มหาวิทยาลัยนเรศวร
ห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

การวิเคราะห์ท่อนำคลื่นภาคตัดขวางสี่เหลี่ยม

Analysis of Rectangular Cross-Section Waveguides

นาย ณัฐพงษ์ บางทับ รหัส 47380229

15080903
ห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์
วันที่รับ 30 ต.ค. 2551
เลขทะเบียน 05100040
เลขเรียกหนังสือ ปร. ณ337ก 2550
มหาวิทยาลัยนเรศวร

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

ปีการศึกษา 2550

ใบรับรองโครงงานวิศวกรรม

หัวข้อโครงงาน	**การวิเคราะห์ท่อนำคลื่นภาคตัดขวางสี่เหลี่ยม**
ผู้ดำเนินโครงงาน	**นายณัฐพงษ์ บางทับ รหัส 47380229**
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.ชัยรัตน์ พินทอง
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
ภาควิชา	วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์
ปีการศึกษา	2550

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร อนุมัติให้โครงงานฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะกรรมการสอบโครงงานวิศวกรรม

..............................ประธานกรรมการ
(ดร.ชัยรัตน์ พินทอง)

..............................กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์.ดร.สุรเชษฐ์ กานต์ประชา)

..............................กรรมการ
(อาจารย์แสงชัย มังกรทอง)

หัวข้อโครงงาน	การวิเคราะห์ท่อนำคลื่นภาคตัดขวางสี่เหลี่ยม
ผู้ดำเนินโครงงาน	นายณัฐพงษ์ บางทับ รหัส 47380229
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร. ชัยรัตน์ พินทอง
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
ภาควิชา	วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์
ปีการศึกษา	2550

บทคัดย่อ

โครงงานนี้เป็นการศึกษาและวิเคราะห์คุณลักษณะของท่อนำคลื่นภาคตัดขวางสี่เหลี่ยม ซึ่งเน้นวิเคราะห์ท่อนำคลื่นกลวงและท่อนำคลื่นที่บรรจุไดอิเล็กทริกไว้บางส่วน โดยจะอาศัยสมการแมกซ์เวลล์และเงื่อนไขขอบเขตในการหาคำตอบของท่อนำคลื่นทั้งสองลักษณะ สำหรับกรณีของท่อนำคลื่นกลวง ผลลัพธ์ที่ได้จะแสดง ค่าคงตัวเฟส ค่าความถี่ตัด และ แบบรูปคลื่น แบบแผนคลื่นเป็นใหญ่คือ TE_{10} และหาค่าความถี่ตัดได้ สำหรับท่อนำคลื่นที่บรรจุไดอิเล็กตริกไว้บางส่วนนั้น ผลลัพธ์ที่ได้จะแสดง ค่าคงตัวเฟสและค่าความถี่ตัด แบบแผนเป็นใหญ่ คือ LSE_{10} โครงงานนี้ได้พัฒนาโปรแกรม MATLAB พร้อมด้วยการเชื่อมต่อกับผู้ใช้ภายนอกสำหรับท่อนำคลื่นทั้งสองชนิดนี้ ซึ่งสามารถลดระยะเวลาในการคำนวณและทำให้การวิเคราะห์ท่อนำคลื่นนี้สะดวกยิ่งขึ้น

Project Title	Analysis of Rectangular Cross-Section Waveguides
Name	Mr.Nuttapong Bangtub ID.47380229
Project Advisor	Mr.Chairat Pinthong
Major	Electrical Engineering
Department	Electrical and Computer Engineering
Academic Year	2550

....

ABSTRACT

This project is the study and analysis of the characteristics of rectangular cross-section waveguides emphasizing on waveguides with hollow waveguide and partially filled waveguides. The Maxwell's equations with the boundary conditions are applied to solve both cases of problem. For the first waveguide case, the result including phase constant, cut-off frequency and field pattern are shown. The dominant mode is TE_{10} and has a cut-off frequency. Transverse electric fields are plotted on the cross section of the waveguide displaying the field's direction and magnitude. For the partially filled waveguide case, the result including phase constant and cut-off frequency are show. The fundamental mode is hybrid mode referred to LSE_{10}. The MATLAB program together with graphic user interface is developed for both cases of waveguides, hence reducing computation time and making the analysis more convenient.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการศึกษาเกี่ยวกับเรื่องการวิเคราะห์ท่อนำคลื่นภาคตัดขวางสี่เหลี่ยมซึ่งจะไม่มีทางสำเร็จไปได้ถ้าไม่ได้รับการช่วยเหลือจากบุคคลดังต่อไปนี้

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ชัยรัตน์ พินทอง อาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ผู้เป็นอาจารย์ที่ปรึกษาโครงงานที่ได้ให้ความรู้ ให้คำแนะนำและให้ความช่วยเหลือแก่ผู้จัดทำเป็นอย่างดีตลอดมา

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ที่ได้ให้ความรู้และให้คำสั่งสอนจนผู้จัดทำมีความรู้ที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการจัดทำโครงงานในครั้งนี้

และที่สำคัญที่สุดขอขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ได้เลี้ยงดูและอบรมสั่งสอนแก่ผู้จัดทำจนทำให้ผู้จัดทำมีวันนี้ได้ ซึ่งเป็นพระคุณอันหาที่เปรียบไม่ได้

ท้ายนี้ผู้จัดทำใคร่ขอขอบพระคุณผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องทุกท่านที่ไม่ได้กล่าวนามมา ณ ที่นี้ ที่มีส่วนร่วมในการให้ข้อมูลเป็นที่ปรึกษาในการทำปริญญานิพนธ์ฉบับนี้จนเสร็จสมบูรณ์ ผู้จัดทำจึงขอขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี้

ผู้จัดทำโครงงาน
นายณัฐพงษ์ บางทับ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย .... ก

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .... ข

กิตติกรรมประกาศ .... ค

สารบัญ .... ง

สารบัญตาราง .... ฉ

สารบัญรูป .... ช

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงงาน 1

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงาน 1

1.3 ขอบข่ายของของโครงงาน 1

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน 2

1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ 2

1.6 งบประมาณที่ใช้ 2

บทที่ 2 หลักการและทฤษฐีเบื้องต้นของท่อนำคลื่น

2.1 ท่อนำคลื่นกลวง 3

2.1.1 แบบแผนคลื่นไฟฟ้าตามขวาง 3

2.1.2 แบบแผนคลื่นแม่เหล็กตามขวาง 11

2.2 ท่อนำคลื่นที่มีการบรรจุไดอิเล็กตริกบางส่วน 14

2.2.1 แบบแผนคลื่นสนามไฟฟ้าส่วนตัดตามยาว 14

2.2.2 แบบรูปคลื่นสนามแม่เหล็กส่วนตัดตามยาว 20

บทที่ 3 ผลการวิเคราะห์ท่อนำคลื่น

3.1 ผลการวิเคราะห์ท่อนำคลื่นกลวงที่มีภาคตัดขวางสี่เหลี่ยม 23

3.2 ผลการวิเคราะห์ท่อนำคลื่นที่บรรจุไดอิเล็กตริกบางส่วน 30

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

บทที่ 4 สรุปผลการวิเคราะห์และข้อเสนอแนะ

4.1 สรุปผลการวิเคราะห์ 32

4.2 ข้อเสนอแนะ 32

เอกสารอ้างอิง 33

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก แบบรูปสนามไฟฟ้าของท่อนำคลื่นภาคตัดขวางสี่เหลี่ยม 34

ภาคผนวก ข โปรแกรมวิเคราะห์ท่อนำคลื่นภาคตัดขวางสี่เหลี่ยม 43

ภาคผนวก ค การเชื่อมต่อกับผู้ใช้ทางกราฟฟิก 47

ประวัติผู้เขียนโครงงาน 52

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

3.1 ความถี่ตัดของแบบแผนคลื่นที่เกิดขึ้นในท่อนำคลื่น 24
3.2 แบบแผนเมื่อค่าคงตัวการแพร่กระจาย k_0a เท่ากับ 5 24
3.3 อัตราส่วนของความถี่ตัด (R_{mn}) ของแบบรูป TE^z_{mn} ต่อ TE^z_{10} 25
3.4 อัตราส่วนของความถี่ตัด (T_{mn}) ของแบบรูป TM^z_{mn} ต่อ TE^z_{10} 26
3.5 แบบแผนคลื่นเมื่อ $k_0a = 3$ 31

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

2.1 ท่อนำคลื่นภาคตัดขวางสี่เหลี่ยม ความกว้าง a ความยาว b ... 3

2.2 ลักษณะของท่อนำคลื่นผสม(Hybrid mode) ... 14

2.3 ภาคตัดขวางสี่เหลี่ยมของท่อนำคลื่นที่ใช้ในการพิจารณาเงื่อนไขขอบเขต ... 16

3.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างของค่าคงตัวการแพร่กระจายและค่าคงตัวการแพร่กระจายของคลื่นจรในแนวแกน +z โดยที่ a/b=2 ... 23

3.2 กราฟแสดงค่าอิมพิแดนซ์ของแบบรูปที่เกิดขึ้นในท่อนำคลื่นภาคตัดขวางสี่เหลี่ยม ... 27

3.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ ($\frac{f}{f_c}$) กับความยาวคลื่น ($\frac{\lambda_g}{\lambda}$) ของท่อนำคลื่น ... 28

3.4 แบบรูปสนามไฟฟ้า TE_{10} ... 28

3.5 แบบรูปสนามไฟฟ้า TE_{01} ... 29

3.6 แบบรูปสนามไฟฟ้า TM_{11} ... 29

3.7 แบบรูปสนามไฟฟ้า TM_{21} ... 30

3.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างของค่า β_z / k_0 และ $k_0 a$ ของท่อนำคลื่นที่บรรจุไดอิเล็กตริกไว้บางส่วน ... 31

ก.1 แบบรูปสนามไฟฟ้า TE_{10} ... 34

ก.2 แบบรูปสนามไฟฟ้า TE_{01} ... 34

ก.3 แบบรูปสนามไฟฟ้า TE_{20} ... 35

ก.4 แบบรูปสนามไฟฟ้า TE_{11} ... 35

ก.5 แบบรูปสนามไฟฟ้า TM_{11} ... 36

ก.6 แบบรูปสนามไฟฟ้า TE_{21} ... 36

ก.7 แบบรูปสนามไฟฟ้า TM_{21} ... 37

ก.8 แบบรูปสนามไฟฟ้า TE_{30} ... 37

ก.9 แบบรูปสนามไฟฟ้า TE_{31} ... 38

ก.10 แบบรูปสนามไฟฟ้า TM_{31} ... 38

ก.11 แบบรูปสนามไฟฟ้า TE_{40} ... 39

ก.12 แบบรูปสนามไฟฟ้า TE_{02} ... 39

ก.13 แบบรูปสนามไฟฟ้า TE_{12} ... 40

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่		หน้า
ก.14	แบบรูปสนามไฟฟ้า TM_{12}	40
ก.15	แบบรูปสนามไฟฟ้า TE_{41}	41
ก.16	แบบรูปสนามไฟฟ้า TE_{22}	41
ก.17	แบบรูปสนามไฟฟ้า TM_{41}	42
ก.18	แบบรูปสนามไฟฟ้า TM_{22}	42
ค.1	หน้าหลักของโปรแกรมวิเคราะห์ท่อนำคลื่นภาคตัดขวางสี่เหลี่ยม	47
ค.2	หน้าย่อยสำหรับวิเคราะห์ท่อนำคลื่นกลวง	48
ค.3	หน้าย่อยสำหรับวิเคราะห์แบบรูปคลื่นของท่อนำคลื่นกลวง	48
ค.4	หน้าย่อยสำหรับวิเคราะห์แบบแผนคลื่นสนามไฟฟ้าตามขวาง	49
ค.5	หน้าย่อยสำหรับวิเคราะห์แบบแผนคลื่นสนามแม่เหล็กตามขวาง	49
ค.6	หน้าย่อยสำหรับวิเคราะห์ค่าคงตัวเฟสของท่อนำคลื่นกลวง	50
ค.7	หน้าย่อยสำหรับวิเคราะห์ค่าคงตัวเฟสของท่อนำคลื่นที่บรรจุไดอิเล็กตริกบางส่วน	51

