต่างๆ ของโปรแกรม แทนที่ผู้ใช้จะพิมพ์คำสั่งต่างๆ ในการทำงาน จึงช่วยทำให้ผู้ใช้งานสามารถทำงานได้ง่าย และรวดเร็วขึ้น ไม่จำเป็นต้องจดจำคำสั่งต่างๆ ของโปรแกรมมากนัก ถือเป็นวิธีการให้ความสะดวกแก่ผู้ใช้คอมพิวเตอร์ ให้ติดต่อสื่อสารกับระบบโดยผ่านทางภาพ เช่น ใช้เมาส์กดเลือกไอคอน แทนการพิมพ์คำสั่งดังแต่ก่อน

MATLAB จะสร้าง GUI อยู่บนหน้าต่างรูปภาพ (figure window) ซึ่งภายในหน้าต่างนี้จะมีส่วนประกอบต่างๆ อยู่ เช่น axes, uicontrol หรือวัตถุอื่นๆ สำหรับใน MATLAB เวอร์ชั่นก่อนหน้านี้สามารถที่จะสร้าง uicontrol, uimenu แบบต่างๆ ลงในหน้าต่างรูปภาพได้แต่เป็นไปด้วยความลำบากเพราะการสร้างเป็น text base ต่อมา MATLAB เวอร์ชั่น 5 ได้สร้าง Graphical User

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Interface Development Environment หรือ GUIDE ขึ้นเพื่อช่วยให้สร้างบันทึก และแก้ไข GUI ได้สะดวกขึ้น

การสร้าง GUI จะประกอบด้วยขั้นตอนสองขั้นตอน

- กำหนดและวางส่วนประกอบต่างๆ ลงบน GUI
- เขียนโปรแกรมเพื่อกำหนดการทำงานของส่วนประกอบต่างๆ ใน GUI

GUIDE นั้นโดยหลักใหญ่แล้วจะมีหน้าที่ในการวางส่วนประกอบที่ต้องการให้มีลงใน GUI จากนั้น GUIDE จะสร้าง M-file ที่บรรจุ handle ของวัตถุหรือ object ทั้งหมดที่สร้างขึ้นรวมทั้งคำสั่งให้ GUI ทำงาน นอกเหนือจากนั้น M-file จะให้แนวทางในการเขียนฟังก์ชัน ที่ทำงานหลังจากผู้ใช้กดเมาส์ปุ่มซ้ายหรือปรับเปลี่ยนค่าของวัตถุนั้น ซึ่งเรียกว่า callback ของวัตถุนั้น

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Channabasayya Mathad, Paramesha และ D. Srinivasa Rao ศึกษาคุณสมบัติของท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยมและการกระจายของสนามของโหมดต่างๆ ในท่อนำคลื่นปลายเปิดรูปทรงสี่เหลี่ยมที่อยู่ในสุญญากาศโดยการสร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรม HFSS ที่ความถี่ในย่านเอ็กซ์แบนด์ ความเข้มของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กแสดงผลในรูปกราฟสามมิติ ตัวแปรต่างๆ ได้แก่ ความยาวคลื่นที่เคลื่อนที่ในท่อนำคลื่น ค่าคงที่การแพร่กระจายของคลื่น และอิมพีแดนซ์คลื่น ถูกวิเคราะห์และเปรียบเทียบระหว่างค่าทางทฤษฎีกับค่าที่ได้จากแบบจำลอง

H. SriKanth Kamath, Rachit Arora และ Vriti Agarwal ศึกษาและสร้างแบบจำลองของท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยมชนิด WR-90 โดยใช้โปรแกรม HFSS อีกทั้งยังวิเคราะห์และเปรียบเทียบระหว่างค่าที่ได้จากแบบจำลองและค่าทางทฤษฎีของค่าคงที่การแพร่ของคลื่นในท่อนำคลื่นและความถี่ตัดสำหรับโหมด TE_{10}, TE_{20}, TE_{01} และ TM_{11} และแสดงผลในเป็นกราฟสองมิติและสามมิติตามลำดับ นอกจากนั้นยังวิเคราะห์ความเข้มของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก

A. Das, M. Sarkar, R. Das, D. Das และ P. Debnath ศึกษาคุณบัติและการกระจายของสนามของโหมดต่างๆ ในท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยมที่อยู่ในสุญญากาศโดยใช้โปรแกรม HFSS นอกจากนั้นยังวิเคราะห์ เปรียบเทียบ และสังเกตความแตกต่างระหว่างค่าจากการจำลองด้วยโปรแกรม HFSS กับค่าทางทฤษฎีซึ่งคำนวณด้วยโปรแกรม MATLAB ของค่าคงที่การกระจายของคลื่น ความยาวคลื่นที่เคลื่อนที่ในท่อนำคลื่น และค่าอิมพีแดนซ์คลื่นในย่านความถี่ซีแบนด์ เอ็กซ์แบนด์ และเคยูแบนด์ การศึกษานี้มีประโยชน์สำหรับการวิเคราะห์การทดลองซึ่งใช้ท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยมในช่วงความถี่ไมโครเวฟต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 การวิเคราะห์ปัญหา

ในโครงงานพิเศษนี้จะเป็นการสร้างแบบจำลอง เพื่อแก้ปัญหาความยุ่งยากในการคำนวณหาค่าสนามในทิศทางต่างๆ และช่วยให้สามารถทำความเข้าใจการส่งผ่านคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมด TE_{01} ถึงโหมด TE_{33} ภายในท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยมได้ง่ายขึ้น ซึ่งผู้ใช้งานโปรแกรมสามารถเลือกจำลองโดยการป้อนอินพุตจะเป็นการป้อนตัวเลขจากแป้นพิมพ์ จากนั้นประมวลผลตามสมการทางคณิตศาสตร์ที่ได้จากการวิเคราะห์ และผลลัพธ์จะแสดงในรูปของกราฟสามมิติ

3.2 การศึกษาการส่งผ่านคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยม

คลื่นที่ส่งผ่านไปตามท่อนำคลื่นได้นั้นจะมีคลื่น TE และคลื่น TM ซึ่งทั้งสองคลื่นนี้จะมีผลเฉลยที่มีรูปแบบการกระจายของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ไม่ซ้ำแบบกัน โดยทั่วไปจะระบุในรูป TE_{mn} และ TM_{mn} ซึ่งหมายถึงโหมด TE อันดับ mn และโหมด TM อันดับ mn ตามลำดับ

จากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่แสดงไว้ในสมการสำหรับ TM_{mn} จะเห็นได้ว่า m และ n จะเป็นศูนย์ไม่ได้ เพราะจะทำให้ E_z เป็นศูนย์ และจะทำให้ส่วนประกอบอื่นๆ เป็นศูนย์ด้วย

$$E_z(x,y,z) = E_0 \sin\left(\frac{m\pi}{a}x\right)\sin\left(\frac{n\pi}{b}y\right)e^{-j\beta z}$$

$$E_x = -\frac{1}{k^2}\left(\gamma\frac{\partial E_z}{\partial x}\right) = -\frac{j\beta}{k^2}\left(\frac{m\pi}{a}\right)E_0\cos\left(\frac{m\pi}{a}x\right)\sin\left(\frac{n\pi}{b}y\right)e^{-j\beta z}$$

$$E_y = -\frac{1}{k^2}\left(\gamma\frac{\partial E_z}{\partial y}\right) = -\frac{j\beta}{k^2}\left(\frac{n\pi}{b}\right)E_0\sin\left(\frac{m\pi}{a}x\right)\cos\left(\frac{n\pi}{b}y\right)e^{-j\beta z}$$

$$H_x = \frac{1}{k^2}\left(j\omega\varepsilon\frac{\partial E_z}{\partial y}\right) = \frac{j\omega\varepsilon}{k^2}\left(\frac{n\pi}{b}\right)E_0\sin\left(\frac{m\pi}{a}x\right)\cos\left(\frac{n\pi}{b}y\right)e^{-j\beta z}$$

$$H_y = -\frac{1}{k^2}\left(j\omega\varepsilon\frac{\partial E_z}{\partial x}\right) = -\frac{j\omega\varepsilon}{k^2}\left(\frac{m\pi}{a}\right)E_0\cos\left(\frac{m\pi}{a}x\right)\sin\left(\frac{n\pi}{b}y\right)e^{-j\beta z}$$

ส่วนโหมด TE_{mn} นั้น m และ n จะเป็นศูนย์พร้อมกันไม่ได้ เพราะจำทำให้เป็นค่าคงที่ และจะมีผลทำให้ส่วนประกอบอื่นๆ เป็นศูนย์หมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$H_z(x,y,z) = H_0 \cos\left(\frac{m\pi}{a}x\right)\cos\left(\frac{n\pi}{b}y\right)e^{-j\beta z}$$

$$E_x = -\frac{1}{k^2}\left(j\omega\mu\frac{\partial H_z}{\partial y}\right) = \frac{j\omega\mu}{k^2}\left(\frac{n\pi}{b}\right)H_0 \cos\left(\frac{m\pi}{a}x\right)\sin\left(\frac{n\pi}{b}y\right)e^{-j\beta z}$$

$$E_y = \frac{1}{k^2}\left(j\omega\mu\frac{\partial H_z}{\partial x}\right) = \frac{j\omega\mu}{k^2}\left(\frac{m\pi}{a}\right)H_0 \sin\left(\frac{m\pi}{a}x\right)\cos\left(\frac{n\pi}{b}y\right)e^{-j\beta z}$$

$$H_x = -\frac{1}{k^2}\left(-\gamma\frac{\partial H_z}{\partial x}\right) = \frac{j\beta}{k^2}\left(\frac{m\pi}{a}\right)H_0 \sin\left(\frac{m\pi}{a}x\right)\cos\left(\frac{n\pi}{b}y\right)e^{-j\beta z}$$

$$H_y = -\frac{1}{k^2}\left(\gamma\frac{\partial H_z}{\partial y}\right) = \frac{j\beta}{k^2}\left(\frac{n\pi}{b}\right)H_0 \cos\left(\frac{m\pi}{a}x\right)\sin\left(\frac{n\pi}{b}y\right)e^{-j\beta z}$$

อิมพีแดนซ์คลื่น คือ อิมพีแดนซ์ของตัวกลางที่คลื่นส่งผ่านซึ่งเท่ากับอัตราส่วนระหว่างสนามไฟฟ้ากับสนามแท่เหล็กในระนาบตั้งฉากกับการเคลื่อนที่

$$Z = \frac{E_x}{H_y} = \frac{E_y}{H_x}$$

โดยค่าอิมพีแดนซ์ในโหมด TM และ TE จะหาได้จาก

$$Z_{TM} = \frac{\gamma}{\sigma + j\omega\varepsilon}$$

$$Z_{TM} = \frac{j\omega\varepsilon}{\gamma}$$

ความถี่ตัด (cut-off frequency) คือ ความถี่ที่ต่ำที่สุดที่คลื่นสามารถเคลื่อนที่ไปในท่อนำคลื่น ค่าความถี่นี้จะขึ้นอยู่กับโหมดของคลื่น ดังสมการ

$$f_c = \frac{1}{2\sqrt{\varepsilon\mu}}\sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2}$$

โดยโหมดที่มีความถี่ตัดน้อยที่สุดเรียกว่าโหมดโดมิแนนท์ (dominant mode) สำหรับท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยมโหมดโดมิแนนท์คือโหมด TE_{01}

นอกจากนั้นจากสมการข้างต้นยังสามารถหาค่าความยาวคลื่นตัด (cut-off wavelength) ซึ่งเป็นความยาวคลื่นที่ยาวที่สุดที่สามารถเดินทางผ่านท่อนำคลื่น ได้จากสมการ

$$\lambda_c = \frac{v_0}{f_c} = 2\sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การพัฒนาส่วนติดต่อกับผู้ใช้ด้วยโปรแกรม MATLAB (MATLAB Graphic User Interface; MATLAB GUI)

ส่วนติดต่อกับผู้ใช้งาน (Graphical User Interface, GUI) เป็นเครื่องมือในโปรแกรม MATLAB ประเภทหนึ่งที่ใช้หลักการรับข้อมูลและประมวลผลจากเหตุการณ์ เช่น การคลิกเมาส์บนปุ่มกด (Pushbutton) การป้อนค่าลงในช่องรับค่า (Edit Box) เป็นต้น การทำงานของโปรแกรมจึงขึ้นอยู่กับผู้ใช้งานที่มีการป้อนข้อมูลหรือสั่งการผ่านองค์ประกอบของ GUI โดยทำงานตามชุดคำสั่งการคำนวณของโปรแกรม MATLAB ที่เขียนไว้เพื่อตอบสนองต่อเหตุการณ์นั้น โดยผลลัพธ์ที่ต้องการจะแสดงในรูปแบบใดขึ้นอยู่กับการใช้ชุดคำสั่งที่เขียนไว้ เช่น แสดงผลออกทางจอภาพ หรือส่งข้อมูลผ่านพอร์ตของคอมพิวเตอร์เพื่อนำไปใช้งาน เป็นต้น

การสร้าง GUI ซึ่งเป็นองค์ประกอบชนิดหนึ่งภายใต้หน้าต่าง Figure ทำได้ 2 รูปแบบ

- รูปแบบที่ 1 ใช้เครื่องมือช่วยในการสร้างจาก MATLAB Graphical User Interface Development Environment (GUIDE)
- รูปแบบที่ 2 ใช้ชุดคำสั่งการสร้างโดยไม่ใช้ GUIDE โดยใช้ Text Editor ใน MATLAB

ในโครงงานพิเศษนี้ใช้ MATLAB GUIDE เป็นเครื่องมือในการสร้างและพัฒนาโปรแกรม เนื่องจากช่วยให้แก้ไขส่วน GUI และเขียนคำสั่งใช้งานได้พร้อมกัน โดยหน้าต่าง MATLAB GUIDE จะประกอบด้วย 3 ส่วน ดังรูปที่ 3.1

- ส่วนที่ 1 ส่วนกำหนดคุณสมบัติองค์ประกอบ GUI
- ส่วนที่ 2 องค์ประกอบสำหรับสร้าง GUI
- ส่วนที่ 3 พื้นที่การสร้าง GUI