มหาวิทยาลัยนเรศวร

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงงาน

ในปัจจุบันนี้ระบบโทรคมนาคม เช่น ระบบสื่อสารไมโครเวฟภาคพื้นดิน ระบบสื่อสารดาวเทียม และระบบสื่อสารทางเคเบิลใยแก้วนำแสง ได้เข้ามามีบทบาทต่อระบบการสื่อสารเป็นอย่างมาก ในระบบเหล่านี้ จำเป็นต้องมีอุปกรณ์นำสัญญาณ อุปกรณ์ที่ใช้กันอย่างกว้างขวางในย่านความถี่ไมโครเวฟคือ ท่อนำคลื่น , คุณสมบัติที่ดีของท่อนำคลื่น มีการสูญเสียต่ำ และสามารถรองรับกำลังได้สูง

โครงงานนี้ผู้จัดทำได้ศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติของท่อนำคลื่นภาคตัดขวางสี่เหลี่ยมในสองลักษณะคือ ท่อนำคลื่นภาคตัดขวางสี่เหลี่ยมกลวงและท่อนำคลื่นภาคตัดขวางสี่เหลี่ยมที่บรรจุไดอิเล็กตริกบางส่วน โดยจะมีพารามิเตอร์ทำการวิเคราะห์คือ ค่าคงตัวเฟส(Phase constant) ความถี่ตัด (cutoff frequency) แบบแผนคลื่น (mode) แบบรูปคลื่น (Field pattern) เพื่อนำมาประยุกต์ในการออกแบบให้เหมาะสมกับการใช้งานในระบบสื่อสารในระดับต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงาน

เพื่อศึกษาหลักการของท่อนำคลื่นภาคตัดขวางสี่เหลี่ยม
เพื่อศึกษาการเขียนโปรแกรม เพื่อช่วยในการวิเคราะห์ท่อนำคลื่นภาคตัดขวางสี่เหลี่ยม
เพื่อนำความรู้ที่ได้มาประยุกต์ใช้งานในการออกแบบให้เหมาะสมกับการสื่อสาร
เพื่อนำความรู้ที่ได้มาเผยแพร่ให้กับบุคคลที่สนใจเพื่อศึกษาและพัฒนาต่อไป

1.3 ขอบข่ายของโครงงาน

1.3.1 ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับท่อนำคลื่นภาคตัดขวางสี่เหลี่ยมที่ไม่มีการสูญเสีย โดยอาศัยศักย์เชิงเวกเตอร์ สมการแม็กเวลล์ และเงื่อนไขขอบเขต โดยจะแบ่งการศึกษาทฤษฎีนี้ออกเป็นสองส่วนได้แก่

- ส่วนที่หนึ่งศึกษาเกี่ยวกับท่อนำคลื่นกลวงที่ไม่มีการสูญเสียโดยทำการวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องคือ ค่าคงตัวเฟส ความถี่ตัด แบบแผนคลื่น และ แบบรูปคลื่น
- ส่วนที่สองศึกษาเกี่ยวกับท่อนำคลื่นที่มีการบรรจุไดอิเล็กตริกบางส่วนโดยทำการวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องคือ ค่าคงตัวเฟส และ แบบแผนคลื่น

1.3.2 เขียนโปรแกรมเพื่อช่วยในการวิเคราะห์ท่อนำคลื่นภาคตัดขวางสี่เหลี่ยม

1.3.3 สรุปผลการวิเคราะห์ท่อนำคลื่นภาคตัดขวางสี่เหลี่ยม

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

หัวข้องาน	2550			2551			
	ตุลาคม	พฤศจิกายน	ธันวาคม	มกราคม	กุมภาพันธ์	มีนาคม	เมษายน
1. ศึกษาทฤษฎีแม่เหล็กไฟฟ้าและศักดาเชิงเวกเตอร์	⟷						
2. ศึกษาเรื่องค่าคงตัวเฟส		⟷					
3. ศึกษาแบบรูปของท่อนำคลื่นภาคตัดขวางสี่เหลี่ยม			⟷	⟷			
4. เขียนและทดสอบโปรแกรม					⟷	⟷	
5. สรุป และวิเคราะห์ผล							⟷

1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 มีความรู้ความเข้าใจในหลักการและทฤษฐีที่ใช้ในการวิเคราะห์ท่อนำคลื่นภาคตัดขวางสี่เหลี่ยม

1.5.2 ได้ศึกษาพารามิเตอร์ต่างๆที่มีผลต่อการวิเคราะห์ท่อนำคลื่นภาคตัดขวางสี่เหลี่ยม

1.5.3 มีความรู้ความเข้าใจในการเขียนโปรแกรมเพื่อช่วยในการวิเคราะห์ตัวแปรที่ศึกษา

1.5.4 ได้โปรแกรมที่ช่วยในการวิเคราะห์ท่อนำคลื่น

1.5.5 เป็นแนวทางในการพัฒนาใช้โปรแกรมในการวิเคราะห์การสื่อสารโดยผ่าท่อนำคลื่นภาคตัดขวางสี่เหลี่ยม

1.6 งบประมาณที่ใช้

1.6.1 ค่าแผ่นซีดีรอมบันทึกข้อมูล	เป็นเงิน	500	บาท
1.6.2 ค่าจัดทำเอกสารและเข้าเล่มรายงาน	เป็นเงิน	500	บาท
1.6.3 ค่าใช้จ่ายอื่นๆ	เป็นเงิน	500	บาท
รวมเป็นเงินทั้งสิ้น		1,500	บาท

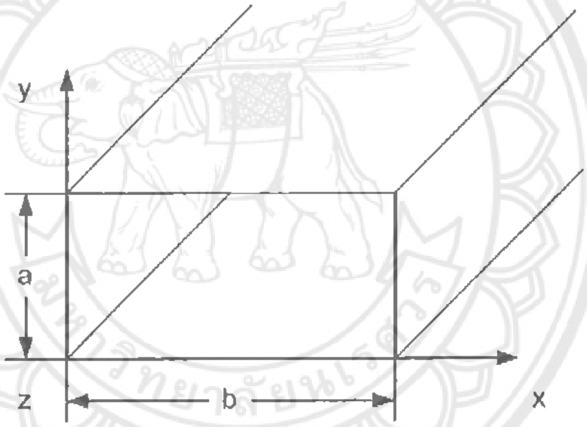
บทที่ 2

หลักการและทฤษฎีเบื้องต้น

การวิเคราะห์ท่อนำคลื่นภาคตัดขวางสี่เหลี่ยมนี้ จะแยกพิจารณาเป็น 2 ลักษณะ ลักษณะแรกจะพิจารณาท่อนำคลื่นกลวง และอีกลักษณะจะพิจารณาท่อนำคลื่นที่มีการบรรจุไดอิเล็กตริกบางส่วน โดยจะกล่าวถึงลักษณะท่อนำคลื่นกลวงก่อนมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1 ท่อนำคลื่นกลวง

พิจารณาท่อนำคลื่นที่มีภาคตัดขวางรูปสี่เหลี่ยมกลวง ความกว้าง a วางตัวในแนวแกน y, ความยาว b วางตัวในแนวแกน x และความยาวเป็นอนันต์ในแนวแกน z ลักษณะดังรูปที่2.1 การวิเคราะห์โครงสร้างนี้จะอาศัยสมการแมกแวลล์และเงื่อนไขขอบเขต แบบแผนนี้จะเกิดขึ้นจะเป็น TE^z ,TM^z เท่านั้น โดยจะกล่าวถึง TE^z และ TM^z ตามลำดับดังนี้



รูปที่ 2.1 ท่อนำคลื่นภาคตัดขวางสี่เหลี่ยม ความกว้าง a ความยาว b

2.1.1 แบบแผนคลื่นไฟฟ้าตามขวาง Transverse Electric (TE^z)

ในแบบแผนนี้สนามไฟฟ้าจะมีองค์ประกอบเฉพาะในแนวตามขวางเท่านั้นและไม่มีสนามไฟฟ้าในแนวแกน ($E_x \neq 0, E_y \neq 0$, $E_z = 0$) ส่วนสนามแม่เหล็กจะมีครบทุกองค์ประกอบ สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กสามารถหาได้จากศักย์เชิงเวกเตอร์ **F** สำหรับ กรณี TE^z ศักย์เชิงเวกเตอร์ **F** จะมีเพียงองค์ประกอบ z เพียงองค์ประกอบเดียวเท่านั้น

$$E_x = -\frac{1}{\varepsilon}\frac{\partial F_z}{\partial y} \qquad (2.1\text{ก}) \qquad\qquad H_x = -j\frac{1}{\omega\mu\varepsilon}\frac{\partial^2 F_z}{\partial x \partial z} \qquad (2.1\text{ง})$$

$$E_y = -\frac{1}{\varepsilon}\frac{\partial F_z}{\partial z} \qquad (2.1\text{ข}) \qquad\qquad H_y = -j\frac{1}{\omega\mu\varepsilon}\frac{\partial^2 F_z}{\partial y \partial z} \qquad (2.1\text{จ})$$

$$E_z = 0 \qquad (2.1ค) \qquad\qquad H_z = -j\frac{1}{\omega\mu\varepsilon}\left(\frac{\partial^2}{\partial z^2}+\beta^2\right)F_z \qquad (2.1ฉ)$$

โดยที่ F_z จะสอดคล้องกับสมการคลื่น

$$\nabla^2 F_z(x,y,z)+\beta^2 F_z(x,y,z)=0 \qquad (2.2)$$

เมื่อกระจายจะได้ว่า

$$\frac{\partial^2 F_z}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 F_z}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 F_z}{\partial z^2}+\beta^2 F_z=0 \qquad (2.2ก)$$

ผลเฉลยทั่วไปของสมการ (2.2ก) คือ

$$F_z(x,y,z)=f(x)g(y)h(z) \qquad (2.3)$$

เมื่อท่อนำคลื่นมีขอบเขตของความกว้าง x และยาว y จัดให้อยู่ในรูปแบบของสมการคลื่นตามลักษณะโครงสร้างตามรูปที่ 2.1 มีค่าเป็น

$$f(x)=C_1\cos(\beta_x x)+D_1\sin(\beta_x x) \qquad (2.4ก)$$

$$g(y)=C_2\cos(\beta_y y)+D_2\sin(\beta_y y) \qquad (2.4ข)$$

เพราะว่า ท่อนำคลื่นมีความยาวอนันต์และการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้าในทิศแกน z จะต้องเป็นคลื่นจร จะได้

$$h(z)=A_3e^{-j\beta_z z}+B_3e^{+j\beta_z z} \qquad (2.5)$$

แทนสมการที่ (2.4ก) ถึง (2.5) ลงในสมการ (2.3)

$$F_z(x,y,z)=\left[C_1\cos(\beta_x x)+D_1\sin(\beta_x x)\right]\left[C_2\cos(\beta_x y)+D_2\sin(\beta_x y)\right] \\ \times\left[A_3e^{-j\beta_z z}+B_3e^{+j\beta_z z}\right] \qquad (2.6)$$

ในกรณีท่อนำคลื่นกลวงที่เดินทางในทิศทาง +z และในทิศทาง -z จะเหมือนกัน ดังนั้นจะพิจารณาเฉพาะคลื่นในทิศทาง +z เท่านั้น ฟังก์ชันเอ็กโพเนนเชียลในสมการที่ (2.6) เป็นคลื่นจรในทิศทาง +z เมื่อคลื่นจรเดินทางในทิศ +z แล้ว พจน์ $B_3 = 0$ ทำให้ได้

$$F_z^{+}(x,y,z)=\left[C_1\cos\left(\beta_x x\right)+D_1\sin\left(\beta_x x\right)\right]$$
$$\times\left[C_2\cos\left(\beta_x y\right)+D_2\sin\left(\beta_x y\right)\right]A_3e^{-j\beta_z z} \tag{2.7}$$

โดยที่

$$\beta_x{}^2+\beta_y{}^2+\beta_z{}^2=k_0^2=\omega^2\mu\varepsilon \tag{2.8}$$

โดยที่ $C_1, D_1, C_2, D_2, A_3, \beta_x, \beta_y$ เป็นค่าคงที่ที่สามารถหาได้โดยการแทน (2.1ค) ลงใน(2.7) พร้อมกับเงื่อนไขขอบเขตผนังท่อนำคลื่น

สำหรับโครงสร้างตามรูปที่ 2.1 สนามไฟฟ้าจะต้องสอดคล้องกับเงื่อนไขขอบเขตตามผนังท่อนำคลื่นดังนี้

ผนังด้านบนและผนังด้านล่างในแนวสัมผัสท่อนำคลื่นมีค่าเป็นศูนย์หรือ

$$E_x\left(0\le x\le b, y=0, z\right)=E_x\left(0\le x\le b, y=a, z\right)=0 \tag{2.8ก}$$
$$E_z\left(0\le x\le b, y=0, z\right)=E_z\left(0\le x\le b, y=a, z\right)=0 \tag{2.8ข}$$

ผนังด้านซ้ายและผนังด้านขวาในแนวสัมผัสท่อนำคลื่นมีค่าเป็นศูนย์หรือ

$$E_y\left(x=0, 0\le y\le a, z\right)=E_y\left(x=0, 0\le y\le a, z\right)=0 \tag{2.8ค}$$
$$E_z\left(x=0, 0\le y\le a, z\right)=E_z\left(x=0, 0\le y\le a, z\right)=0 \tag{2.8ง}$$

สนามไฟฟ้าในองค์ประกอบ x สามารถหาได้จากการแทนสมการ (2.7) ลงใน (2.1ก)ได้

$$E_x^{+}(x,y,z)=-A_3\frac{\beta_y}{\varepsilon}\left[C_1\cos\left(\beta_x x\right)+D_1\sin\left(\beta_x x\right)\right]$$
$$\times\left[C_2\cos\left(\beta_x y\right)+D_2\sin\left(\beta_x y\right)\right]e^{-j\beta_z z} \tag{2.9}$$

แทนเงื่อนไขขอบเขต (2.8ก) ผนังด้านบน สนามไฟฟ้าในแนวองค์ประกอบ x จะได้ตามสมการดังนี้

$$E_x^{+}\left(0\le x\le b, y=0, z\right)=-A_3\frac{\beta_y}{\varepsilon}\left[C_1\cos\left(\beta_x x\right)+D_1\sin\left(\beta_x x\right)\right]$$
$$\times\left[-C_2\left(0\right)+D_2\left(1\right)\right]e^{-j\beta_z z}=0 \qquad (2.10)$$

สมการนี้จะเป็นจริงได้ก็ต่อเมื่อ

$$D_2=0 \qquad (2.10ก)$$

ในทำนองเดียวกันเมื่อใช้เงื่อนไขขอบเขตด้านบนจะได้

$$E_x^{+}\left(0\le x\le b, y=a, z\right)=-A_3\frac{\beta_y}{\varepsilon}\left[C_1\cos\left(\beta_x x\right)+D_1\sin\left(\beta_x x\right)\right]$$
$$\times\left[-C_2\sin\left(\beta_y a\right)\right]e^{-j\beta_z z}=0 \qquad (2.11)$$

สมการเป็นจริงเมื่อ

$$\sin\left(\beta_y a\right)=0 \qquad (2.12)$$

แล้ว

$$\beta_y a=\sin^{-1}\left(0\right)=n\pi \qquad n=0,1,2,\ldots \qquad (2.12ก)$$

หรือ

$$\beta_y=\frac{n\pi}{a} \qquad n=0,1,2,\ldots \qquad (2.12ข)$$

สมการ (2.12) คือ ฟังก์ชันเจาะจง (eigenfunction) และสมการ (2.12ข) คือค่าเจาะจง(eigenvalue) ในทำนองเดียวกัน เมื่อให้เงื่อนไขขอบเขตผนังด้านซ้ายและขวา

$$D_1=0 \qquad (2.13)$$

และ

$$\beta_x=\frac{m\pi}{b} \qquad \text{โดยที่} \quad m=0,1,2,\ldots \qquad (2.13ก)$$

แทนสมการ (2.10ก), (2.12ข), (2.13), (2.13ก) ลงในสมการ (2.7)ได้

$$F_z^+(x,y,z) = C_1C_2A_3\cos(\beta_x x)\cos(\beta_y y)e^{-j\beta_z z} \tag{2.14}$$

เพื่อความสะดวกให้ $C_1C_2A_3 = A_{mn}$

$$F_z^+(x,y,z) = A_{mn}\cos(\beta_x x)\cos(\beta_y y)e^{-j\beta_z z} \quad (2.14\text{ก})$$

เมื่อ $m = n = 0$ แล้ว E และ H จะเป็นศูนย์ ซึ่งในกรณีนี้จะไม่นำมาพิจารณาเพราะค่าเหล่านี้ทำให้สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กมีค่าเป็นศูนย์และถือได้ว่าเป็นคำตอบที่มีความสำคัญน้อย (trivial solution) ดังนั้น β_x และ β_y คือตัวเลขคลื่น (Wave number) และมีค่าดังนี้ตามลำดับ

$$\left.\begin{aligned} \beta_x &= \frac{m\pi}{b} = \frac{2\pi}{\lambda_x} \Rightarrow \lambda_x = \frac{2b}{m} & m &= 0,1,2,\ldots \\ \beta_y &= \frac{n\pi}{a} = \frac{2\pi}{\lambda_y} \Rightarrow \lambda_y = \frac{2a}{n} & n &= 0,1,2,\ldots \end{aligned}\right\} m = n \neq 0 \quad (2.14\text{ข})$$

ตัวเลขคลื่น β_x และ β_y จะสัมพันธ์กับ β_z ตามสมการ(2.8) และสมการ(2.8)สามารถแสดงอยู่ในรูปของความยาวคลื่นได้ ในทิศทาง $z\ (\lambda_z = \lambda_g)$ และแทนใน (2.7)

$$\frac{1}{\lambda_x^2} + \frac{1}{\lambda_y^2} + \frac{1}{\lambda_z^2} = \frac{1}{\lambda^2} \quad (2.14\text{ค})$$

ท้ายที่สุดสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก TE_{mn}^{+z} สามารถหาได้จากการแทนสมการ (2.14ก) และ (2.14ข) ลงใน (2.1ก) – (2.1ฉ) ซึ่งมีค่าเป็น

$$E_x^+ = A_{mn}\cos(\beta_x x)\sin(\beta_y y)e^{-j\beta_z z} \quad (2.15\text{ก})$$

$$E_y^+ = -A_{mn}\frac{\beta_x}{\varepsilon}\sin(\beta_x x)\cos(\beta_y y)e^{-j\beta_z z} \quad (2.15\text{ข})$$

$$E_z^+ = 0 \quad (2.15\text{ค})$$

$$H_x^+ = A_{mn}\frac{\beta_x\beta_z}{\omega\mu\varepsilon}\sin(\beta_x x)\cos(\beta_y y)e^{-j\beta_z z} \quad (2.15\text{ง})$$

$$H_y^+ = A_{nm}\frac{\beta_y\beta_z}{\omega\mu\varepsilon}\cos(\beta_x x)\sin(\beta_y y)e^{-j\beta_z z} \tag{2.15จ}$$

$$H_z^+ = -jA_{nm}\frac{\beta_c^2}{\omega\mu\varepsilon}\cos(\beta_x x)\cos(\beta_y y)e^{-j\beta_z z} \tag{2.15ฉ}$$

สำหรับกรณีที่ β_z มีค่าเท่ากับศูนย์แล้วสมการที่ (2.8) จะกลายเป็น

$$\beta_x^2 + \beta_y^2 = k_c^2 \tag{2.16}$$

แล้วจะเรียก k_c ว่า ตัวเลขคลื่นตัด (Cutoff frequency number) เขียนแทนได้

$$k_c^2 \equiv \left(\frac{2\pi}{\lambda_c}\right)^2 = k_0^2 - \beta_z^2 = \beta_x^2 + \beta_y^2 = \left(\frac{m\pi}{b}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{a}\right)^2 \tag{2.17}$$

ค่าคงที่ k_c คือค่า k_0 ที่ต่ำที่สุดที่ทำให้คลื่นสามารถเดินทางในท่อนำคลื่นได้โดยสามารถหาได้จากสมการข้างล่างนี้

$$k_c = k_0\Big|_{\beta_z=0} = \omega\sqrt{\mu\varepsilon}\Big|_{\beta_z=0} = \omega_c\sqrt{\mu\varepsilon} = \sqrt{\left(\frac{m\pi}{b}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{a}\right)^2} \tag{2.18}$$

และสมการ (2.18) สามารถเขียนในรูปของความถี่ได้เป็น

$$(f_c)_{mn} = \frac{1}{2\pi\sqrt{\mu\varepsilon}}\sqrt{\left(\frac{m\pi}{b}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{a}\right)^2} \quad \left.\begin{matrix} m = 0,1,2,\ldots \\ n = 0,1,2,\ldots \end{matrix}\right\} m = n \neq 0 \tag{2.19}$$

เมื่อ $(f_c)_{mn}$ คือความถี่ตัดของแบบแผนคลื่น mn
ค่า β_z สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของความถี่ได้ดังนี้

$$\beta_z^2 = k_0^2 - \beta_c^2 = k_0^2 - \left[\left(\frac{m\pi}{b}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{a}\right)^2\right] \tag{2.20}$$

หรือ

$$
(\beta_z)_{mn} = \begin{cases} \pm\sqrt{k_0^2 - k_c^2} = \pm k_0\sqrt{1-\left(\dfrac{k_c}{k_0}\right)^2} & \\ = \pm k_0\sqrt{1-\left(\dfrac{\lambda}{\lambda_c}\right)^2} = \pm k_0\sqrt{1-\left(\dfrac{f_c}{f}\right)^2} & k_0 > k_c, f > f_c \quad (2.21\text{ก}) \\ 0 & k_0 = k_c, f = f_c \quad (2.21\text{ข}) \\ \pm j\sqrt{k_c^2 - k_0^2} = \pm jk_0\sqrt{\left(\dfrac{k_c}{k_0}\right)^2 - 1} & \\ = \pm jk_0\sqrt{\left(\dfrac{\lambda}{\lambda_c}\right)^2 - 1} = \pm jk_0\sqrt{\left(\dfrac{f_c}{f}\right)^2 - 1} & k_0 < k_c, f < f_c \quad (2.21\text{ค}) \end{cases}
$$

ค่า β_z สามารถเขียนอยู่ในรูปความยาวคลื่นหรือความถี่ได้ดังนี้

$$
(\beta_z)_{mn} = \begin{cases} k_0\sqrt{1-\left(\dfrac{\lambda}{\lambda_c}\right)^2} = k_0\sqrt{1-\left(\dfrac{f_c}{f}\right)^2} & \text{for } f > f_c \quad (2.22\text{ก}) \\ 0 & \text{for } f = f_c \quad (2.22\text{ข}) \\ -jk_0\sqrt{\left(\dfrac{\lambda}{\lambda_c}\right)^2 - 1} = -jk_0\sqrt{\left(\dfrac{f_c}{f}\right)^2 - 1} & \text{for } f_c < f \quad (2.22\text{ค}) \end{cases}
$$

อิมพิแดนซ์สามารถหาได้จากอัตราส่วนระหว่างสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามสมการข้างล่าง

$$
Z_w^{+z}\left(TE_{mn}^z\right) \equiv \frac{E_x}{H_y} = -\frac{E_y}{H_x} = \frac{\omega\mu}{\beta_z} \quad (2.23)
$$