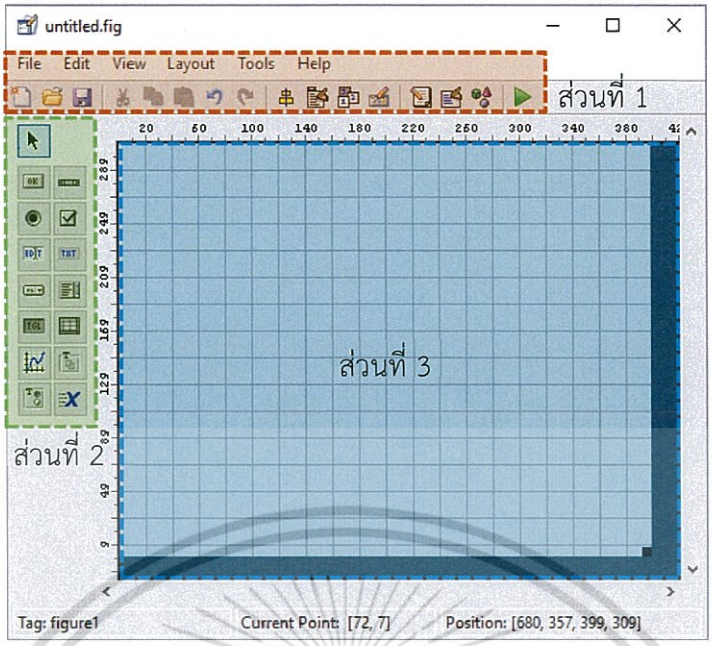
สำหรับกำหนดรายละเอียดขององค์ประกอบ GUI ในรูปแบบของหน้าต่างรูปภาพและ M-File สำหรับเขียนคำสั่ง MATLAB ให้ทำงานสัมพันธ์กับ Fig File โดยส่วนประกอบสำคัญของ GUI ที่ใช้งานร่วมกับคำสั่งของ MATLAB มี 2 ส่วนประกอบ คือ

1) ตัวแปร Handles ที่เก็บตัวเลขสำหรับอ้างอิงเพื่อชี้ไปที่วัตถุคล้ายกับ Pointer ในโปรแกรมภาษาซี เพื่อกำหนดค่าคุณสมบัติทั้งหมดของวัตถุนั้น เมื่อสร้าง GUI ด้วย GUIDE ตัวแปร Handle จะถูกสร้างขึ้นอัตโนมัติพร้อมกับวัตถุนั้น

2) ฟังก์ชันเรียกกลับ (Callback Function) เป็นฟังก์ชั่นที่เก็บค่าตอบสนองแต่ละเหตุการณ์ เช่น การกด การลากเมาส์ โดยมีตัวแปรย่อยภายในฟังก์ชั่นเรียกกลับสำหรับทำหน้าที่เฉพาะ ได้แก่

- hObject เป็นตัวแปร Handle หรือตัวชี้วัตถุที่ใช้เป็นฟังก์ชั่นเรียกกลับ
- eventdata สำหรับเก็บข้อมูล ได้แก่ การกดแป้นพิมพ์ การเลือกวัตถุ เป็นต้น
- handles สำหรับเก็บค่าตัวเลขอ้างอิงเพื่อกำหนดคุณสมบัติของวัตถุ

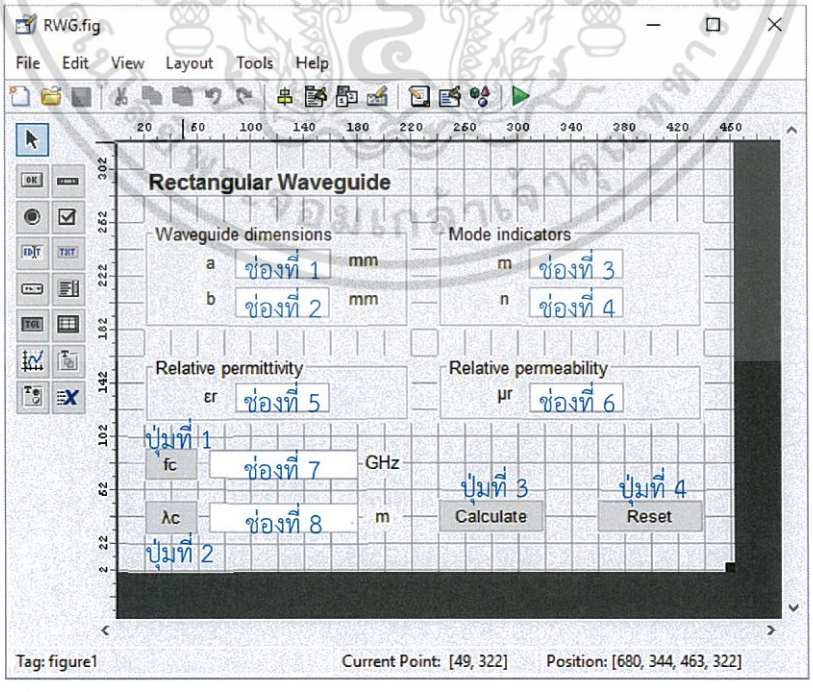
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 หน้าต่าง MATLAB GUIDE สำหรับสร้าง GUI

3.4 การออกแบบสร้างโปรแกรม

โปรแกรมจำลองของการส่งผ่านคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยม โหมด TE_{01} – TE_{33} ออกแบบ User Interface ของโปรแกรมที่ต้องการโดยใช้องค์ประกอบจาก MATLAB GUI มาจัดวางดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 การออกแบบ User Interface ของโปรแกรม

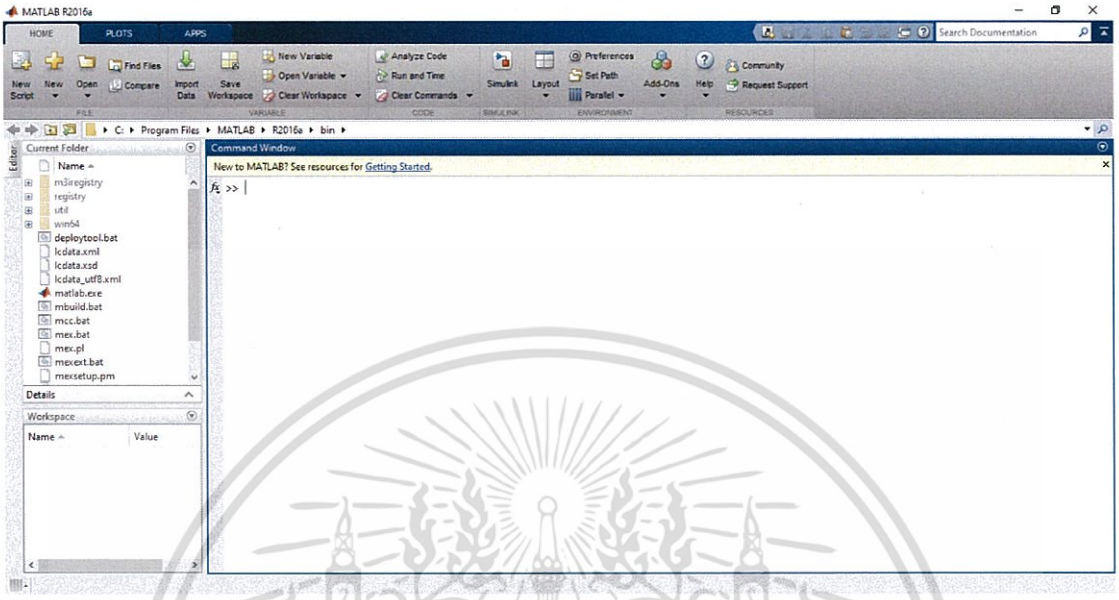
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ส่วนป้อนข้อมูลขนาดด้านกว้าง (a) ของท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยม (ช่องที่ 1 ในรูปที่ 3.2)
- ส่วนป้อนข้อมูลขนาดด้านสูง (b) ของท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยม (ช่องที่ 2 ในรูปที่ 3.2)
- ส่วนป้อนข้อมูลค่า m และ n (ช่องที่ 3 และ 4 ในรูปที่ 3.2)
- ส่วนป้อนข้อมูลค่า relative permittivity (ช่องที่ 5 ในรูปที่ 3.2)
- ส่วนป้อนข้อมูลค่า relative permeability (ช่องที่ 6 ในรูปที่ 3.2)
- ส่วนแสดงข้อมูลค่าความถี่ตัด (cut-off frequency) (ช่องที่ 7 ในรูปที่ 3.2)
- ส่วนแสดงข้อมูลค่าความยาวคลื่นตัด (cut-off wavelength) (ช่องที่ 8 ในรูปที่ 3.2)
- เมนูคำสั่งสำหรับคำนวณค่าความถี่ตัด (ปุ่มที่ 1 ในรูปที่ 3.2)
- เมนูคำสั่งสำหรับคำนวณค่าความยาวคลื่นตัด (ปุ่มที่ 2 ในรูปที่ 3.2)
- เมนูคำสั่งสำหรับจำลองของการส่งผ่านคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยม โหมด TE_{01} – TE_{33} (ปุ่มที่ 3 ในรูปที่ 3.2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

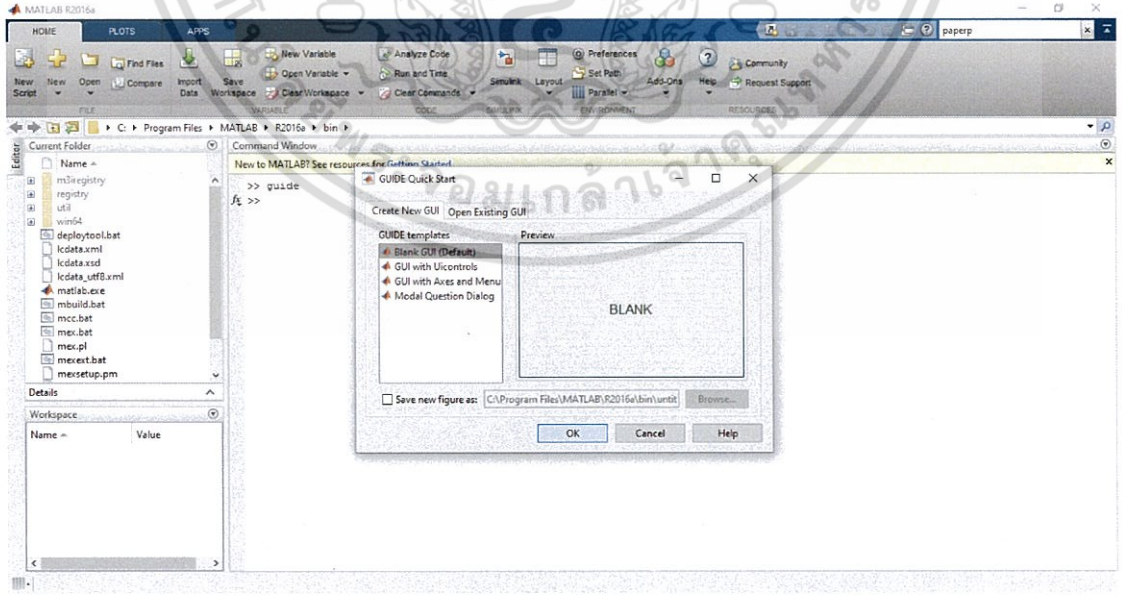
3.5 ขั้นตอนการสร้างโปรแกรม

1) เปิดโปรแกรม MATLAB ให้อยู่ในสถานะที่พร้อมใช้งานดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 หน้าต่างโปรแกรม MATLAB

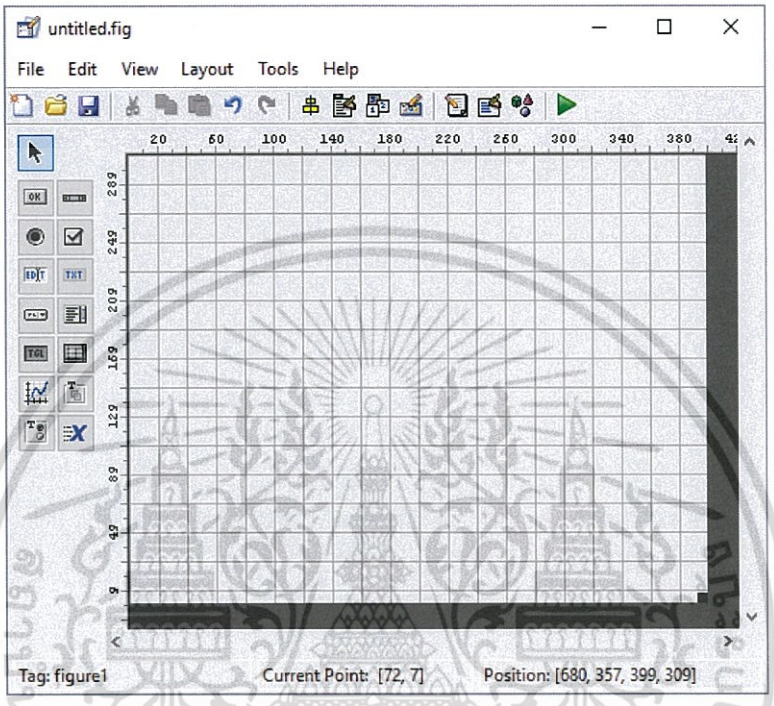
2) พิมพ์คำสั่ง “GUIDE” ที่ Command Window ของ MATLAB เพื่อเรียกโปรแกรมการออกแบบ MATLAB GUIDE แสดงดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 การเรียกใช้งานโปรแกรม MATLAB GUIDE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

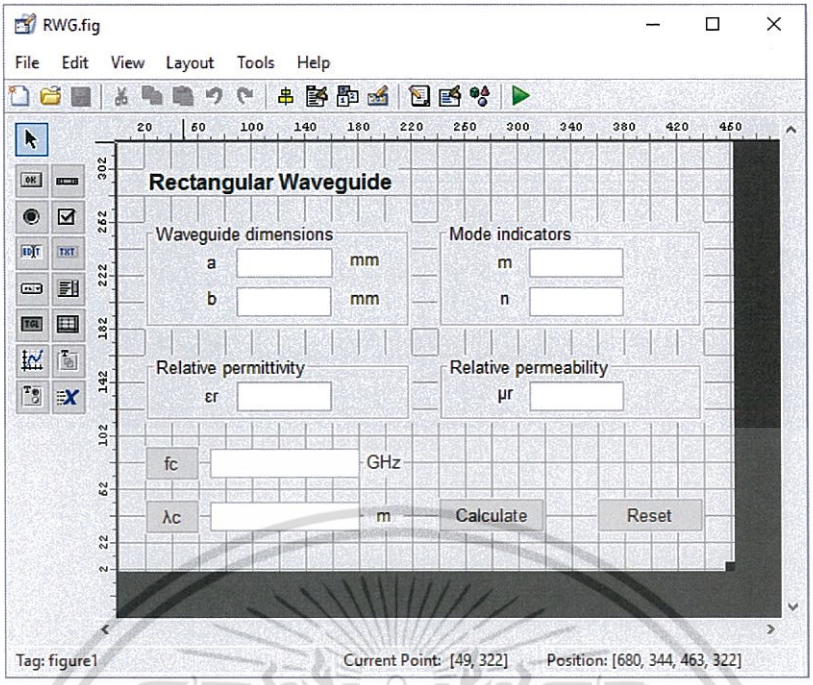
3) จากรูปที่ 3.4 หน้าต่างของ GUIDE Quick Start จะประกอบด้วย 2 แท็บ คือ Create New GUI และ Open Existing GUI เลือกแท็บ “Create New GUI” และเลือก “ Blank GUI (default)” จากนั้นเลือกกดปุ่ม “OK” จะได้หน้าต่าง GUI สำหรับจัดการองค์ประกอบโปรแกรม ดังรูปที่ 3.5 โดยพื้นที่ที่ใช้วางองค์ประกอบสามารถปรับขนาดได้โดยใช้เมาส์ลากที่จุดมุมขวาล่าง



รูปที่ 3.5 หน้าต่างการออกแบบ GUI

4) เพิ่มองค์ประกอบสู่พื้นที่ออกแบบ GUI ดังรูปที่ 3.6 กำหนดคุณสมบัติแต่ละองค์ประกอบผ่านคำสั่ง “Property Inspector” โดยการเลือกที่เมนู View และ Property Inspector กำหนดคุณสมบัติและองค์ประกอบดังตารางที่ 3.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 ตำแหน่งแต่ละองค์ประกอบของโปรแกรม

5) การกำหนดคุณสมบัติองค์ประกอบของโปรแกรมหลักผ่านคำสั่ง (“Property Inspector”)

ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบของโปรแกรม

ลำดับ	องค์ประกอบ	Tag อ้างอิง	รายละเอียด/หน้าที่
1	Edit Text	inputa	ส่วนป้อนข้อมูลขนาดด้านกว้าง (a) ของท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยม
2	Edit Text	inputb	ส่วนป้อนข้อมูลขนาดด้านสูง (b) ของท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยม
3	Edit Text	inputm	ส่วนป้อนข้อมูลค่า m
4	Edit Text	inputn	ส่วนป้อนข้อมูลค่า n
5	Edit Text	inputer	ส่วนป้อนข้อมูลค่า relative permittivity
6	Edit Text	inputur	ส่วนป้อนข้อมูลค่า relative permeability
7	Push Button	freq	สั่งคำนวณค่าความถี่ตัด
8	Push Button	leng	สั่งคำนวณค่าความยาวคลื่นตัด
9	Edit Text	outputfc	ส่วนแสดงข้อมูลค่าความถี่ตัด
10	Edit Text	outputlc	ส่วนแสดงข้อมูลค่าความยาวคลื่นตัด
11	Push Button	Cal	สั่งโปรแกรมคำนวณและสร้างแบบจำลอง
12	Push Button	Reset	สั่งล้างข้อมูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6 การพัฒนาโปรแกรม

คำสั่งหรือโปรแกรมที่ใช้สำหรับเขียนควบคุมองค์ประกอบแต่ละส่วนจะจัดเก็บอยู่ในรูป M-file โดยข้อมูลใน M-file มีรายละเอียดองค์ประกอบแต่ละส่วนประกอบอยู่อย่างครบถ้วน การเขียนโปรแกรมควบคุมองค์ประกอบจาก MATLAB GUIDE ทำโดยเลือกเมนู “View” และเลือกคำสั่ง “editor” จะปรากฏหน้าต่างสำหรับพัฒนาโปรแกรมซึ่งรวมตัวแปรและฟังก์ชั่นที่กำหนดไว้จาก MATLAB GUI

```
function inputa_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to inputa (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of inputa as text
%        str2double(get(hObject,'String')) returns contents of
inputa as a double
a = get(hObject,'string')
global aaa
aaa = str2double(a)
```

ช่วงที่ 1

จากคำสั่งในช่วงที่ 1 เป็นคำสั่งรับข้อมูลขนาดด้านกว้าง (a) ของท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยมจาก Edit text ช่องที่ 1 ในรูปที่ 3.2 ค่าที่รับผ่านทาง Edit text จะเป็นแบบ String โดยประกาศตัวแปรแบบ Global สำหรับใช้งานภายในฟังก์ชัน จากนั้นต้องปรับข้อมูลให้เป็นแบบตัวเลขด้วยฟังก์ชัน str2double

```
function inputb_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to inputb (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of inputb as text
%        str2double(get(hObject,'String')) returns contents of
inputb as a double
b = get(hObject,'string')
global bbb
bbb = str2double(b)
```

ช่วงที่ 2

จากคำสั่งในช่วงที่ 2 เป็นคำสั่งรับข้อมูลขนาดด้านสูง (b) ของท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยมจาก Edit text ช่องที่ 2 ในรูปที่ 3.2 ค่าที่รับผ่านทาง Edit text จะเป็นแบบ String โดยประกาศตัวแปรแบบ Global สำหรับใช้งานภายในฟังก์ชัน จากนั้นต้องปรับข้อมูลให้เป็นแบบตัวเลขด้วยฟังก์ชัน str2double

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
function inputm_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to inputm (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of inputm as text
%        str2double(get(hObject,'String')) returns contents of
inputm as a double
m = get(hObject,'string')
global mmm
mmm = str2double(m)
```

ช่วงที่ 3

จากคำสั่งในช่วงที่ 3 เป็นคำสั่งรับข้อมูลค่า m จาก Edit text ช่องที่ 3 ในรูปที่ 3.2 ค่าที่รับผ่านทาง Edit text จะเป็นแบบ String โดยประกาศตัวแปรแบบ Global สำหรับใช้งานภายในฟังก์ชัน จากนั้นต้องปรับข้อมูลให้เป็นแบบตัวเลขด้วยฟังก์ชัน str2double

```
function inputn_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to inputn (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of inputn as text
%        str2double(get(hObject,'String')) returns contents of
inputn as a double
n = get(hObject,'string')
global nnn
nnn = str2double(n)
```

ช่วงที่ 4

จากคำสั่งในช่วงที่ 4 เป็นคำสั่งรับข้อมูล ค่า n จาก Edit text ช่องที่ 4 ในรูปที่ 3.2 ค่าที่รับผ่านทาง Edit text จะเป็นแบบ String โดยประกาศตัวแปรแบบ Global สำหรับใช้งานภายในฟังก์ชัน จากนั้นต้องปรับข้อมูลให้เป็นแบบตัวเลขด้วยฟังก์ชัน str2double

```
function inputer_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to inputer (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of inputer as text
%        str2double(get(hObject,'String')) returns contents of
inputer as a double
er = get(hObject,'string')
global err
err = str2double(er)
```

ช่วงที่ 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากคำสั่งในช่วงที่ 5 เป็นคำสั่งรับข้อมูล ค่า relative permittivity (ε_r) จาก Edit text ช่องที่ 5 ในรูปที่ 3.2 ค่าที่รับผ่านทาง Edit text จะเป็นแบบ String โดยประกาศตัวแปรแบบ Global สำหรับใช้งานภายในฟังก์ชัน จากนั้นต้องปรับข้อมูลให้เป็นแบบตัวเลขด้วยฟังก์ชัน str2double

```
function inputur_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to inputur (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of inputur as text
%        str2double(get(hObject,'String')) returns contents of
inputur as a double
ur = get(hObject,'string')
global urr
urr = str2double(ur)
```

ช่วงที่ 6

จากคำสั่งในช่วงที่ 6 เป็นคำสั่งรับข้อมูล ค่า relative permeability (μ_r) จาก Edit text ช่องที่ 6 ในรูปที่ 3.2 ค่าที่รับผ่านทาง Edit text จะเป็นแบบ String โดยประกาศตัวแปรแบบ Global สำหรับใช้งานภายในฟังก์ชัน จากนั้นต้องปรับข้อมูลให้เป็นแบบตัวเลขด้วยฟังก์ชัน str2double

```
function freq_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to freq (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
global aaa
global bbb
global mmm
global nnn
global err
global urr
global fc
fc = cutofffreq(aaa,bbb,mmm,nnn,err,urr)
set(handles.outputfc,'string',fc)


function fc = cutofffreq(a,b,m,n,er,ur)
e0 = 8.8542*10^-12
u0 = 1.2566*10^-6
e = e0*er
u = u0*ur
fc =
((1/(2*pi*sqrt(e*u)))*(sqrt((m*pi/a*1000)^2+(n*pi/b*1000)^2)))/10^9
```

ช่วงที่ 7

ช่วงที่ 8

จากคำสั่งในช่วงที่ 7 เป็นคำสั่งนำค่าที่รับผ่านทาง Edit text ช่องที่ 1, 2, 3, 4, 5 และ 6 ในรูปที่ 3.2 โดยอาศัยค่าที่เก็บตัวแปรแบบ Global เดิมจากคำสั่งในช่วงที่ 1 ถึงช่วงที่ 6 แล้วนำไปคำนวณหาค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความถี่ตัด ด้วยฟังก์ชัน cutofffreq จากนั้นแสดงค่าความถี่ตัด (f_c) บนช่องที่ 7 ในรูปที่ 3.2 โดยใช้คำสั่ง string

จากคำสั่งในช่วงที่ 8 เป็นคำสั่งที่อยู่ภายใต้ฟังก์ชัน cutofffreq ซึ่งใช้คำนวณค่าความถี่ตัด โดยกำหนดค่าคงที่ 2 ค่า ได้แก่ vacuum permittivity (ε_0) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 8.8542×10^{-12} F/m และ vacuum permeability (μ_0) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.2566×10^{-6} H/m

```
function leng_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to leng (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
fcc = str2double(get(handles.outputfc, 'string'))
c = 2.998*10^8
lc = c/(fcc*10^9)
set(handles.outputlc,'string',lc)
```

ช่วงที่ 9

จากคำสั่งในช่วงที่ 9 เป็นคำสั่งรับข้อมูลค่าจาก Edit text ช่องที่ 7 ในรูปที่ 3.2 ค่าที่รับผ่านทาง Edit text จะเป็นแบบ String จากนั้นปรับข้อมูลให้เป็นแบบตัวเลขด้วยฟังก์ชัน str2double กำหนดค่าคงที่ c = 2.998×10^8 แล้วคำนวณค่าความยาวคลื่นตัด จากนั้นแสดงค่าที่ได้บนช่องที่ 8 ในรูปที่ 3.2 โดยใช้คำสั่ง string

```
function cal_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to cal (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
  global aaa
  global bbb
  global mmm
  global nnn
  calculate(aaa,bbb,mmm,nnn);
```

ช่วงที่ 10

จากคำสั่งในช่วงที่ 10 เป็นคำสั่งนำค่าที่รับผ่านทาง Edit text ช่องที่ 1, 2, 3 และ 4 ในรูปที่ 3.2 โดยอาศัยค่าที่เก็บตัวแปรแบบ Global เดิมจากคำสั่งในช่วงที่ 1 – 4 แล้วนำค่าไปคำนวณด้วยฟังก์ชัน calculate

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
function reset_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to reset (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
set(handles.inputa, 'String', '');
set(handles.inputb, 'String', '');
set(handles.inputm, 'String', '');
set(handles.inputn, 'String', '');
set(handles.inputer, 'String', '');
set(handles.inputur, 'String', '');
set(handles.outputfc, 'String', '');
set(handles.outputlc, 'String', '');
clear all;
```

ช่วงที่ 11

จากคำสั่งในช่วงที่ 11 เป็นคำสั่งล้างข้อมูลใน Edit text ช่องที่ 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 และ 8 ในรูปที่ 3.2 และล้างข้อมูลทั้งหมดโดยใช้คำสั่ง clear all

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

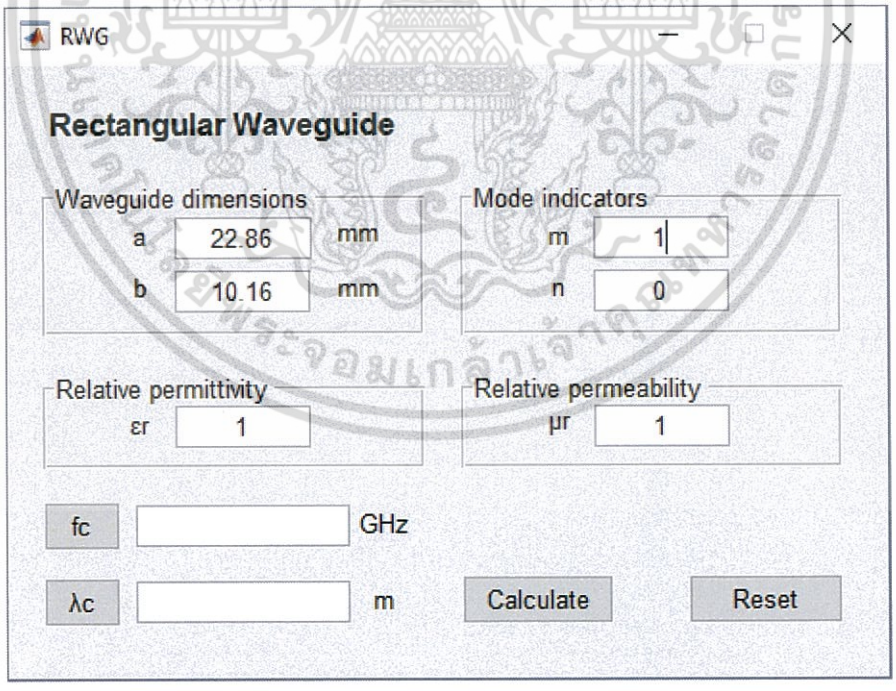
ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