แทน(2.19) ลงใน (2.18ก) ถึง (2.18ค)

$$Z_w^{+z}\left(TE_{mn}^z\right)=\begin{cases} \dfrac{\omega\mu}{k_0\sqrt{1-\left(\dfrac{f_c}{f}\right)^2}}=\dfrac{\sqrt{\dfrac{\mu}{\varepsilon}}}{\sqrt{1-\left(\dfrac{f_c}{f}\right)^2}}=\dfrac{\eta}{\sqrt{1-\left(\dfrac{f_c}{f}\right)^2}} & \text{for } f>f_c \quad (2.24\text{ก}) \\ \infty & \text{for } f=f_c \quad (2.24\text{ข}) \\ +j\dfrac{\omega\mu}{k_0\sqrt{\left(\dfrac{f_c}{f}\right)^2-1}}=+j\dfrac{\sqrt{\dfrac{\mu}{\varepsilon}}}{\sqrt{\left(\dfrac{f_c}{f}\right)^2-1}}=+j\dfrac{\eta}{\sqrt{\left(\dfrac{f_c}{f}\right)^2-1}} & \text{for } f<f_c \quad (2.24\text{ค}) \end{cases}$$

เรียก Z_w^{+z} ว่า อิมพิแดนซ์คลื่น (Wave impedance) และ η ว่า อิมพิแดนซ์อินทรินซิก (intrinsic impedance) เมื่อตัวยก + หมายถึงคลื่นที่กำลังเคลื่อนที่ในทิศ +z และเมื่อทราบ β_z จะสามารถหาค่าความยาวคลื่นตามแกนของท่อนำคลื่นได้คือ

$$\beta_z\equiv\frac{2\pi}{\lambda_z}\Rightarrow\lambda_z=\lambda_g=\frac{2\pi}{\beta_z} \qquad (2.25)$$

หรือ

$$\left(\lambda_z\right)_{mn}=\left(\lambda_g\right)_{mn}=\begin{cases} \dfrac{2\pi}{k_0\sqrt{1-\left(\dfrac{f_c}{f}\right)^2}}=\dfrac{\lambda}{\sqrt{1-\left(\dfrac{f_c}{f}\right)^2}}=\dfrac{\lambda}{\sqrt{1-\left(\dfrac{f_c}{f}\right)^2}} & \text{for } f>f_c \quad (2.25\text{ก}) \\ \infty & \text{for } f=f_c \quad (2.25\text{ข}) \\ +j\dfrac{2\pi}{k_0\sqrt{\left(\dfrac{f_c}{f}\right)^2-1}}=+j\dfrac{\lambda}{\sqrt{\left(\dfrac{f_c}{f}\right)^2-1}}=+j\dfrac{\lambda}{\sqrt{\left(\dfrac{f_c}{f}\right)^2-1}} & \text{for } f<f_c \quad (2.25\text{ค}) \end{cases}$$

ค่าคงที่ λ_z มีชื่อเรียกว่า ความยาวคลื่นนำทาง (Guide wavelength)

ถ้า $b>a$ ความถี่ตัดที่ต่ำที่สุดจะคำนวณได้จากสมการ (2.19) จะมีค่าตามสมการข้างล่าง

$$\left(f_c\right)_{10}=\frac{1}{2\pi\sqrt{\mu\varepsilon}}\frac{\pi}{b}=\frac{1}{2b\sqrt{\mu\varepsilon}} \qquad (2.26)$$

แบบแผน TE_{10} มีชื่อเรียกว่า ความยาวคลื่นเป็นใหญ่ (Dominant mode)

และอัตราส่วนความถี่ตัด (Cutoff frequency) ของ TE_{mn}^{+z} คือ

$$R_{mn} = \frac{(f_c)_{mn}^{TE}}{(f_c)_{mn}^{TE}} = \sqrt{(m)^2 + \left(\frac{nb}{a}\right)^2} \quad \left.\begin{matrix} m = 0,1,2,3,... \\ n = 0,1,2,3,... \end{matrix}\right\} m = n \neq 0 \qquad (2.27)$$

2.1.2 แบบแผนคลื่นแม่เหล็กตามขวาง Transverse Magnetic (TM^z)

ในแบบแผนนี้สนามแม่เหล็กจะมีองค์ประกอบเฉพาะในแนวตามขวางเท่านั้นและไม่มีสนามแม่เหล็กในแนวแกน ($H_x \neq 0, H_y \neq 0, H_z = 0$) ส่วนสนามไฟฟ้าจะมีครบทุกองค์ประกอบ สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กสามารถหาได้จากศักดาเชิงเวกเตอร์ **A** โดยที่ A_z จะสอดคล้องกับสมการคลื่น

ในทำนองเดียวกันแบบแผนคลื่น TM^z จะคล้ายคลึงกับแบบแผนคลื่น TE^z แต่จะแตกต่างกันตรงที่ให้ **A** $= \hat{a}_z A_z(x,y,z)$ และศักย์เชิงเวกเตอร์เท่ากับศูนย์ (**F** = 0)

$$E_x = -j\frac{1}{\mu\omega\varepsilon}\frac{\partial^2 A_z}{\partial x \partial z} \quad (2.28ก) \qquad H_x = \frac{1}{\mu}\frac{\partial A_z}{\partial y} \quad (2.28ง)$$

$$E_y = -j\frac{1}{\mu\omega\varepsilon}\frac{\partial^2 A_z}{\partial y \partial z} \quad (2.28ข) \qquad H_y = -\frac{1}{\mu}\frac{\partial A_z}{\partial x} \quad (2.28จ)$$

$$E_z = -j\frac{1}{\mu\omega\varepsilon}\left(\frac{\partial^2}{\partial z^2} + \beta^2\right)A_z \quad (2.28ค) \qquad H_z = 0 \quad (2.28ฉ)$$

$$\nabla^2 A_z + \beta^2 A_z = \frac{\partial^2 A_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 A_z}{\partial z^2} + \beta^2 A_z = 0 \qquad (2.29)$$

$$A_z(x,y,z) = \left[C_1\cos(\beta_x x) + D_1\sin(\beta_x x)\right]\left[C_2\cos(\beta_x y) + D_2\sin(\beta_x y)\right] \times\left[A_3 e^{-j\beta_z z} + B_3 e^{+j\beta_z z}\right] \qquad (2.30)$$

ในกรณีท่อนำคลื่นที่เดินทางในทิศทาง +z และในทิศทาง –z จะเหมือนกัน ดังนั้นจะพิจารณาเฉพาะคลื่นในทิศทาง +z และมีเงื่อนไขขอบเขตตามรูปที่ 2.1 สามารถเขียนเป็น

$$\begin{aligned} A_z^{+}(x,y,z) &= D_1 D_2 A_3 \sin(\beta_x x)\sin(\beta_y x)e^{-j\beta_z z} \\ &= B_{mn}\sin(\beta_x x)\sin(\beta_y x)e^{-j\beta_z z} \end{aligned} \qquad (2.30ก)$$

ค่า β_x และ β_y คือตัวเลขคลื่น (Wave number) และมีค่าดังนี้ตามลำดับ

$$\beta_x \equiv \frac{2\pi}{\lambda_x} = \frac{m\pi}{b} \Rightarrow \lambda_x = \frac{2b}{m} \qquad m = 1, 2, 3,\ldots \tag{2.31ก}$$

$$\beta_y \equiv \frac{2\pi}{\lambda_y} = \frac{n\pi}{a} \Rightarrow \lambda_y = \frac{2a}{n} \qquad n = 1, 2, 3,\ldots \tag{2.31ข}$$

ท้ายที่สุดสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก TM_{mn}^{+z} สามารถหาได้จากการแทนสมการ (2.30ก) ลงใน (2.28) ซึ่งมีค่าเป็น

$$E_x^+ = -B_{mn}\frac{\beta_x\beta_z}{\omega\mu\varepsilon}\cos\left(\beta_x x\right)\sin\left(\beta_y y\right)e^{-j\beta_z z} \tag{2.32ก}$$

$$E_y^+ = -B_{mn}\frac{\beta_y\beta_z}{\omega\mu\varepsilon}\sin\left(\beta_x x\right)\cos\left(\beta_y y\right)e^{-j\beta_z z} \tag{2.32ข}$$

$$E_z^+ = -jB_{mn}\frac{\beta_z^2}{\omega\mu\varepsilon}\sin\left(\beta_x x\right)\sin\left(\beta_y y\right)e^{-j\beta_z z} \tag{2.32ค}$$

$$H_x^+ = B_{mn}\frac{\beta_y}{\mu}\sin\left(\beta_x x\right)\cos\left(\beta_y y\right)e^{-j\beta_z z} \tag{2.32ง}$$

$$H_y^+ = -B_{mn}\frac{\beta_x}{\mu}\cos\left(\beta_x x\right)\sin\left(\beta_y y\right)e^{-j\beta_z z} \tag{2.32จ}$$

$$H_z^+ = 0 \tag{2.32ฉ}$$

จะได้สมการ อิมพิแดนซ์ของคลื่น, ค่าคงที่การแพร่กระจาย, ความถี่ตัด และความยาวคลื่น ตามลำดับ

$$Z_w^{+z}\left(TM_{mn}^z\right) \equiv \frac{E_x^+}{H_y^+} = -\frac{E_y^+}{H_x^+} = \frac{\beta_z}{\omega\varepsilon} = \begin{cases} +\eta\sqrt{1-\left(\dfrac{f_c}{f}\right)^2} & \text{for } f > f_c \quad (2.33\text{ก}) \\ 0 & \text{for } f = f_c \quad (2.33\text{ข}) \\ -j\eta\sqrt{\left(\dfrac{f_c}{f}\right)^2 - 1} & \text{for } f < f_c \quad (2.33\text{ค}) \end{cases}$$

$$(\beta_z)_{mn} \equiv \frac{2\pi}{\lambda_z} = \begin{cases} k_0\sqrt{1-\left(\dfrac{f_c}{f}\right)^2} & \text{for } f > f_c \quad (2.34ก) \\ 0 & \text{for } f = f_c \quad (2.34ข) \\ -jk_0\sqrt{\left(\dfrac{f_c}{f}\right)^2-1} & \text{for } f < f_c \quad (2.34ค) \end{cases}$$

$$k_c^2 \equiv \left(\frac{2\pi}{\lambda_c}\right)^2 = k_0^2 - \beta_z^2 = \beta_x^2 + \beta_y^2 = \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2 \qquad (2.35)$$

$$(f_c)_{mn} = \frac{1}{2\pi\sqrt{\mu\varepsilon}}\sqrt{\left(\frac{m\pi}{b}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{a}\right)^2} \qquad \begin{matrix} m = 1,2,3,\ldots \\ n = 1,2,3,\ldots \end{matrix} \qquad (2.36)$$

$$(\lambda_z)_{mn} = (\lambda_g)_{mn} = \begin{cases} \dfrac{\lambda}{\sqrt{1-\left(\dfrac{f_c}{f}\right)^2}} = \dfrac{\lambda}{\sqrt{1-\left(\dfrac{\lambda}{\lambda_c}\right)^2}} & \text{for } f > f_c \quad (2.37ก) \\ \infty & \text{for } f = f_c \quad (2.37ข) \\ j\dfrac{\lambda}{\sqrt{\left(\dfrac{f_c}{f}\right)^2-1}} = j\dfrac{\lambda}{\sqrt{\left(\dfrac{\lambda}{\lambda_c}\right)^2-1}} & \text{for } f < f_c \quad (2.37ค) \end{cases}$$

ความถี่ตัดที่ต่ำที่สุดจะคำนวณได้จากสมการ (2.36) จะมีค่าตามสมการข้างล่าง

$$(f_c)_{11} = \frac{1}{2\sqrt{\mu\varepsilon}}\sqrt{\left(\frac{1}{a}\right)^2 + \left(\frac{1}{b}\right)^2} = \frac{1}{2a\sqrt{\mu\varepsilon}}\sqrt{1+\left(\frac{a}{b}\right)^2} > \frac{1}{2a\sqrt{\mu\varepsilon}} \qquad (2.38)$$