4.1 ผลการพัฒนาโปรแกรม

โปรแกรมที่พัฒนาขึ้น (ดังรูปที่ 4.1) ประกอบด้วย Figure file จำนวน 1 ไฟล์ และ M-file จำนวน 4 ไฟล์ ดังนี้

- Figure file ของหน้าต่าง GUI (ไฟล์ชื่อ RWG.fig)
- M-file ของหน้าต่าง GUI (ไฟล์ชื่อ RWG.m)
- M-file ของฟังก์ชันที่ใช้จำลองคลื่นในท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยม โหมด TE_{01} – TE_{33} (ไฟล์ชื่อ calculate.m)
- M-file ของฟังก์ชันที่ใช้หาค่า m และ n (ไฟล์ชื่อ modefinders.m)
- M-file ของฟังก์ชันที่ใช้จัดหน้ากราฟ (ไฟล์ชื่อ plotsetting.m)

โดยโค้ดต่างๆ จะกล่าวถึงในภาคผนวกต่อไป



รูปที่ 4.1 โปรแกรมสำหรับจำลองคลื่นในท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยม โหมด TE_{01} – TE_{33}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ผลการคำนวณค่าความถี่ตัด

ตารางที่ 4.1 ค่าความถี่ตัดที่ได้จากโปรแกรมเปรียบเทียบกับค่าความถี่ตัดของท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยมมาตรฐานขนาดต่างๆ

ชื่อ	ขนาดภายในท่อนำคลื่น (mm)		ความถี่ตัด โหมด TE_{10} (GHz)		ความถี่ตัด โหมด TE_{01} (GHz)	
	a	b	ค่ามาตฐาน	ค่าจากโปรแกรม	ค่ามาตฐาน	ค่าจากโปรแกรม
WR2300	584.2	292.1	0.257	0.256587	0.513	0.513175
WR2100	533.4	266.7	0.281	0.281024	0.562	0.562049
WR1800	457.2	228.6	0.328	0.327862	0.656	0.655723
WR1500	381	190.5	0.393	0.393434	0.787	0.786868
WR1150	292.1	146.05	0.513	0.513175	1.026	1.02635
WR975	247.65	123.825	0.605	0.605283	1.211	1.21057
WR770	195.58	97.79	0.766	0.76643	1.533	1.53286
WR650	165.1	82.55	0.908	0.907925	1.816	1.81585
WR510	129.54	64.77	1.157	1.15716	2.314	2.31432
WR430	109.22	54.61	1.372	1.37244	2.745	2.74489
	88.9	44.45	1.686	1.68615	3.372	3.37229
WR340	86.36	43.18	1.736	1.73574	3.471	3.47148
WR284	72.136	34.036	2.078	2.078	4.156	4.40411
	60.2488	28.4988	2.488	2.48799	4.976	5.25981
WR229	58.166	29.083	2.577	2.57708	5.154	5.15416
WR187	47.5488	22.1488	3.153	3.15252	6.305	6.76779
WR159	40.386	20.193	3.712	3.71164	7.423	7.42328
WR137	34.8488	15.7988	4.301	4.30139	8.603	9.48796
WR112	28.4988	12.6238	5.26	5.25981	10.52	11.8743
WR102	25.908	12.954	5.786	5.78579	11.571	11.5716
WR90	22.86	10.16	6.557	6.55723	13.114	14.7538
WR75	19.05	9.525	7.869	7.86868	15.737	15.7374
WR62	15.7988	7.8994	9.488	9.48796	18.976	18.9759
WR51	12.954	6.477	11.572	11.5716	23.143	23.1432

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

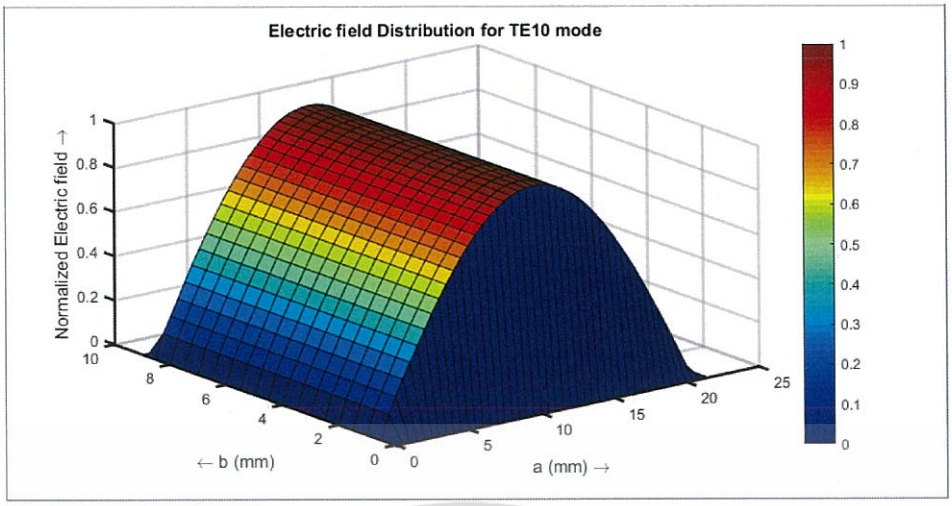
ตารางที่ 4.1 (ต่อ) ค่าความถี่ตัดที่ได้จากโปรแกรมเปรียบเทียบกับค่าความถี่ตัดของท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยมมาตรฐานขนาดต่างๆ

ชื่อ	ขนาดภายในท่อนำคลื่น (mm)		ความถี่ตัด โหมด TE_{10} (GHz)		ความถี่ตัด โหมด TE_{01} (GHz)	
	a	b	ค่ามาตฐาน	ค่าจากโปรแกรม	ค่ามาตฐาน	ค่าจากโปรแกรม
WR42	10.668	4.318	14.051	14.0512	28.102	34.7148
WR34	8.636	4.318	17.357	17.3574	34.715	34.7148
WR28	7.112	3.556	21.077	21.07680	42.154	42.1536
WR22	5.6896	2.8448	26.346	26.346	52.692	52.692
WR19	4.7752	2.3876	31.391	31.391	62.782	62.782
WR15	3.7592	1.8796	39.875	39.8751	79.75	79.7501
WR12	3.0988	1.5494	48.373	48.373	96.746	96.7461
WR10	2.54	1.27	59.015	59.0151	118.03	118.03
WR8	2.032	1.016	73.768	73.7689	147.536	147.538
WR6	1.651	0.8255	90.791	90.7925	181.583	181.585
WR7	1.651	0.8255	90.791	90.7925	181.583	181.585
WR5	1.2954	0.6477	115.714	115.716	231.429	231.432
WR4	1.0922	0.5461	137.243	137.244	274.485	274.489
WR3	0.8636	0.4318	173.571	173.574	347.143	347.148

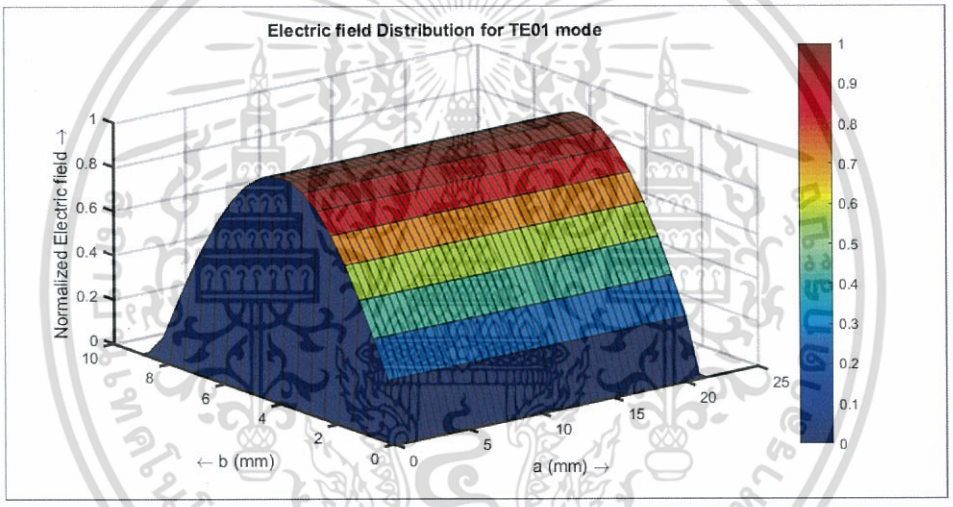
4.3 ผลการจำลองของการส่งผ่านคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยม โหมด TE_{01} – TE_{33}

เมื่อป้อนข้อมูลขนาดของท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยมเบอร์ WR90 กล่าวคือ ต่าขนาดด้านกว้าง (a) = 22.86 mm ต่าขนาดด้านสูง (b) = 10.16 mm ค่า relative permittivity (ε_r) = 1 และ ค่า relative permeability (μ_r) = 1 โดยกำหนดโหมด TE_{mn} ตั้งแต่ TE_{01} – TE_{33} จะได้การกระจายของสนามไฟฟ้าในรูปกราฟสามมิติดังนี้

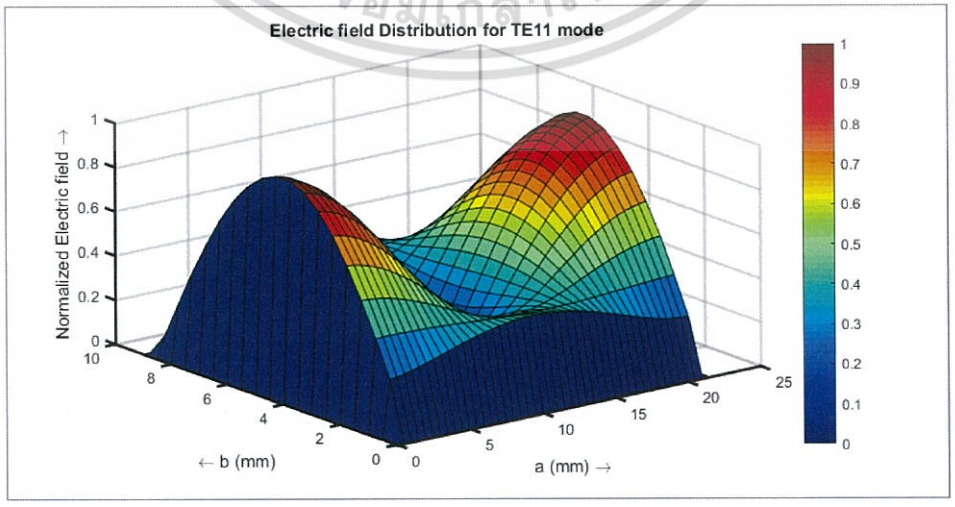
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 คลื่นโหมด TE_{10}

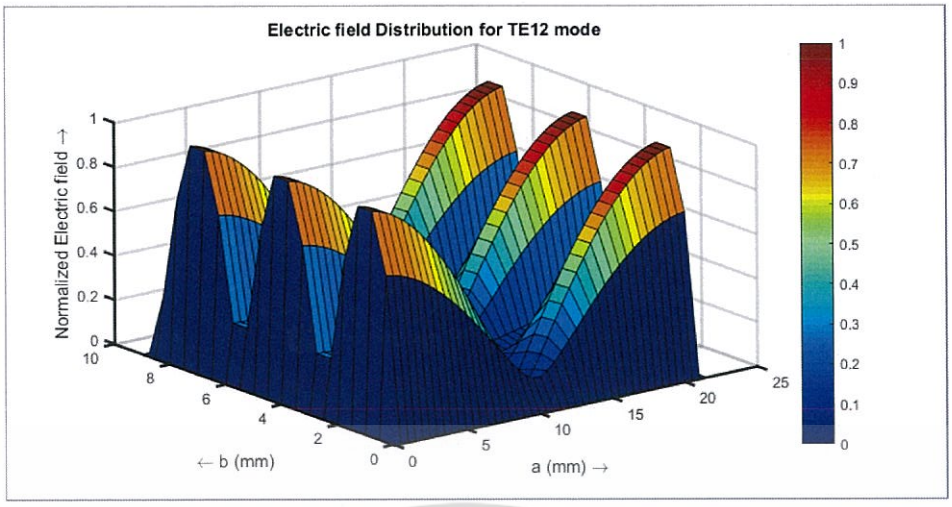


รูปที่ 4.3 คลื่นโหมด TE_{01}

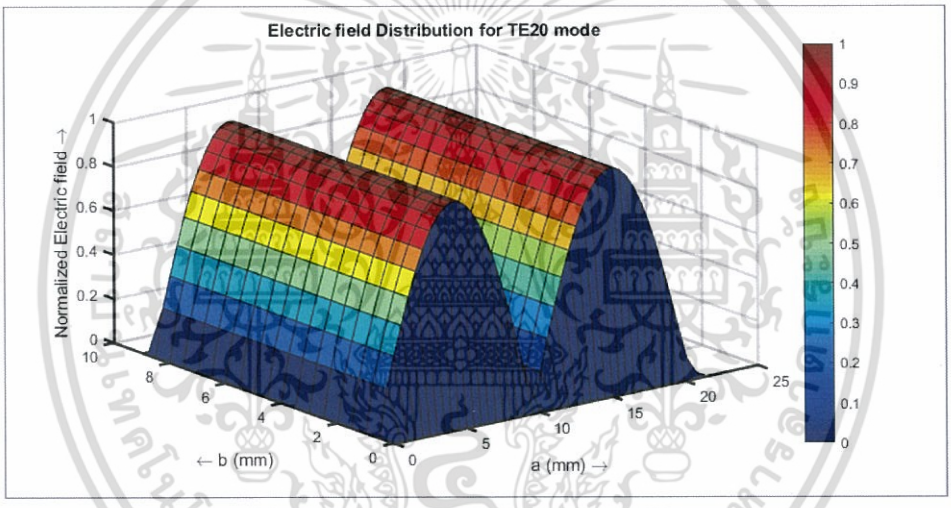


รูปที่ 4.4 คลื่นโหมด TE_{11}

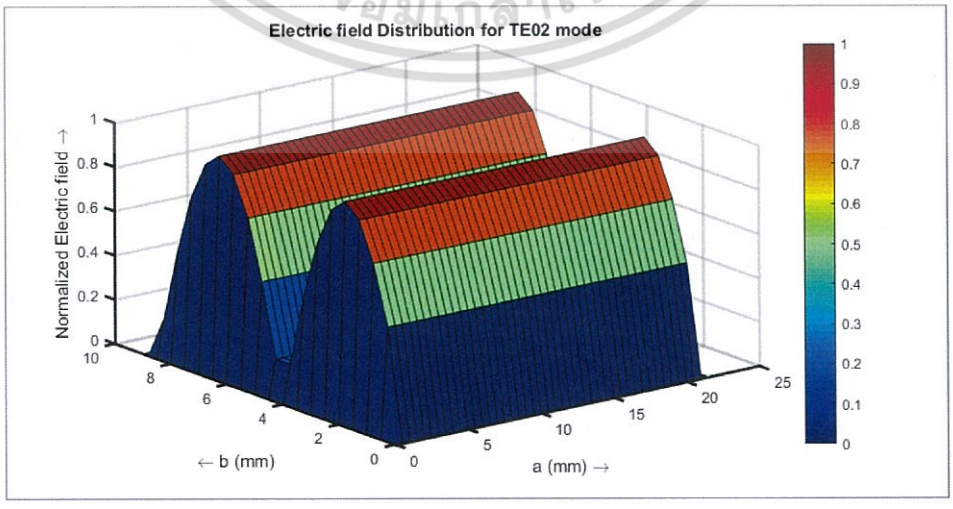
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 คลื่นโหมด TE_{12}

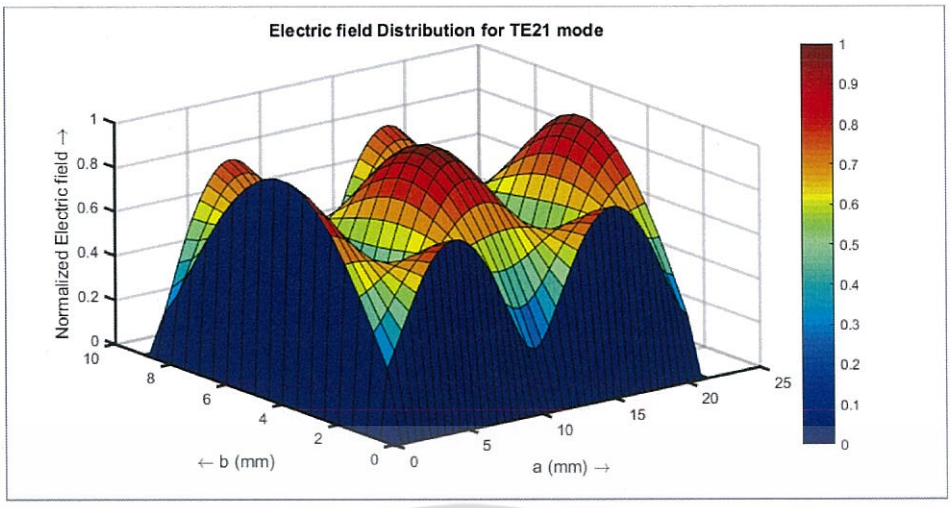


รูปที่ 4.6 คลื่นโหมด TE_{20}

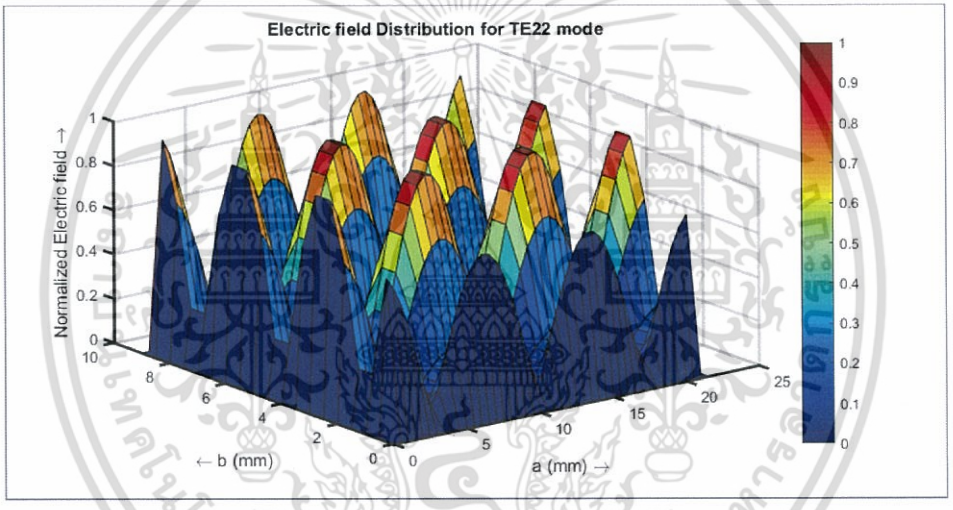


รูปที่ 4.7 คลื่นโหมด TE_{02}

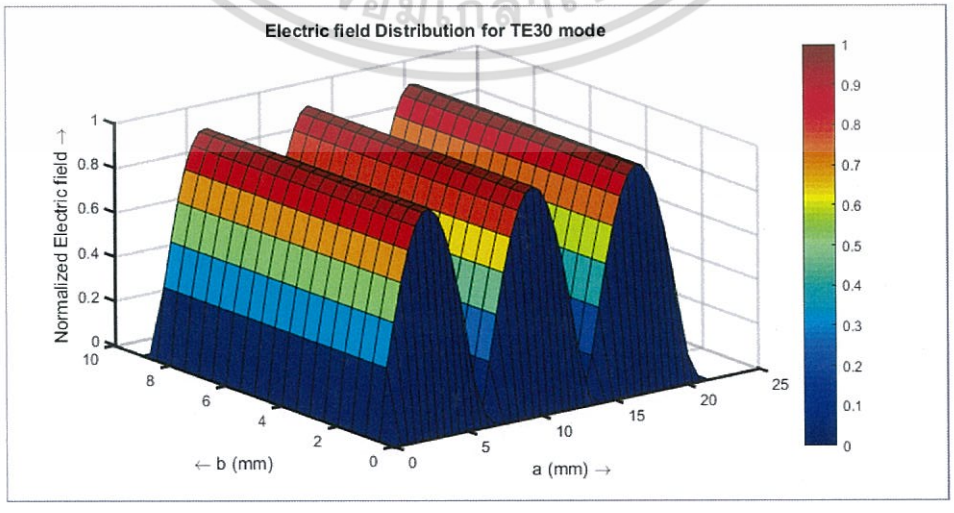
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 คลื่นโหมด TE_{21}

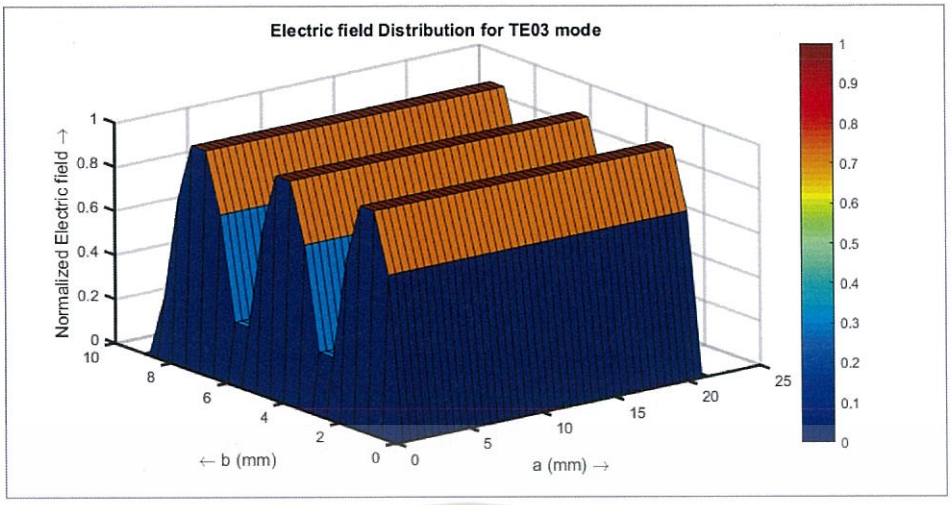


รูปที่ 4.9 คลื่นโหมด TE_{22}

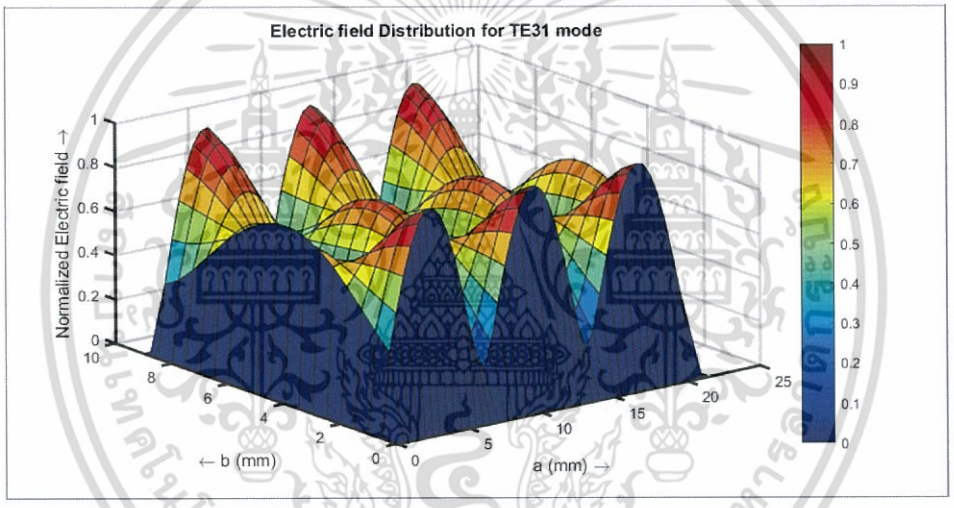


รูปที่ 4.10 คลื่นโหมด TE_{30}

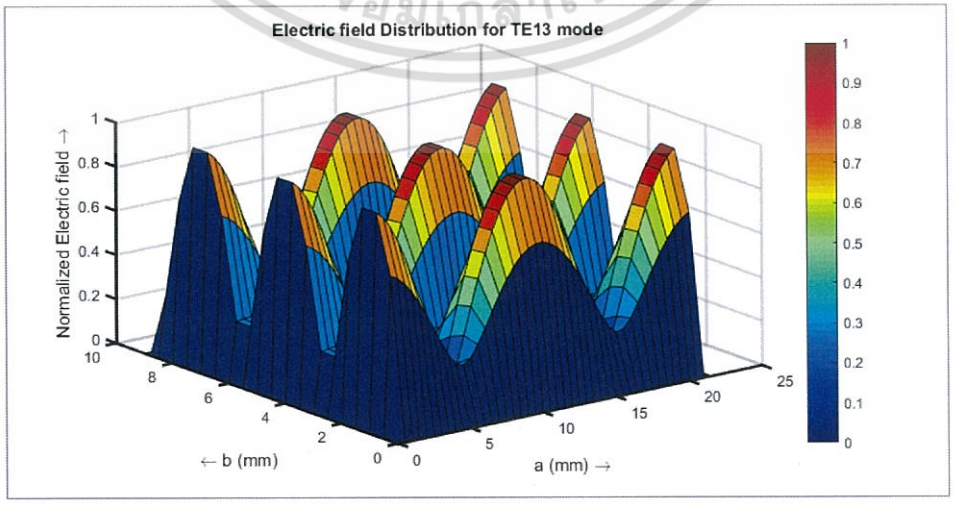
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 คลื่นโหมด TE_{03}