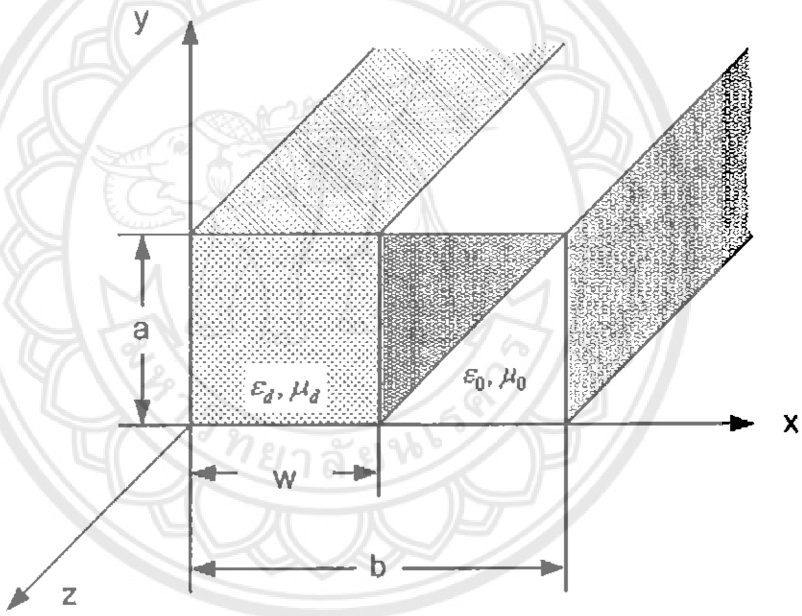
แบบแผน TM_{11}^z เป็นแบบแผนที่ได้จากความถี่ตัดที่ต่ำที่สุด

จะได้ T_{mn} คือ อัตราส่วนของความถี่ตัด ในแบบแผน TM_{mn}^z

$$T_{mn} = \frac{(f_c)_{mn}^{TM}}{(f_c)_{10}^{TM}} = \sqrt{(m)^2 + \left(\frac{na}{b}\right)^2} \qquad \begin{matrix} m = 1,2,3,\ldots \\ n = 1,2,3,\ldots \end{matrix} \qquad (2.39)$$

2.2 ท่อนำคลื่นที่มีการบรรจุไดอิเล็กตริกบางส่วน

ท่อนำคลื่นอีกลักษณะหนึ่งที่นำมาศึกษาคือท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยไดอิเล็กตริกบางส่วน โดยท่อนำคลื่นนี้จะไม่เกิดแบบแผน TE^z และ TM^z เหมือนกับท่อนำคลื่นกลวงแต่จะเป็นแบบแผนคลื่นผสมโดยมีชื่อเรียกว่าแบบแผนคลื่นสนามไฟฟ้าส่วนตัดตามยาว (Longitudinal Section Electric : LSE^x) และแบบแผนคลื่นสนามแม่เหล็กส่วนตัดตามยาว (Longitudinal Section Magnetic:LSM^x) เพื่อที่จะศึกษาปัญหานี้จะพิจารณาท่อนำคลื่นที่มีโครงสร้างดังรูปที่ 2.2 โดยที่ท่อนำคลื่นจะมีความยาว a ในแนวแกน y และมีความยาว b ในแนวแกน x บางส่วนของท่อนำคลื่นจะบรรจุด้วยไดอิเล็กตริกที่มีค่าสภาพยอมสัมพัทธ์เท่ากับ ε_r มีความซึมซาบได้เท่ากับ μ_r เนื่องจากสนามไฟฟ้าถูกบรรจุตามแนวตั้งฉะนั้นแบบแผนที่เกิดขึ้นคือ LSE^x และ LSM^x และจะศึกษา LSE^x ก่อนโดยมีรายละเอียดดังนี้



รูปที่ 2.2 ลักษณะของท่อนำคลื่นผสม(Hybrid mode)

2.2.1 แบบแผนคลื่นสนามไฟฟ้าส่วนตัดตามยาว (Longitudinal Section Electric: LSE^x)

ในแบบแผนนี้สนามไฟฟ้าจะมีองค์ประกอบเฉพาะในแนวตามยาวเท่านั้นและไม่มีสนามไฟฟ้าในแนวแกน ($E_y \neq 0, E_z \neq 0$, $E_x = 0$) ส่วนสนามแม่เหล็กจะมีครบทุกองค์ประกอบ สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กสามารถหาได้จากศักย์เชิงเวกเตอร์ **F** สำหรับ กรณี LSE^x ศักย์เชิงเวกเตอร์ **F** จะมีเพียงองค์ประกอบ x เพียงองค์ประกอบเดียวเท่านั้น

$$E_x = 0 \quad (2.40ก) \qquad H_x = -j\frac{1}{\omega\mu\varepsilon}(\frac{\partial^2}{\partial x^2}+\beta^2)F_x \quad (2.40ง)$$

$$E_y = -\frac{1}{\varepsilon}\frac{\partial F_x}{\partial z} \quad (2.40ข) \qquad H_y = -j\frac{1}{\omega\mu\varepsilon}\frac{\partial^2 F_x}{\partial x \partial y} \quad (2.40จ)$$

$$E_z = \frac{1}{\varepsilon}\frac{\partial F_x}{\partial y} \quad (2.40ค) \qquad H_z = -j\frac{1}{\omega\mu\varepsilon}\frac{\partial^2 F_x}{\partial x \partial z} \quad (2.40ฉ)$$

โดยที่ F_x จะสอดคล้องกับสมการคลื่น

$$F_x^+(x,y,z) = [C_1\cos(\beta_x x) + D_1\sin(\beta_x x)] \times [C_2\cos(\beta_y y) + D_2\sin(\beta_y y)]A_3 e^{-j\beta_z z} \quad (2.41)$$

โดยที่

$$\beta_x^2 + \beta_y^2 + \beta_z^2 = k_0^2 = \omega^2\mu\varepsilon \quad (2.42)$$

สมการที่ (2.41) จะพิจารณาเฉพาะคลื่นที่เดินทางในทิศ +z เท่านั้นเนื่องจากตัวกลางของท่อนำคลื่นเป็นอวกาศว่างและไดอิเล็กตริกเป็นไอโซทรอปิก คลื่นที่เดินทางในทิศ +z และ -z จะเหมือนกัน

สมการคลื่นจรในแนวแกน +z ของท่อนำคลื่นบรรจุด้วยไดอิเล็กตริก (Dielectric region)

$$F_x^d(0 \le x \le w, y, z) = [C_1^d\cos(\beta_x x) + D_1^d\sin(\beta_x x)] \times [C_2^d\cos(\beta_y y) + D_2^d\sin(\beta_y y)]A_3^d e^{-j\beta_z z} \quad (2.43)$$

โดยที่

$$\beta_{xd}^2 + \beta_{yd}^2 + \beta_z^2 = \beta_d^2 = \omega^2\mu_d\varepsilon_d \quad (2.44)$$

สมการคลื่นจรในแนวแกน +z ของท่อนำคลื่นบรรจุด้วยอวกาศว่าง (Free-space region)

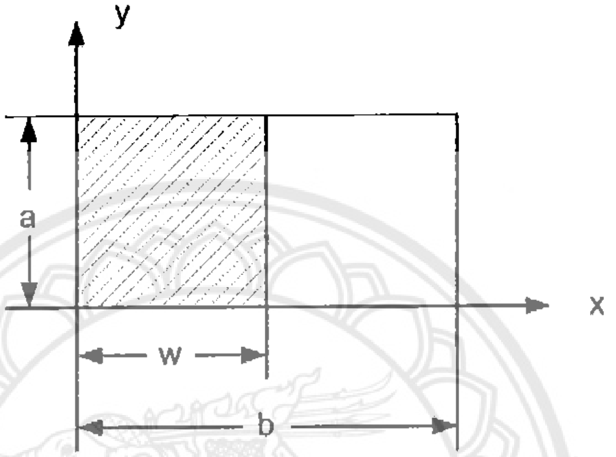
$$F_x^0(w \le x \le b, y, z) = \left\{C_1^0\cos[\beta_x(b-x)] + D_1^0\sin[\beta_x(b-x)]\right\} \times [C_2^0\cos(\beta_y y) + D_2^0\sin(\beta_y y)]A_3^0 e^{-j\beta_z z} \quad (2.45)$$

โดยที่

$$\beta_{x0}^2 + \beta_{y0}^2 + \beta_z^2 = \beta_0^2 = \omega^2\mu_0\varepsilon_0 \quad (2.46)$$

กำหนดให้ท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยไดอิเล็กตริกจะใช้สัญลักษณ์ d กำกับและท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยอวกาศว่างจะใช้สัญลักษณ์ 0 กำกับ ดังแสดงในสมการ (2.43) และ (2.45) ตามลำดับ

พิจารณาเงื่อนไขขอบเขตบนรอยต่อและอวกาศว่างที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ภาคตัดขวางสี่เหลี่ยมของท่อนำคลื่นที่ใช้ในการพิจารณาเงื่อนไขขอบเขต

$$E_z^d(0 \le x \le w, y = 0, z) = E_z^d(0 \le x \le w, y = a, z) = 0 \quad (2.47)$$

$$E_z^d(x = 0, 0 \le y \le a, z) = 0 \quad (2.48)$$

$$E_z^d(x = w, 0 \le y \le a, z) = E_z^0(x = w, 0 \le y \le a, z) \quad (2.49)$$

$$E_z^0(w \le x \le b, y = 0, z) = E_z^0(w \le x \le b, y = a, z) = 0 \quad (2.50)$$

$$E_z^0(x = b, 0 \le y \le a, z) = 0 \quad (2.51)$$

$$H_z^d(x = w, 0 \le y \le a, z) = H_z^0(x = w, 0 \le y \le a, z) \quad (2.52)$$

พิจารณาสนามไฟฟ้าในบริเวณอวกาศว่าง ตามสมการ

$$E_z^0 = \frac{1}{\varepsilon_0}\frac{\partial F_x^0}{\partial y} = \frac{\beta_{y0}}{\varepsilon_0}\left\{C_1^0 \cos[\beta_{x0}(b-x)] + D_1^0 \sin[\beta_{x0}(b-x)]\right\}$$
$$\times\, [-C_2^0 \sin(\beta_{y0} y) + D_2^0 \cos(\beta_{y0} y)] A_3^0 e^{-j\beta_z z} \quad (2.53)$$

จากเงื่อนไขขอบเขต (2.50) ณ ผนังด้านล่างของท่อนำคลื่นบริเวณอวกาศว่างได้

$$E_z^0(w \le x \le b, y=0, z) = 0$$
$$= \frac{\beta_{y0}}{\varepsilon_0}\left\{C_1^0 \cos[\beta_{x0}(b-x)] + D_1^0 \sin[\beta_{x0}(b-x)]\right\}$$
$$\times [-C_2^0(0) + D_2^0(1)] A_3^0 e^{-j\beta_z z}$$

ดังนั้น

$$D_2^0 = 0 \tag{2.54}$$

และพิจารณาเงื่อนไขขอบเขต (2.50) ณ ผนังด้านบนของท่อนำคลื่นบริเวณอวกาศว่างได้

$$E_z^0(w \le x \le b, y=a, z) = 0$$
$$= \frac{\beta_{y0}}{\varepsilon_0}\left\{C_1^0 \cos[\beta_{x0}(b-x)] + D_1^0 \sin[\beta_{x0}(b-x)]\right\}$$
$$\times [-C_2^0 \sin(\beta_{y0} b)] A_3^0 e^{-j\beta_z z}$$

ดังนั้น

$$\sin(\beta_{yo} a) = 0$$
$$\beta_{yo} = \frac{n\pi}{a} \quad ,n = 0,1,2,\ldots \tag{2.55}$$

จากเงื่อนไขขอบเขต (2.51) ณ บริเวณผนังด้านขวาของท่อนำคลื่นได้

$$E_z^0(x=b, 0 \le y \le a, z) = 0$$
$$= \frac{\beta_{y0}}{\varepsilon_0}\left\{C_1^0(1) + D_1^0(0)\right\} \times [-C_2^0 \sin(\beta_{y0} y)] A_3^0 e^{-j\beta_z z}$$

ดังนั้น

$$C_1^0 = 0 \tag{2.56}$$

ดังนั้น สมการ (2.45) สามารถลดรูปเป็น

$$F_x^0 = -A_{mn}^0 \sin[\beta_{x0}(b-x)] \sin(\beta_{yo} y) e^{-j\beta_z z} \tag{2.57}$$

$$\beta_{yo} = \frac{n\pi}{a} \quad ,n = 0,1,2,... \tag{2.58}$$

$$\beta_{x0}^2 + \beta_{y0}^2 + \beta_z^2 = \beta_{x0}^2 + (\frac{n\pi}{a})^2 + \beta_z^2 = \beta_0^2 = \omega^2 \mu_0 \varepsilon_0 \tag{2.59}$$