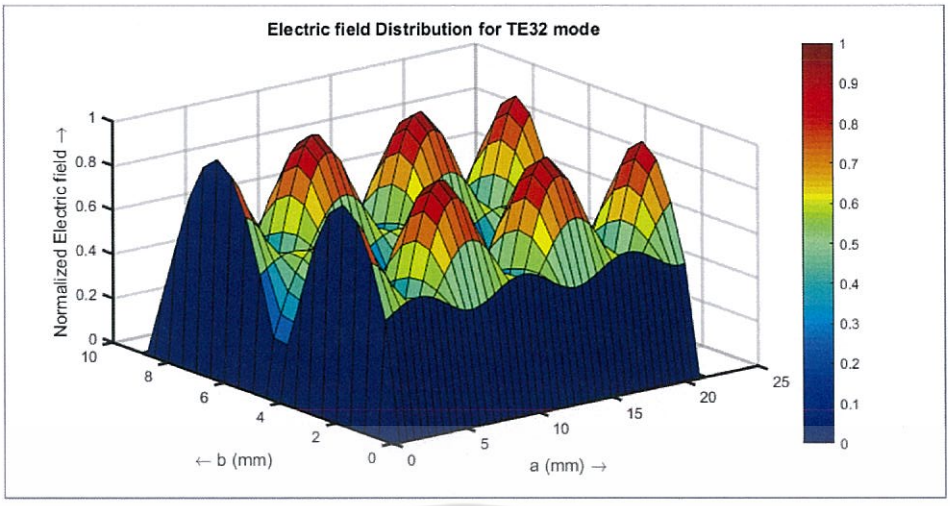


รูปที่ 4.12 คลื่นโหมด TE_{31}

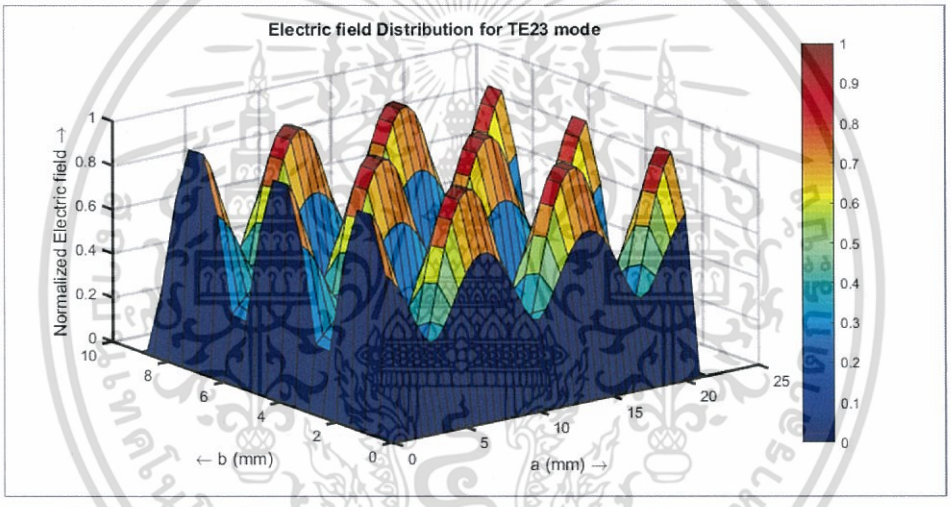


รูปที่ 4.13 คลื่นโหมด TE_{13}

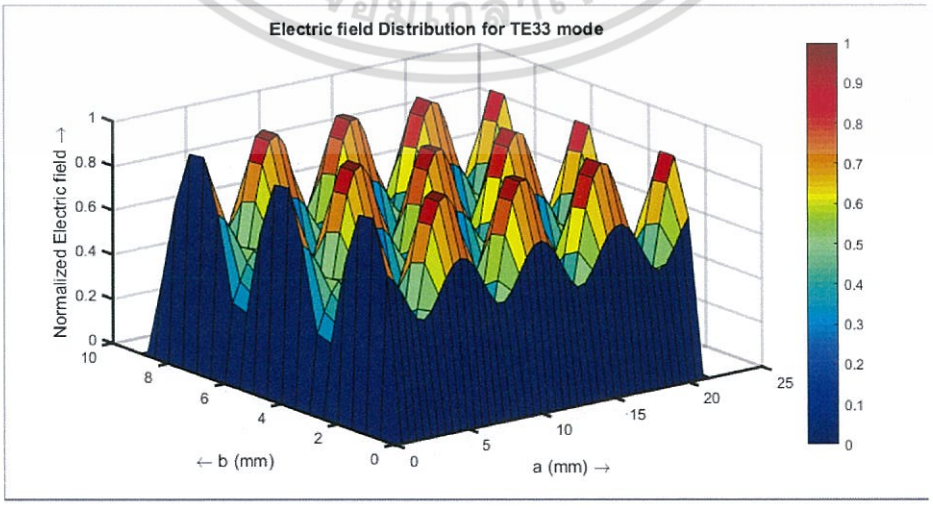
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.14 คลื่นโหมด TE_{32}

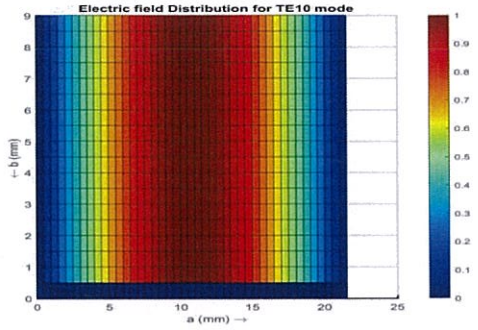


รูปที่ 4.15 คลื่นโหมด TE_{23}

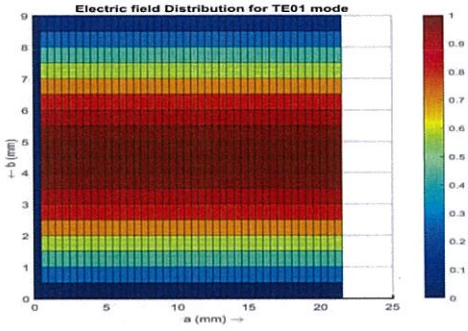


รูปที่ 4.16 คลื่นโหมด TE_{33}

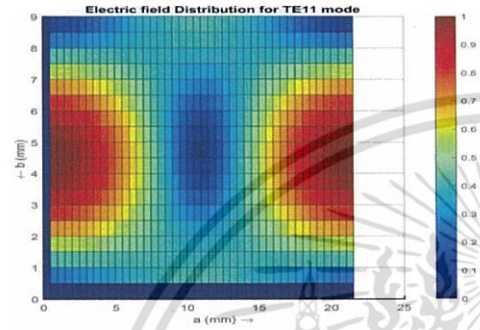
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



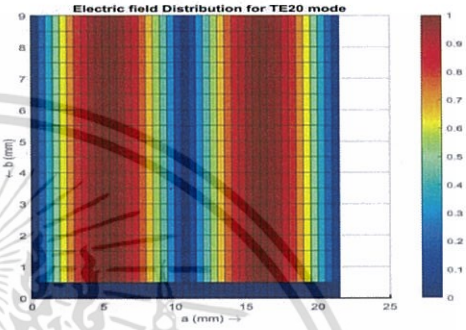
(1) โหมด TE_{10}



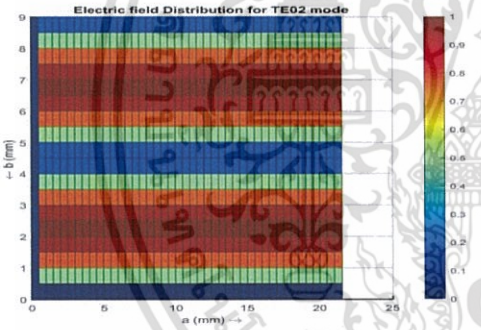
(2) โหมด TE_{01}



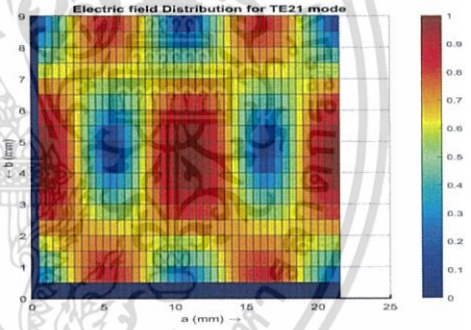
(3) โหมด TE_{11}



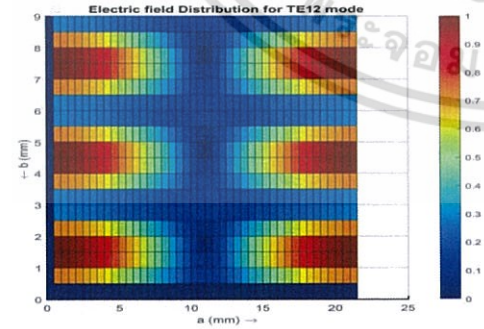
(4) โหมด TE_{20}



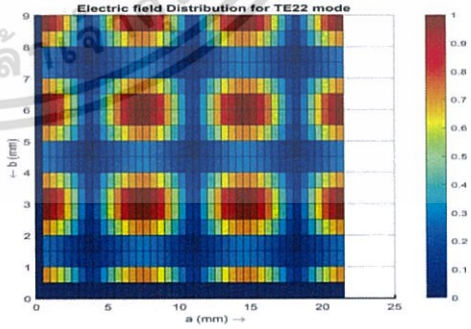
(5) โหมด TE_{02}



(6) โหมด TE_{21}



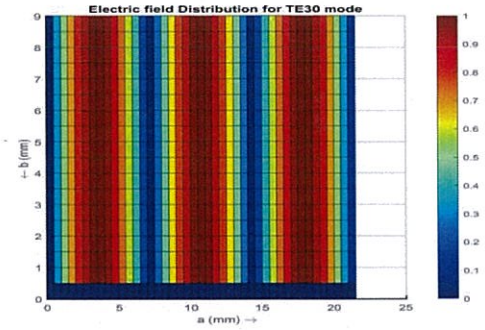
(7) โหมด TE_{12}



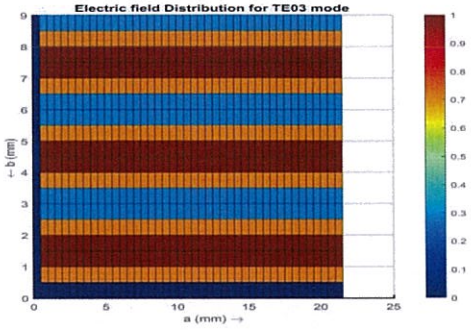
(8) โหมด TE_{22}

รูปที่ 4.17 คลื่นโหมดต่างๆ ในระนาบ xy

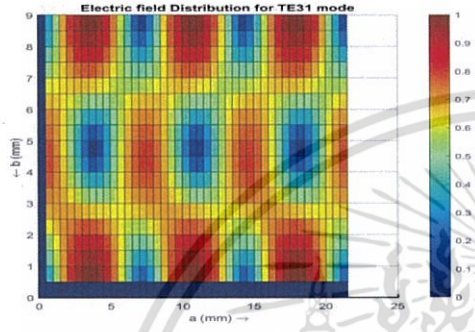
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



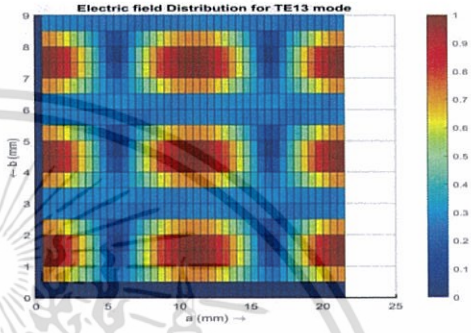
(9) โหมด TE_{30}



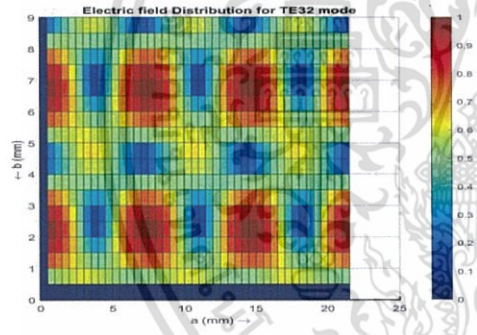
(10) โหมด TE_{03}



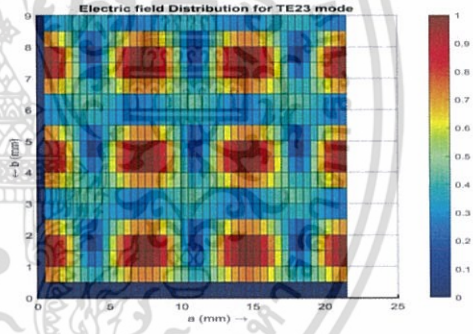
(11) โหมด TE_{31}



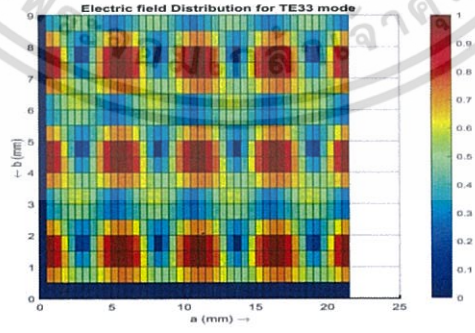
(12) โหมด TE_{13}



(13) โหมด TE_{32}



(14) โหมด TE_{23}



(15) โหมด TE_{33}

รูปที่ 4.17 (ต่อ) คลื่นโหมดต่างๆ ในระนาบ xy

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

โครงงานพิเศษการส่งผ่านคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยม โดยการพัฒนาโปรแกรมเพื่อสร้างแบบจำลองของการส่งผ่านคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยม โหมด TE_{01} – TE_{33} โดยใช้โปรแกรม MATLAB รุ่น R2016a ในการออกแบบหน้าต่างแสดงผล GUI ด้วย Graphic User Interface Development Environment (GUIDE)

เมื่อเปรียบเทียบค่าความถี่ตัดที่ได้จากโปรแกรมกับค่าความถี่ตัดของท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยมมาตรฐานขนาดต่างๆ พบว่าค่าความถี่ทั้งโหมด TE_{10} และ TE_{01} ที่ได้จากโปรแกรมมีความใกล้เคียงกับค่ามาตรฐาน

นอกจากนั้นโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นยังสามารถสร้างแบบจำลองการส่งผ่านคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ถูกต้องเมื่อเปรียบเทียบกับทฤษฎี แต่ยังมีข้อจำกัดคือสามารถจำลองได้เฉพาะโหมด TE_{01} – TE_{33} สามารถรับข้อมูลขนาดด้านกว้าง (a) และด้านสูง (b) ของท่อนำคลื่นได้เฉพาะหน่วยมิลลิเมตร และสามารถจำลองได้เฉพาะเมื่อขนาดของท่อนำคลื่นน้อยกว่าหรือเท่ากับท่อนำคลื่นเบอร์ WR187 ซึ่งมีขนาดด้านกว้าง 47.5488 มิลลิเมตร และด้านสูง 22.1488 มิลลิเมตร ไม่สามารถจำลองได้เมื่อขนาดของท่อนำคลื่นมีค่าสูงไปกว่านั้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

สำหรับผู้ที่สนใจในการศึกษาการส่งผ่านคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยม และสร้างแบบจำลองของการส่งผ่านคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยม โดยใช้โปรแกรม MATLAB ผู้จัดทำใคร่ขอเสนอแสะและมีแนวทางพัฒนาโครงงานดังนี้

1. โปรแกรมในโครงงานพิเศษนี้สามารถสร้างแบบจำลองของการส่งผ่านคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยมได้เฉพาะโหมด TE_{01} – TE_{33} จึงควรพัฒนาโปรแกรมให้สามารถสร้างแบบจำลองในโหมด TM และโหมดที่สูงขึ้น