และ

$$E_z^0 = \frac{1}{\varepsilon_0} \frac{\partial F_x^0}{\partial y} = \frac{-\beta_{y0}}{\varepsilon_0} A_{mn}^0 \sin[\beta_{xo}(b-x)] \cos(\beta_{yo} y) e^{-j\beta_z z} \tag{2.60}$$

พิจารณาสนามไฟฟ้าในบริเวณไดอิเล็กตริก ตามสมการ

$$E_z^d = \frac{1}{\varepsilon_d} \frac{\partial F_x^d}{\partial y} = \frac{\beta_{yd}}{\varepsilon_d} \left\{ C_1^d \cos(\beta_{xd} x) + D_1^d \sin(\beta_{xd} x) \right\} \times [-C_2^d \sin(\beta_{yd} y) + D_2^d \cos(\beta_{yd} y)] A_3^d e^{-j\beta_z z} \tag{2.61}$$

พิจารณาเงื่อนไขขอบเขต (2.47) ณ ผนังด้านล่างของท่อนำคลื่นบริเวณไดอิเล็กตริกได้

$$E_z^d (0 \le x \le w, y = 0, z) = \frac{\beta_{yd}}{\varepsilon_d} \left\{ C_1^d \cos(\beta_{xd} x) + D_1^d \sin(\beta_{xd} x) \right\} \times [-C_2^d (0) + D_2^d (1)] A_3^d e^{-j\beta_z z}$$

ดังนั้น

$$D_2^d = 0 \tag{2.62}$$

และพิจารณาเงื่อนไขขอบเขต (2.47) ณ ผนังด้านบนของท่อนำคลื่นบริเวณไดอิเล็กตริกได้

$$E_z^d (0 \le x \le w, y = a, z) = \frac{\beta_{yd}}{\varepsilon_d} \left\{ C_1^d \cos(\beta_{xd} x) + D_1^d \sin(\beta_{xd} x) \right\} \times [-C_2^d \sin(\beta_{yd} b)] A_3^d e^{-j\beta_z z}$$

ดังนั้น

$$\sin(\beta_{yd}a) = 0$$

$$\beta_{yd} = \frac{n\pi}{a} \quad ,n = 0,1,2,... \tag{2.63}$$

พิจารณาเงื่อนไขขอบเขต (2.48) ณ บริเวณผนังด้านซ้ายของท่อนำคลื่นได้

$$E_z^d(x = 0, 0 \le y \le a, z) = 0$$

$$= \frac{\beta_{yd}}{\varepsilon_d}\left\{C_1^d(1) + D_1^d(0)\right\} \times [-C_2^d \sin(\beta_{yd}y)]A_3^d e^{-j\beta_z z}$$

ดังนั้น

$$C_1^d = 0 \tag{2.64}$$

ดังนั้น สมการ (2.43) สามารถลดรูปเป็น

$$F_x^d = -A_{mn}^d \sin(\beta_{xd}x)\sin(\beta_{yd}y)e^{-j\beta_z z} \tag{2.65}$$

$$\beta_{yd} = \frac{n\pi}{a} \quad ,n = 0,1,2,... \tag{2.66}$$

$$\beta_{xd}^2 + \beta_{yd}^2 + \beta_z^2 = \beta_{xd}^2 + (\frac{n\pi}{a})^2 + \beta_d^2 = \beta_0^2 = \omega^2\mu_d\varepsilon_d \tag{2.67}$$

และ

$$E_z^d = \frac{1}{\varepsilon_0}\frac{\partial F_x^d}{\partial y} = \frac{-\beta_{yd}}{\varepsilon_d}A_{mn}^d \sin(\beta_{xd}x)\cos(\beta_{yd}y)e^{-j\beta_z z} \tag{2.68}$$

จากเงื่อนไขขอบเขต (2.49) ณ บริเวณรอยต่อของอวกาศว่างและไดอิเล็กตริก โดยใช้สมการ (2.60) และ สมการ (2.68)

$$\frac{-\beta_{y0}}{\varepsilon_0}A_{mn}^0 \sin[\beta_{xo}(b-x)]\cos(\beta_{yo}y)e^{-j\beta_z z} = \frac{-\beta_{yd}}{\varepsilon_d}A_{mn}^d \sin(\beta_{xd}x)\cos(\beta_{yd}y)e^{-j\beta_z z}$$

$$\frac{1}{\varepsilon_0}A_{mn}^0 \sin[\beta_{xo}(b-x)] = \frac{1}{\varepsilon_d}A_{mn}^d \sin(\beta_{xd}x) \tag{2.69}$$

ใช้ สมการ (2.57) และสมการ (2.65) เพื่อพิจารณาองค์ประกอบ **H** ในแกน z ของสมการ (2.40ฉ)

$$H_z^0 = \frac{1}{\omega\mu_0\varepsilon_0}\frac{\partial^2 F_x}{\partial x\partial z} = \frac{\beta_{x0}\beta_z}{\omega\mu_0\varepsilon_0}A_{mn}^0\cos[\beta_{x0}(b-x)]\sin(\beta_{y0}y)e^{-j\beta_z z} \tag{2.70}$$

$$H_z^d = -\frac{1}{\omega\mu_d\varepsilon_d}\frac{\partial^2 F_x}{\partial x\partial z} = \frac{\beta_{xd}\beta_z}{\omega\mu_d\varepsilon_d}A_{mn}^d\cos(\beta_{xd}x)\sin(\beta_{yd}y)e^{-j\beta_z z} \tag{2.71}$$

เงื่อนไขขอบเขต (2.52) ณ บริเวณรอยต่อของอวกาศว่างและไดอิเล็กตริก และกำหนดให้ $\beta_{y0} = \beta_{yd}$

$$\frac{\beta_{x0}\beta_z}{\omega\mu_0\varepsilon_0}A_{mn}^0\cos[\beta_{x0}(b-x)]\sin(\beta_{y0}y)e^{-j\beta_z z} = -\frac{\beta_{xd}\beta_z}{\omega\mu_d\varepsilon_d}A_{mn}^d\cos(\beta_{xd}x)\sin(\beta_{yd}y)e^{-j\beta_z z}$$

$$\frac{\beta_{x0}}{\mu_0\varepsilon_0}A_{mn}^0\cos[\beta_{x0}(b-x)] = -\frac{\beta_{xd}}{\mu_d\varepsilon_d}A_{mn}^d\cos(\beta_{xd}x) \tag{2.72}$$

นำเอาสมการ (2.72) หารด้วยสมการ (2.69) ได้

$$\frac{\beta_{xo}}{\mu_0}\cot[\beta_{x0}(b-w)] = -\frac{\beta_{xd}}{\mu_d}\cot(\beta_{xd}w) \tag{2.73}$$

โดยที่

$$\beta_{x0}^2 + \beta_{y0}^2 + \beta_z^2 = \beta_{x0}^2 + (\frac{n\pi}{a})^2 + \beta_z^2 = \beta_0^2 = \omega^2\mu_0\varepsilon_0 \tag{2.74}$$

$$\beta_{xd}^2 + \beta_{yd}^2 + \beta_z^2 = \beta_{xd}^2 + (\frac{n\pi}{a})^2 + \beta_d^2 = \beta_0^2 = \omega^2\mu_d\varepsilon_d \tag{2.75}$$

สมการ(2.73)เป็นสมการที่ใช้หาคุณลักษณะของท่อนำคลื่น

2.2.2 แบบรูปคลื่นสนามแม่เหล็กส่วนตัดตามยาว (Longitudinal Section Magnetic: LSM^x)

แบบแผนนี้จะพิจารณาในทำนองเดียวกันแบบรูปคลื่นสนามไฟฟ้าส่วนตัดตามยาวของท่อนำคลื่นภาคตัดขวางสี่เหลี่ยม ดังนี้

ศักย์เวกเตอร์ในแนวแกน x บริเวณที่บรรจุด้วยไดอิเล็กตริก

$$A_x^d(0 \le x \le w, y, z) = [C_1^d\cos(\beta_x x) + D_1^d\sin(\beta_x x)] \times [C_2^d\cos(\beta_y y) + D_2^d\sin(\beta_y y)]A_3^d e^{-j\beta_z z} \tag{2.76}$$

โดยที่

$$\beta_{xd}^2 + \beta_{yd}^2 + \beta_z^2 = \beta_d^2 = \omega^2 \mu_d \varepsilon_d \tag{2.77}$$

ศักย์เวกเตอร์ในแนวแกน x บริเวณอวกาศว่าง

$$A_x^0(w \le x \le a, y, z) = \left\{C_1^0 \cos[\beta_x(a-x)] + D_1^0 \sin[\beta_x(a-x)]\right\} \times [C_2^0 \cos(\beta_y y) + D_2^0 \sin(\beta_y y)] A_3^0 e^{-j\beta_z z} \tag{2.78}$$

โดยที่

$$\beta_{x0}^2 + \beta_{y0}^2 + \beta_z^2 = \beta_0^2 = \omega^2 \mu_0 \varepsilon_0 \tag{2.79}$$

ดังนั้น ศักย์เวกเตอร์ในแนวแกน x บริเวณอวกาศว่างสามารถลดรูปเป็น

$$A_x^0 = -B_{mn}^0 \cos[\beta_{x0}(b-x)] \cos(\beta_{yo} y) e^{-j\beta_z z} \tag{2.80}$$

$$\beta_{yo} = \frac{n\pi}{a} \quad ,n = 1,2,3,... \tag{2.81}$$

$$\beta_{x0}^2 + \beta_{y0}^2 + \beta_z^2 = \beta_{x0}^2 + (\frac{n\pi}{a})^2 + \beta_z^2 = \beta_0^2 = \omega^2 \mu_0 \varepsilon_0 \tag{2.82}$$

ดังนั้น ศักย์เวกเตอร์ในแนวแกน x บริเวณที่บรรจุด้วยไดอิเล็กตริกสามารถลดรูปเป็น

$$A_x^d = -B_{mn}^d \cos(\beta_{xd} x) \cos(\beta_{yd} y) e^{-j\beta_z z} \tag{2.83}$$

$$\beta_{yd} = \frac{n\pi}{a} \quad ,n = 1,2,3,... \tag{2.84}$$

$$\beta_{xd}^2 + \beta_{yd}^2 + \beta_z^2 = \beta_{xd}^2 + (\frac{n\pi}{a})^2 + \beta_d^2 = \beta_0^2 = \omega^2 \mu_d \varepsilon_d \tag{2.85}$$

และ

$$\frac{1}{\mu_0} B_{mn}^0 \cos[\beta_{xo}(b-w)] = \frac{1}{\mu_d} B_{mn}^d \cos(\beta_{xd} w) \tag{2.86}$$

$$-\frac{\beta_{x0}}{\mu_0 \varepsilon_0} B_{mn}^0 \sin[\beta_{x0}(b-w)] = \frac{\beta_{xd}}{\mu_d \varepsilon_d} B_{mn}^d \sin(\beta_{xd} w) \tag{2.87}$$

นำเอาสมการ (2.83) หารด้วยสมการ (2.82) ได้

$$-\frac{\beta_{xo}}{\varepsilon_0}\tan[\beta_{x0}(b-w)]=\frac{\beta_{xd}}{\varepsilon_d}\tan(\beta_{xd}w) \tag{2.88}$$

โดยที่

$$\beta_{x0}^2+\beta_{y0}^2+\beta_z^2=\beta_{x0}^2+(\frac{n\pi}{a})^2+\beta_z^2=\beta_0^2=\omega^2\mu_0\varepsilon_0 \tag{2.89}$$

$$\beta_{xd}^2+\beta_{yd}^2+\beta_z^2=\beta_{xd}^2+(\frac{n\pi}{a})^2+\beta_d^2=\beta_0^2=\omega^2\mu_d\varepsilon_d \tag{2.90}$$

สมการ(2.88)เป็นสมการที่ใช้หาคุณลักษณะของท่อนำคลื่น

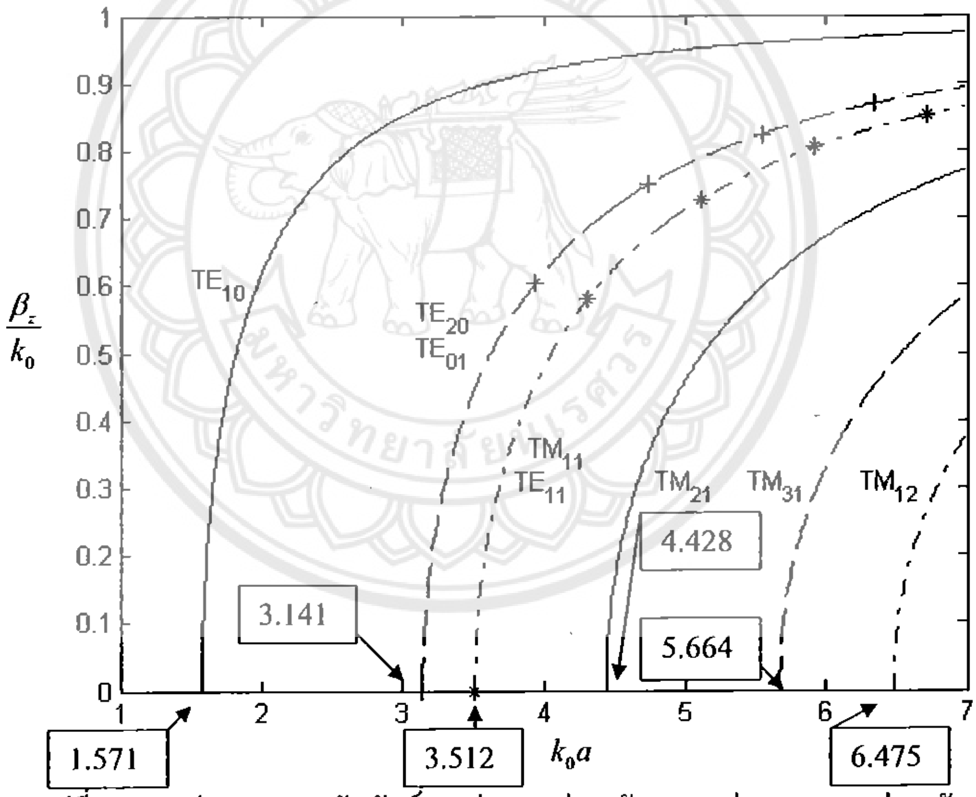
บทที่ 3
ผลการวิเคราะห์ท่อนำคลื่นภาคตัดขวางสี่เหลี่ยม

ผลการวิเคราะห์ท่อนำคลื่นภาคตัดขวางสี่เหลี่ยมจะแบ่งเป็นท่อนำคลื่นกลวงและท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยไดอิเล็กตริกบางส่วนโดยจะกล่าวถึงท่อนำคลื่นกลวงก่อนโดยมีรายละเอียดดังนี้

3.1 ผลการวิเคราะห์ท่อนำคลื่นกลวงที่มีภาคตัดขวางสี่เหลี่ยม

ตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษาก็คือท่อนำคลื่นที่มีอัตราส่วนระหว่างความยาวของด้านยาวต่อความยาวของด้านกว้าง เท่ากับ 2 (a/b = 2) โดยอาศัยสมการคลื่นที่เคลื่อนที่ในแนวแกน +z

ผลการวิเคราะห์โดยใช้สมการคุณลักษณะ (18a) โดยป้อนค่า $k_0 a$ ตั้งแต่ 1 - 7 สามารถนำมาแสดงได้ดังรูป 3.1



รูปที่ 3.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างของค่าคงตัวการแพร่กระจายและค่าคงตัวการแพร่กระจายของคลื่นจรในแนวแกน +z โดยที่ a/b=2

จากกราฟจะแสดงแบบแผนคลื่นจำนวนทั้งสิ้น 8 แบบแผนคลื่น ค่าที่อยู่ในกรอบสี่เหลี่ยมจะแสดงค่าความถี่ตัด แบบแผนคลื่นที่มีความถี่ตัดขนาดต่ำสุดคือ TE_{10}

ตารางที่ 3.1 ความถี่ตัดของแบบแผนคลื่นที่เกิดขึ้นในท่อนำคลื่น

แบบรูปคลื่น	ความถี่ตัด(k_0a)
TE_{10}	1.571
TE_{20}	3.141
TE_{01}	3.141
TE_{11}	3.512
TM_{11}	3.512
TM_{21}	4.428
TM_{31}	5.664
TM_{12}	6.475

จากตาราง 3.1 เห็นได้ว่าความถี่ตัด ของแบบแผน TE_{20} เท่ากับแบบแผน TE_{01}และแบบแผน TE_{11} เท่ากับแบบแผน TM_{11} อีกทั้งยังมีค่าความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{\beta_z}{k_0}$ กับ k_0a ยังเหมือนกันอีกด้วย แบบแผนที่มีลักษณะเหมือนกันดังที่กล่าวมานี้มี ชื่อเรียกว่าแบบแผนดีเจนเนอเรท (Degenerate mode)

ถ้าพิจารณาที่ k_0a มีค่าเท่ากับ 5 จากในรูปที่ 3.1 จะเกิดแบบแผนคลื่นจำนวน 6 แบบแผน และค่า $\frac{\beta_z}{k_0}$ ที่เกิดขึ้นจะมีค่าดังตาราง 3.2

ตารางที่ 3.2 แบบแผนเมื่อค่าคงตัวการแพร่กระจาย k_0a เท่ากับ 5

แบบแผนคลื่น	β_z / k_0 ที่ $k_0a = 5$
TE_{10}	0.949
TE_{20}	0.778
TE_{01}	0.778
TE_{11}	0.712
TM_{11}	0.712
TM_{21}	0.459

ห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์ 05100040

ในกรณีที่ลักษณะโครงสร้างของท่อนำคลื่นภาคตัดขวางสี่เหลี่ยมมีลักษณะแตกต่างออกไปจากการวิเคราะห์ที่ได้กล่าวมาในข้างต้น ($a/b \neq 2$) ลักษณะที่สามารถเกิดขึ้นได้เมื่อเปลี่ยนอัตราส่วนความยาวของด้านยาวต่ออัตราส่วนความยาวของด้านกว้าง ได้คือ

เมื่อนำเอาสมการ (23) มาเขียนลงตารางโดยเปลี่ยนค่าอัตราส่วนความยาวของด้านกว้างต่อความยาวของด้านยาว (a/b) และ ตัวเลขของแบบรูป m และ n จะได้ค่าอัตราส่วนของความถี่ตัด (R_{mn}) ของแบบรูป TE^z_{mn} ต่อ TE^z_{10} ดังต่อไปนี้

i 5080903. C.2
ป5.
ณ339ท.
2550.

ตารางที่ 3.3 อัตราส่วนของความถี่ตัด (R_{mn}) ของแบบรูป TE^z_{mn} ต่อ TE^z_{10}

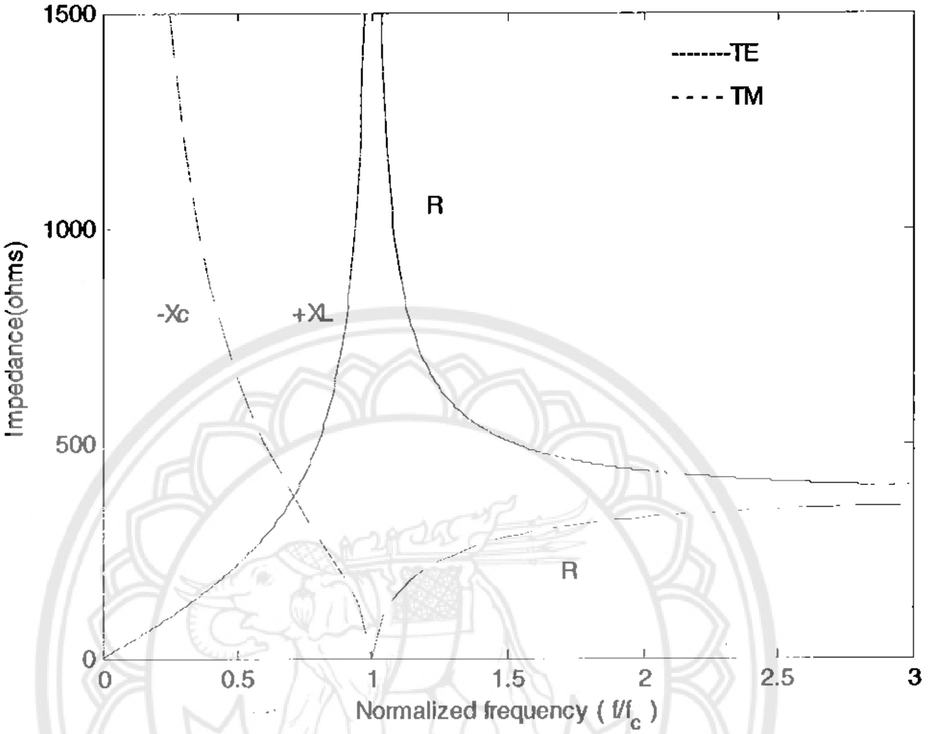
	a/b				
	10	5	2.25	2	1
m,n	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0 ; 0,1
R_{mn}	1	1	1	1	1
m,n	2,0	2,0	2,0	2,0 ; 0,1	1,1
R_{mn}	2	2	2	2	1.414
m,n	3,0	3,0	0,1	1,1	2,0
R_{mn}	3	3	2.25	2.236	2
m,n	4,0	4,0	1,1	2,1	2,1 ; 1,2
R_{mn}	4	4	2.462	2.828	2.236
m,n	5,0	5,0 ; 0,1	3,0	3,0	2,2
R_{mn}	5	5	3	3	2.828
m,n	6,0	1,1	2,1	3,1	3,0 ; 0,3
R_{mn}	6	5.099	3.010	3.606	3
m,n	7,0	2,1	3,1	4,0 ; 0,2	3,1 ; 1,3
R_{mn}	7	5.385	3.75	4	3.162
m,n	8,0	3,1	4,0	1,2	3,2 ; 2,3
R_{mn}	8	5.831	4	4.123	3.606
m,n	9,0	6,0	0,2	4,1 ; 2,2	4,0 ; 0,4
R_{mn}	9	6	4.5	4.472	4
m,n	10,0 ; 0,1	4,1	4,1	5,0 ; 3,2	4,1 ; 1,4
R_{mn}	10	6.403	4.589	5	4.123

และเมื่อนำเอาสมการ (35) มาเขียนลงตารางโดยเปลี่ยนค่าอัตราส่วนความยาวของด้านยาวต่อความยาวของด้านกว้าง (a/b) และ ตัวเลขของแบบรูป m และ n จะได้ค่าอัตราส่วนของความถี่ตัด (T_{mn}) ของแบบรูป TM^z_{mn} ต่อ TE^z_{10} ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 3.4 อัตราส่วนของความถี่ตัด (T_{mn}) ของแบบรูป TM^z_{mn} ต่อ TE^z_{10}

	a/b				
	10	5	2.25	2	1
m,n	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
T_{mn}	10.05	5.10	2.46	2.23	1.414
m,n	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1 ; 1,2
T_{mn}	10.19	5.83	3.01	2.83	2.236
m,n	3,1	3,1	3,1	3,1	2,2
T_{mn}	10.44	6.00	3.75	3.61	2.282
m,n	4,1	4,1	4,1	1,2	3,1 ; 1,3
T_{mn}	10.77	6.40	4.59	4.12	3.162
m,n	5,1	5,1	1,2	4,1 ; 2,2	3,2 ; 2,3
T_{mn}	11.18	7.07	5.09	4.47	3.606
m,n	6,1	6,1	2,2	3,2	4,1 ; 1,4
T_{mn}	11.66	7.81	5.38	5.00	4.123
m,n	7,1	7,1	5,1	5,1	3,3
T_{mn}	12.21	8.60	5.48	5.39	4.243
m,n	8,1	8,1	3,2	4,2	4,2 ; 2,4
T_{mn}	12.81	9.43	5.83	5.66	4.472
m,n	9,1	1,2	4,2	1,3	4,3 ; 3,4
T_{mn}	13.82	10.04	6.40	6.08	5.00
m,n	10,1	2,2	6,1	2,3	5,1 ; 1,5
T_{mn}	14.14	10.20	6.41	6.32	5.09

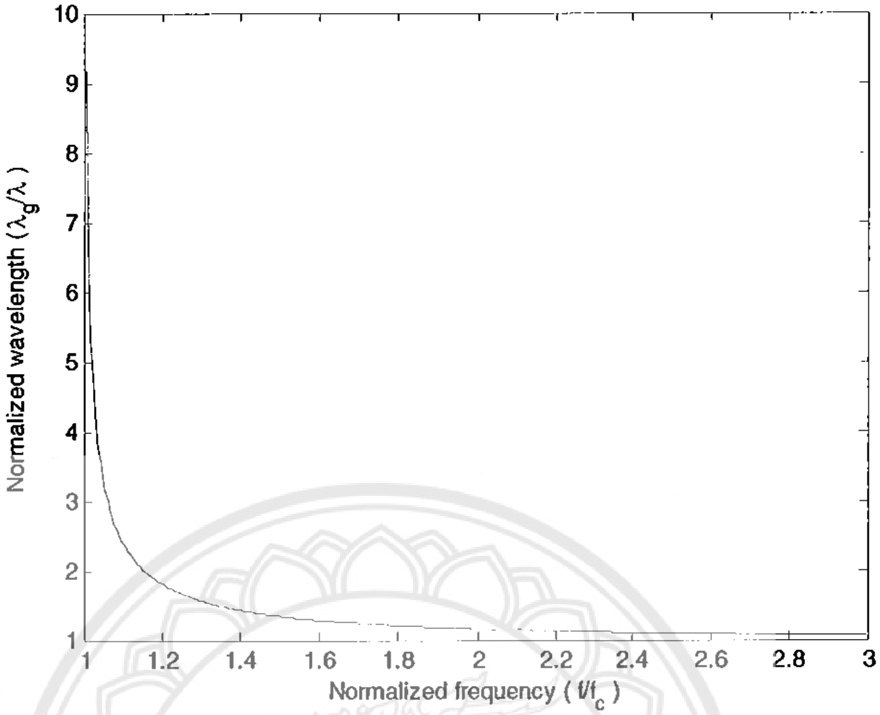
ค่าอิมพิแดนซ์คลื่น สามารถหาได้จากสมการ (20a)-(20c) สำหรับแบบรูปคลื่นไฟฟ้าตามขวาง (TE) สมการ (29a) - (29c) สำหรับแบบรูปคลื่นแม่เหล็กตามขวาง (TM) สามารถนำมาแสดงเป็นกราฟ ดังรูป



รูปที่ 3.2 กราฟแสดงค่าอิมพิแดนซ์ของแบบรูปที่เกิดขึ้นในท่อนำคลื่นภาคตัดขวางสี่เหลี่ยม

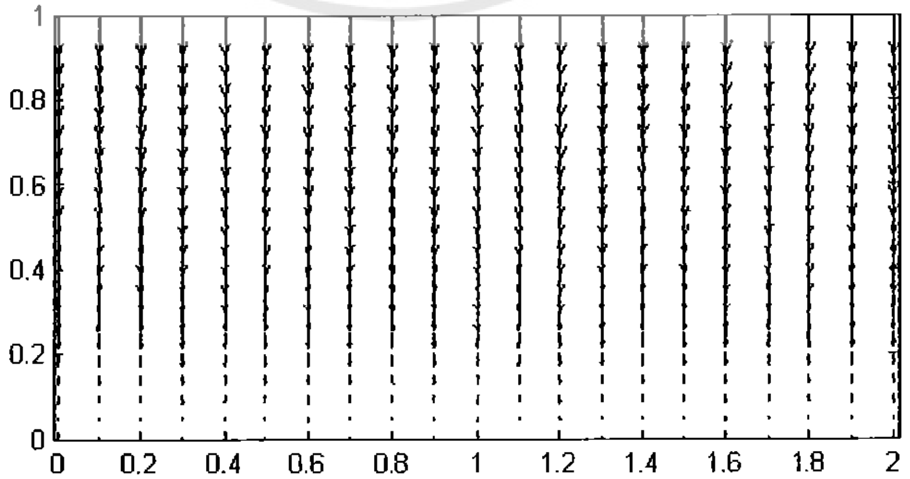
จากรูปที่ 3.2 พบว่าสนามไฟฟ้าตามขวางที่ความถี่ ($\frac{f}{f_c}$) ตั้งแต่ 0- 1 ค่าอิมพิแดนซ์ที่เกิดขึ้นในท่อนำคลื่นนั้น จะมีลักษณะเสมือนตัวเหนี่ยวนำ (Inductor) และที่ความถี่ ($\frac{f}{f_c}$) ตั้งแต่ 1- 3 ค่าอิมพิแดนซ์ที่เกิดขึ้นในท่อนำคลื่นนั้น จะมีลักษณะเสมือนตัวต้านทาน (Resistor) สำหรับสนามแม่เหล็กตามขวางที่ความถี่ ($\frac{f}{f_c}$) ตั้งแต่ 0- 1 ค่าอิมพิแดนซ์ที่เกิดขึ้นในท่อนำคลื่นนั้น จะมีลักษณะเสมือนตัวเก็บประจุ (Capacitor) และที่ความถี่ ($\frac{f}{f_c}$) ตั้งแต่ 1- 3 ค่าอิมพิแดนซ์ที่เกิดขึ้นในท่อนำคลื่นนั้น จะมีลักษณะเสมือนตัวต้านทาน (Resistor)

เมื่อพิจารณาถึงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ ($\frac{f}{f_c}$) กับความยาวคลื่น ($\frac{\lambda_g}{\lambda}$) ตามสมการ (21a) ถึงสมการ (21c) แล้วจะพบว่าความยาวคลื่น ($\frac{\lambda_g}{\lambda}$) จะแปรผกผันกับความถี่ ($\frac{f}{f_c}$) ดังกราฟต่อไปนี้

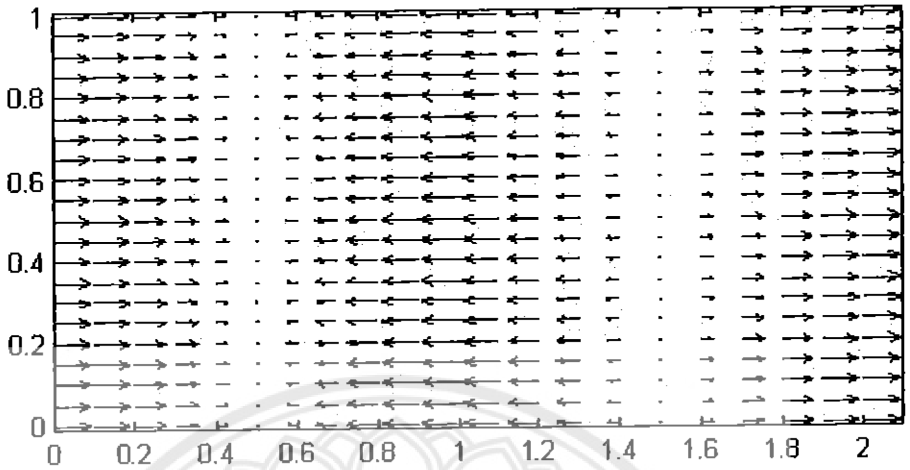


รูปที่ 3.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ ($\frac{f}{f_c}$) กับความยาวคลื่น ($\frac{\lambda_g}{\lambda}$) **ของท่อนำคลื่น**

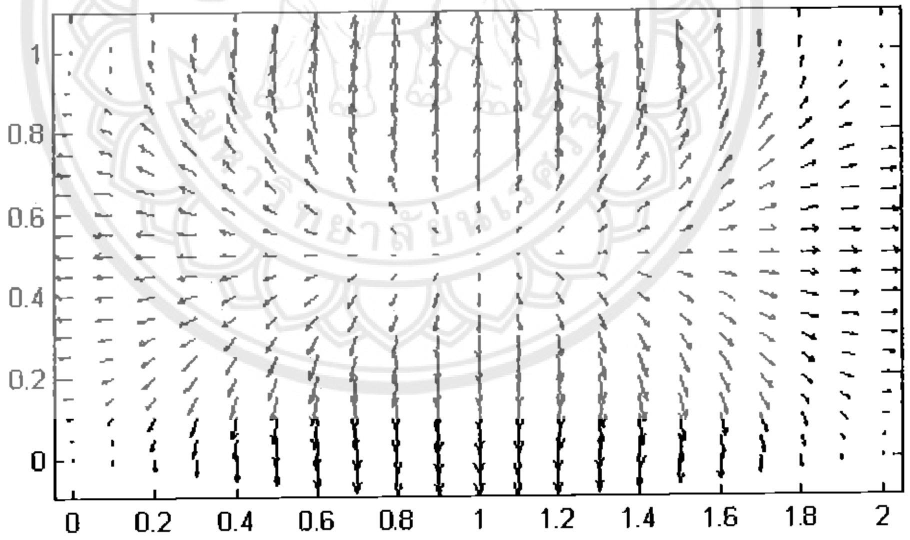
เมื่อให้อัตราส่วนความยาวด้านยาวต่ออัตราส่วนความยาวด้านกว้างเท่ากับ 2 (a/b=2) **ทิศทางและขนาด**สนามไฟฟ้าสามารถวาดบนพื้นที่ภาคตัดขวางของท่อนำคลื่นได้ดังแสดง**ต่อไปนี้ ในที่นี้จะแสดง**ทั้งหมดแบบรูปคลื่น 4 แบบรูปโดยรูปที่ 3.4 - 3.5 แสดงแบบรูปสนาม**ไฟฟ้าสำหรับกรณี** TE_{mn}และโดยรูปที่ 3.6 - 3.7 แสดงแบบรูปสนามไฟฟ้าสำหรับกรณี TM_{mn}ส่วน**แบบรูปคลื่นอีก 18 แบบรู**ปอยู่ในภาคผนวก(ก)



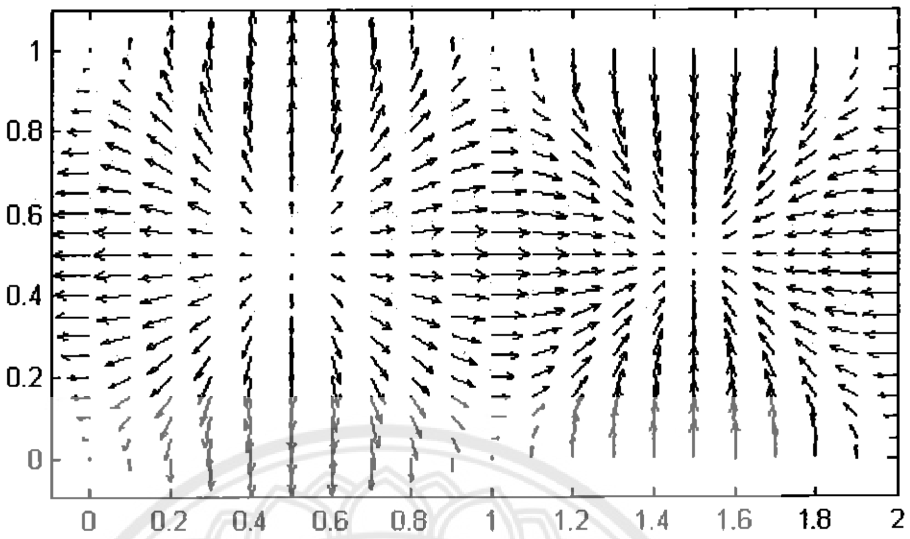
รูปที่ 3.4 แบบรูปสนามไฟฟ้า TE_{10}



รูปที่ 3.5 แบบรูปสนามไฟฟ้า TE_{01}