2. โปรแกรมในโครงงานพิเศษนี้สามารถรับข้อมูลขนาดด้านกว้าง (a) และด้านสูง (b) ของท่อนำคลื่นได้เฉพาะหน่วยมิลลิเมตร จึงควรพัฒนาโปรแกรมให้สามารถรับข้อมูลขนาดของท่อนำคลื่นได้ทั้งหน่วยมิลลิเมตรและหน่วยนิ้ว

3. โปรแกรมในโครงงานพิเศษนี้ไม่สามารถสร้างแบบจำลองของการส่งผ่านคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยมเมื่อขนาดของท่อนำคลื่นมีค่ามาก (ขนาดที่มากที่สุดที่โปรแกรมสามารถ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สร้างแบบจำลองได้คือ WR187) จึงควรพัฒนาโปรแกรมให้สามารถสร้างแบบจำลองเมื่อขนาดของท่อนำคลื่นมากขึ้น

4. ควรพัฒนาโปรแกรมโดยใช้โปรแกรมอื่นๆ ร่วมกับ MATLAB GUI เช่น โปรแกรม CST, โปรแกรม COMSOL, โปรแกรม Ansys HFSS ที่สามารถสร้างและวิเคราะห์โครงสร้างสามมิติ และใช้วิธี Finite Element ในการคำนวณพฤติกรรมทางไฟฟ้าของส่วนประกอบที่มีความถี่และความเร็วสูง เพื่อให้โปรแกรมมีความสามารถเพิ่มขึ้น เช่น สามารถแสดงผลเป็นภาพเคลื่อนไหว เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

สุทธี ทับทองดี. 2546. “บทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอนเรื่องการวิเคราะห์คุณสมบัติของท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมในย่านความถี่สูง.” วิทยานิพนธ์ครุศาสตร์อุตสาหกรรมมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าสื่อสาร บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยรพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

โศรฎา แข็งการ และกนต์ธร ชำนิประศาสน์. ม.ป.ป. **การใช้ MATLAB สำหรับงานวิศวกรรม.** พิมพ์ครั้งที่ 2. นครราชสีมา : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

Anchal, A. 2014. **Finite Difference Scheme to generate TEmn Mode proagation in a rectangular waveguide.** [Online]. Available : https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/45571-finite-difference-scheme-to-generate-temn-mode-proagation-in-a-rectangular-waveguide.

Chew, W. 2016. **Lectures on Theory of Microwave and Optical Waveguides.** [Online]. Available : http://wcchew.ece.illinois.edu/chew/course/tgwAll20160215.pdf.

Jefferies, D. 2016. **Waveguides and Cavity Resonators.** [Online]. Available : http://eryptick.net/unisold/wguide.html.

Jugandi, R. 2016. **14.1 Waveguides.** [Online]. Available : http://jugandi.com/ebooks/Wireless/14%20Microwaves.htm

Kawano, K. and Kitoh, T .2001. **Introduction to Optical Waveguide Analysis : Solving Maxwell's Equations and the Schrodinger Equation.** New York : John Wiley and Sons.

United States Navy. 2015. **The Navy Electricity and Electronics Training Series: Module 11 Microwave Principles.** North Carolina : Lulu Press.

Wolff, C. 2016. **Basics of waveguide theory.** [Online]. Available : http://www.radartutorial.eu/03.linetheory/Waveguides.en.html

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก โค้ดโปรแกรม M-file ต่างๆ

โครงงานพิเศษนี้มี M-file จำนวน 4 ไฟล์ ดังนี้

1. M-file ของหน้าต่าง GUI (ไฟล์ชื่อ RWG.m)
2. M-file ของฟังก์ชันที่ใช้จำลองคลื่นในท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยม โหมด TE_{01} – TE_{33} (ไฟล์ชื่อ calculate.m)
3. M-file ของฟังก์ชันที่ใช้หาค่า m และ n (ไฟล์ชื่อ modefinders.m)
4. M-file ของฟังก์ชันที่ใช้จัดหน้ากราฟ (ไฟล์ชื่อ plotsetting.m)

1. M-file ของหน้าต่าง GUI

```
function varargout = RWG(varargin)
% RWG MATLAB code for RWG.fig
%      RWG, by itself, creates a new RWG or raises the existing
%      singleton*.
%
%      H = RWG returns the handle to a new RWG or the handle to
%      the existing singleton*.
%
%      RWG('CALLBACK',hObject,eventData,handles,...) calls the local
%      function named CALLBACK in RWG.M with the given input
arguments.
%
%      RWG('Property','Value',...) creates a new RWG or raises the
%      existing singleton*.  Starting from the left, property value
pairs are
%      applied to the GUI before RWG_OpeningFcn gets called.  An
%      unrecognized property name or invalid value makes property
application
%      stop.  All inputs are passed to RWG_OpeningFcn via varargin.
%
%      *See GUI Options on GUIDE's Tools menu.  Choose "GUI allows
only one
%      instance to run (singleton)".
%
% See also: GUIDE, GUIDATA, GUIHANDLES

% Edit the above text to modify the response to help RWG

% Last Modified by GUIDE v2.5 16-Mar-2017 08:24:46

% Begin initialization code - DO NOT EDIT
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',       mfilename, ...
                   'gui_Singleton',  gui_Singleton, ...
                   'gui_OpeningFcn', @RWG_OpeningFcn, ...
                   'gui_OutputFcn',  @RWG_OutputFcn, ...
                   'gui_LayoutFcn',  [] , ...
                   'gui_Callback',   []);
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargout
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end
% End initialization code - DO NOT EDIT


% --- Executes just before RWG is made visible.
function RWG_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
% This function has no output args, see OutputFcn.
% hObject    handle to figure
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
% varargin   command line arguments to RWG (see VARARGIN)

% Choose default command line output for RWG
handles.output = hObject;

% Update handles structure
guidata(hObject, handles);

% UIWAIT makes RWG wait for user response (see UIRESUME)
% uiwait(handles.figure1);


% --- Outputs from this function are returned to the command line.
function varargout = RWG_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)
% varargout  cell array for returning output args (see VARARGOUT);
% hObject    handle to figure
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Get default command line output from handles structure
varargout{1} = handles.output;


% --- Executes on button press in freq.
function freq_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to freq (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
global aaa
global bbb
global mmm
global nnn
global err
global urr
global fc
fc = cutofffreq(aaa,bbb,mmm,nnn,err,urr);
set(handles.outputfc,'string',fc)


function fc = cutofffreq(a,b,m,n,er,ur)
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
e0 = 8.8542*10^-12;
u0 = 1.2566*10^-6;
e = e0*er;
u = u0*ur;
fc =
((1/(2*pi*sqrt(e*u)))*(sqrt((m*pi/a*1000)^2+(n*pi/b*1000)^2)))/10^9;



function outputfc_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to outputfc (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of outputfc as text
%        str2double(get(hObject,'String')) returns contents of
outputfc as a double


% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function outputfc_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to outputfc (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns
called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%       See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end


% --- If Enable == 'on', executes on mouse press in 5 pixel border.
% --- Otherwise, executes on mouse press in 5 pixel border or over
text11.
function text11_ButtonDownFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to text11 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)



function inputur_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to inputur (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of inputur as text
%        str2double(get(hObject,'String')) returns contents of
inputur as a double
ur = get(hObject,'string');
global urr
urr = str2double(ur);

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function inputur_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
% hObject    handle to inputur (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns
called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%       See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end



function inputer_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to inputer (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of inputer as text
%        str2double(get(hObject,'String')) returns contents of
inputer as a double
er = get(hObject,'string');
global err
err = str2double(er);



% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function inputer_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to inputer (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns
called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%       See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end



function inputn_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to inputn (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of inputn as text
%        str2double(get(hObject,'String')) returns contents of inputn
as a double
n = get(hObject,'string');
global nnn
nnn = str2double(n);



% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function inputn_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
% hObject    handle to inputn (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns
called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%       See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end



function inputm_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to inputm (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of inputm as text
%        str2double(get(hObject,'String')) returns contents of inputm
as a double
m = get(hObject,'string');
global mmm
mmm = str2double(m);


% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function inputm_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to inputm (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns
called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%       See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end



function inputa_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to inputa (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of inputa as text
%        str2double(get(hObject,'String')) returns contents of inputa
as a double
a = get(hObject,'string');
global aaa
aaa = str2double(a);


% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function inputa_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
% hObject    handle to inputa (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns
called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%       See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end



function inputb_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to inputb (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of inputb as text
%        str2double(get(hObject,'String')) returns contents of inputb
as a double
b = get(hObject,'string');
global bbb
bbb = str2double(b);



% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function inputb_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to inputb (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns
called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%       See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end



% --- Executes on button press in leng.
function leng_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to leng (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
fcc = str2double(get(handles.outputfc, 'string'));
c = 2.998*10^8;
lc = c/(fcc*10^9);
set(handles.outputlc,'string',lc)

function lc = cutoffleng(a,b,m,n,er,ur)
e0 = 8.8542*10^-12;
u0 = 1.2566*10^-6;
e = e0*er;
u = u0*ur;
lc = ((2/(sqrt(er*ur)))/(sqrt((m*pi/a*100)^2+(n*pi/b*100)^2)));
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
function outputlc_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to outputlc (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of outputlc as text
%        str2double(get(hObject,'String')) returns contents of
outputlc as a double


% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function outputlc_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to outputlc (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns
called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%       See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end


% --- Executes on button press in cal.
function cal_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to cal (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
  global aaa
  global bbb
  global mmm
  global nnn
  calculate(aaa,bbb,mmm,nnn);



% --- Executes on button press in reset.
function reset_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to reset (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
set(handles.inputa, 'String', '');
set(handles.inputb, 'String', '');
set(handles.inputm, 'String', '');
set(handles.inputn, 'String', '');
set(handles.inputer, 'String', '');
set(handles.inputur, 'String', '');
set(handles.outputfc, 'String', '');
set(handles.outputlc, 'String', '');
clear all;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. M-file ของฟังก์ชันที่ใช้จำลองคลื่นในท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยม โหมด TE_{01} - TE_{33}

```
function calculate(aaa,bbb,mmm,nnn)

% dimensions of waveguide
 aa = aaa % horizontal
 bb = bbb % vertical

% number of steps
h = 2*aa;

% step size
dx = aa/h;
dy = aa/h;

x = 0:dx:aa-1;
y = 0:dy:bb-1;

Lx = length(x);
Ly = length(y);


% Generating sparsh matrix A
A = zeros(Ly*Lx,Ly*Lx);

for l = 1: Ly*Lx


    %% for corners
    if l == 1
        A(l,l) = 4;
        A(l,l+1) = -2;
        A(l,l+Lx) = -2;
    end

    if l == Lx
        A(l,l) = 4;
        A(l,l-1) = -2;
        A(l,l+Lx) = -2;
    end

    if l == 1+Lx*(Ly-1)
        A(l,l) = 4;
        A(l,l-Lx) = -2;
        A(l,l+1) = -2;
    end

    if l == Lx*Ly
        A(l,l) = 4;
        A(l,l-1) = -2;
        A(l,l-Lx) = -2;
    end

    %% for edges

    if l>1 && l<Lx    % Bottom edge
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
        A(l,l) = 4;
        A(l,l-1) = -1;
        A(l,l+1) = -1;
        A(l,l+Lx) = -2;
    end


    if l>1+Lx*(Ly-1) && l<Lx*Ly      % Top edge
        A(l,l) = 4;
        A(l,l-1) = -1;
        A(l,l+1) = -1;
        A(l,l-Lx) = -2;
    end

    a1 = 1+Lx:Lx:Lx*(Ly-2)+1; % Right edge
     if find(a1 == l) ~= 0
        A(l,l) = 4;
        A(l,l+1) = -2;
        A(l,l-Lx) = -1;
        A(l,l+Lx) = -1;
    end

    a2 = 2*Lx:Lx:Lx*(Ly-1); % Left edge
     if find(a2 == l) ~= 0
        A(l,l) = 4;
        A(l,l-1) = -2;
        A(l,l-Lx) = -1;
        A(l,l+Lx) = -1;
     end


     %% for all other points
     a3 = [1:Lx 1+Lx*(Ly-1):Lx*Ly a1 a2 ]; % defining edges

     b = (find(a3 == l) ~= 0);
     if b == 1
         c = 0;
     else c = 1;
     end

     if c == 1
        A(l,l) = 4;
        A(l,l-1) = -1;
        A(l,l+1) = -1;
        A(l,l+Lx) = -1;
        A(l,l-Lx) = -1;
     end

end


[phi,lam] = eig(A); % Calculating eigen value and eigen vector of A
hz = zeros(Ly,Lx); % initailising
Hz = zeros(Ly,Lx,Lx*Ly); % intialising magnetic field vector for
every eigen value
kc = zeros(1,Lx*Ly); % intialising propagation constant vector

for m = 1:Lx*Ly
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
    Lam(m) = lam(m,m); % eigen values
    kc(m) = sqrt(Lam(m))/dx; % finding propagation constant vector
    Phi = phi(:,m); % assigning field corresponding to every
propagation mode

    % converting column matrix of corresponding field to 2-D field
matrix
    p = 1;
    for n = 1:Lx:Lx*(Ly-1)+1
    hz(p,:) = Phi(n:n+Lx-1);
    p = p+1;
    end

    Hz(:,:,m) = hz; % storing field matrix of every mode
end


 %% finding Ex and Ey for each mode, using  Ex = -j*w*mu/Kc^2 dHz/dy,
Ey = j*w*mu/Kc^2 dHz/dx
 %% Normalising Ex and Ey for each mode, using  Ex = (-j*w*mu/Kc^2
dHz/dy)*sqrt(epsilon/mu), Ey = (j*w*mu/Kc^2 dHz/dx)*sqrt(epsilon/mu)

 Lm = min(aa,bb)/6; % defining wavelength
 K  = 2*pi/Lm; % defining wave number
%  KK = K./(kc.^2); % w/c*Kc^2 for normailsed E-field
KK = 1/K;

 Exx = zeros(Ly,Lx); % initialising Ex field
 Eyy = zeros(Ly,Lx); % initialising Ey field

 for m = 1: Lx*Ly % for every mode
     H = Hz(:,:,m);
 for ll = 2:Ly-1
     for mm = 2:Lx-1
     Exx(ll,mm) = -1*KK*(H(ll+1,mm)-H(ll,mm)); % calculating Ex field

     Eyy(ll,mm) = KK*(H(ll,mm+1)-H(ll,mm)); % calculating Ey field
     end
 end
 Ex(:,:,m) = Exx;
 Ey(:,:,m) = Eyy;
 E(:,:,m) = sqrt((Exx.^2)+(Eyy.^2)); % Calculting E-field
 MaxE = max(max(E(:,:,m)));
 En(:,:,m) = E(:,:,m)/MaxE; % normalised w.r.t  maximum value
 end

modes = zeros(Lx*Ly,3);
kc_th = zeros(1,Lx*Ly); % intialsing theoretical value of Kc,
propagation constant
 for q = 1:Lx*Ly
     [M,N]= modefinders(E(:,:,q),Lx,Ly);
     modes(q,1) = M ;
     modes(q,2) = N ;
     modes(q,3) = q ; % position of eigenvalue
     kc_th(q) = pi*(sqrt(((M/aa)^2)+((N/bb)^2)));
 end
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
a01 = 0; a10 = 0; a11 = 0; a20 = 0; a02 = 0; a21 = 0; a12 = 0; a22 =
0;
a30 = 0; a03 = 0; a31 = 0; a13 = 0; a32 = 0; a23 = 0; a33 = 0

% plotting modes
for s = 1:Lx*Ly

    % for 10 mode
    if (modes(s,1)== 1) &&  (modes(s,2)== 0)
        a01 = a01+1;
      p10(a01) = modes(s,3);
      k10(a01) = kc(p10(a01));
    end

    % for 01 mode
    if (modes(s,1)== 0) &&  (modes(s,2)== 1)
        a10 = a10+1;
      p01(a10) = modes(s,3);
      k01(a10) = kc(p01(a10));
    end

    % for 11 mode
    if (modes(s,1)== 1) &&  (modes(s,2)== 1)
        a11 = a11+1;
        p11(a11) = modes(s,3);
      k11(a11) = kc(p11(a11));
    end

    % for 20 mode
    if (modes(s,1)== 2) &&  (modes(s,2)== 0)
        a20 = a20+1;
      p20(a20) = modes(s,3);
      k20(a20) = kc(p20(a20));
    end

    % for 02 mode
    if (modes(s,1)== 0) &&  (modes(s,2)== 2)
        a02 = a02+1;
      p02(a02) = modes(s,3);
      k02(a02) = kc(p02(a02));
    end

    % for 21 mode
    if (modes(s,1)== 2) &&  (modes(s,2)== 1)
        a21 = a21+1;
      p21(a21) = modes(s,3);
      k21(a21) = kc(p21(a21));
    end

    % for 12 mode
    if (modes(s,1)== 1) &&  (modes(s,2)== 2)
        a12 = a12+1;
      p12(a12) = modes(s,3);
      k12(a12) = kc(p12(a12));
    end

    % for 22 mode
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
    if (modes(s,1)== 2) &&  (modes(s,2)== 2)
        a22 = a22+1;
      p22(a22) = modes(s,3);
      k22(a22) = kc(p22(a22));
    end

    % for 30 mode
    if (modes(s,1)== 3) &&  (modes(s,2)== 0)
        a30 = a30+1;
      p30(a30) = modes(s,3);
      k30(a30) = kc(p30(a30));
    end

    % for 03 mode
    if (modes(s,1)== 0) &&  (modes(s,2)== 3)
        a03 = a03+1;
      p03(a03) = modes(s,3);
      k03(a03) = kc(p03(a03));
    end

    % for 31 mode
    if (modes(s,1)== 3) &&  (modes(s,2)== 1)
        a31 = a31+1;
      p31(a31) = modes(s,3);
      k31(a31) = kc(p31(a31));
    end

    % for 13 mode
    if (modes(s,1)== 1) &&  (modes(s,2)== 3)
        a13 = a13+1;
      p13(a13) = modes(s,3);
      k13(a13) = kc(p13(a13));
    end

    % for 32 mode
    if (modes(s,1)== 3) &&  (modes(s,2)== 2)
        a32 = a32+1;
      p32(a32) = modes(s,3);
      k32(a32) = kc(p32(a32));
    end

    % for 23 mode
    if (modes(s,1)== 2) &&  (modes(s,2)== 3)
        a23 = a23+1;
      p23(a23) = modes(s,3);
      k23(a23) = kc(p23(a23));
    end

    % for 33 mode
    if (modes(s,1)== 3) &&  (modes(s,2)== 3)
        a33 = a33+1;
      p33(a33) = modes(s,3);
      k33(a33) = kc(p33(a33));
    end
end

    % for 10 mode
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
if (mmm == 1) && (nnn == 0)
K10 = min(k10); % dominant mode by Eigen value
l10 = find(k10 == K10);
P10 = p10(l10);% location of dominant mode
figure
surf(x,y,En(:,:,P10))
title('Electric field Distribution for TE10 mode')
plotsetting()

% for 01 mode
elseif (mmm == 0) && (nnn == 1)
K01 = min(k01);
l01 = find(k01 == K01);
P01 = p01(l01);
figure
surf(x,y,En(:,:,P01))
title('Electric field Distribution for TE01 mode')
plotsetting()

% for 11 mode
elseif (mmm == 1) && (nnn == 1)
K11 = min(k11);
l11 = find(k11 == K11);
P11 = p11(l11);
figure
surf(x,y,En(:,:,P11))
title('Electric field Distribution for TE11 mode')
plotsetting()

% for 20 mode
elseif (mmm == 2) && (nnn == 0)
K20 = min(k20);
l20 = find(k20 == K20);
P20 = p20(l20);
figure
surf(x,y,En(:,:,P20))
title('Electric field Distribution for TE20 mode')
plotsetting()

% for 02 mode
elseif (mmm == 0) && (nnn == 2)
K02 = min(k02);
l02 = find(k02 == K02);
P02 = p02(l02);
figure
surf(x,y,En(:,:,P02))
title('Electric field Distribution for TE02 mode')
plotsetting()

% for 21 mode
elseif (mmm == 2) && (nnn == 1)
K21 = min(k21);
l21 = find(k21 == K21);
P21 = p21(l21);
figure
surf(x,y,En(:,:,P21))
title('Electric field Distribution for TE21 mode')
plotsetting()

% for 12 mode
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
elseif (mmm == 1) && (nnn == 2)
K12 = min(k12);
l12 = find(k12 == K12);
P12 = p12(l12);
figure
surf(x,y,En(:,:,P12))
title('Electric field Distribution for TE12 mode')
plotsetting()

% for 22 mode
elseif (mmm == 2) && (nnn == 2)
K22 = min(k22);
l22 = find(k22 == K22);
P22 = p22(l22);
figure
surf(x,y,En(:,:,P22))
title('Electric field Distribution for TE22 mode')
plotsetting()

% for 30 mode
elseif (mmm == 3) && (nnn == 0)
K30 = min(k30);
l30 = find(k30 == K30);
P30 = p30(l30);
figure
surf(x,y,En(:,:,P30))
title('Electric field Distribution for TE30 mode')
plotsetting()

% for 03 mode
elseif (mmm == 0) && (nnn == 3)
K03 = min(k03);
l03 = find(k03 == K03);
P03 = p03(l03);
figure
surf(x,y,En(:,:,P03))
title('Electric field Distribution for TE03 mode')
plotsetting()

% for 31 mode
elseif (mmm == 3) && (nnn == 1)
K31 = min(k31);
l31 = find(k31 == K31);
P31 = p31(l31);
figure
surf(x,y,En(:,:,P31))
title('Electric field Distribution for TE31 mode')
plotsetting()

% for 13 mode
elseif (mmm == 1) && (nnn == 3)
K13 = min(k13);
l13 = find(k13 == K13);
P13 = p13(l13);
figure
surf(x,y,En(:,:,P13))
title('Electric field Distribution for TE13 mode')
plotsetting()

% for 32 mode
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
elseif (mmm == 3) && (nnn == 2)
K32 = min(k32);
l32 = find(k32 == K32);
P32 = p32(l32);
figure
surf(x,y,En(:,:,P32))
title('Electric field Distribution for TE32 mode')
plotsetting()

% for 23 mode
elseif (mmm == 2) && (nnn == 3)
K23 = min(k23);
l23 = find(k23 == K23);
P23 = p23(l23);
figure
surf(x,y,En(:,:,P23))
title('Electric field Distribution for TE23 mode')
plotsetting()

% for 33 mode
elseif (mmm == 3) && (nnn == 3)
K33 = min(k33);
l33 = find(k33 == K33);
P33 = p33(l33);
figure
surf(x,y,En(:,:,P33))
title('Electric field Distribution for TE33 mode')
plotsetting()

end
```

3. M-file ของฟังก์ชันที่ใช้หาค่า m และ n

```
function [m,n] = modefinders(a,Lx,Ly)

d = a(2,2);
% finding peaks for complete lambda/2
if d < 0.5
y = floor(a * 10000) / 10000;
c = y(2,2:Lx-1);
m = length(findpeaks(c)); % modes along x-axis
b = y(2:Ly-1,2);
n = length(findpeaks(b)); % modes along y-axis
% finding peaks for incomplete lambda/2
else
y = floor(a * 10000) / 10000;
c = y(2,2:Lx-1);
m = length(findpeaks(1-c)); % modes along x-axis
b = y(2:Ly-1,2);
n = length(findpeaks(1-b)); % modes along y-axis
end

end
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. M-file ของฟังก์ชันที่ใช้จัดหน้ากราฟ

```
function plotsetting()

rotate3d on
xlabel('a (mm) \rightarrow')
ylabel('\leftarrow b (mm) ')
zlabel('Normalized Electric field \rightarrow')
set(get(gca,'xlabel'),'FontSize', 16, 'FontWeight', 'Normal');
set(get(gca,'ylabel'),'FontSize', 16, 'FontWeight', 'Normal');
set(get(gca,'zlabel'),'FontSize', 16, 'FontWeight', 'Normal');
set(get(gca,'title'),'FontSize', 18, 'FontWeight', 'Bold');
colorbar;
colormap (jet);
box off; %axis square;
set(gca,'LineWidth',2);
set(gca,'FontSize',10);
set(gcf,'color','w');
set(gcf,'PaperUnits','inches');
set(gcf,'PaperSize', [15 20]);
set(gcf,'PaperPosition',[0.5 0.5 7 7]);
set(gcf,'PaperPositionMode','Manual');

end
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข คุณสมบัติของท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยมมาตรฐาน

ตารางที่ 6.1 ค่าความถี่ตัดของท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยมมาตรฐานขนาดต่างๆ

Waveguide name	Inner dimensions of waveguide (inch)		Inner dimensions of waveguide (mm)		Cutoff frequency lowest order mode (GHz)	Cutoff frequency next mode (GHz)
	a	b	a	b		
WR2300	23	11.5	584.2	292.1	0.257	0.513
WR2100	21	10.5	533.4	266.7	0.281	0.562
WR1800	18	9	457.2	228.6	0.328	0.656
WR1500	15	7.5	381	190.5	0.393	0.787
WR1150	11.5	5.75	292.1	146.05	0.513	1.026
WR975	9.75	4.875	247.65	123.825	0.605	1.211
WR770	7.7	3.85	195.58	97.79	0.766	1.533
WR650	6.5	3.25	165.1	82.55	0.908	1.816
WR510	5.1	2.55	129.54	64.77	1.157	2.314
WR430	4.3	2.15	109.22	54.61	1.372	2.745
	3.5	1.75	88.9	44.45	1.686	3.372
WR340	3.4	1.7	86.36	43.18	1.736	3.471
WR284	2.84	1.34	72.136	34.036	2.078	4.156
	2.372	1.122	60.2488	28.4988	2.488	4.976
WR229	2.29	1.145	58.166	29.083	2.577	5.154
WR187	1.872	0.872	47.5488	22.1488	3.153	6.305
WR159	1.59	0.795	40.386	20.193	3.712	7.423
WR137	1.372	0.622	34.8488	15.7988	4.301	8.603
WR112	1.122	0.497	28.4988	12.6238	5.26	10.52
WR102	1.02	0.51	25.908	12.954	5.786	11.571
WR90	0.9	0.4	22.86	10.16	6.557	13.114
WR75	0.75	0.375	19.05	9.525	7.869	15.737
WR62	0.622	0.311	15.7988	7.8994	9.488	18.976
WR51	0.51	0.255	12.954	6.477	11.572	23.143

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.1 (ต่อ) ค่าความถี่ตัดของท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยมมาตรฐานขนาดต่างๆ

Waveguide name	Inner dimensions of waveguide (inch)		Inner dimensions of waveguide (mm)		Cutoff frequency lowest order mode (GHz)	Cutoff frequency next mode (GHz)
	a	b	a	b		
WR42	0.42	0.17	10.668	4.318	14.051	28.102
WR34	0.34	0.17	8.636	4.318	17.357	34.715
WR28	0.28	0.14	7.112	3.556	21.077	42.154
WR22	0.224	0.112	5.6896	2.8448	26.346	52.692
WR19	0.188	0.094	4.7752	2.3876	31.391	62.782
WR15	0.148	0.074	3.7592	1.8796	39.875	79.75
WR12	0.122	0.061	3.0988	1.5494	48.373	96.746
WR10	0.1	0.05	2.54	1.27	59.015	118.03
WR8	0.08	0.04	2.032	1.016	73.768	147.536
WR6	0.065	0.0325	1.651	0.8255	90.791	181.583
WR7	0.065	0.0325	1.651	0.8255	90.791	181.583
WR5	0.051	0.0255	1.2954	0.6477	115.714	231.429
WR4	0.043	0.0215	1.0922	0.5461	137.243	274.485
WR3	0.034	0.017	0.8636	0.4318	173.571	347.143

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง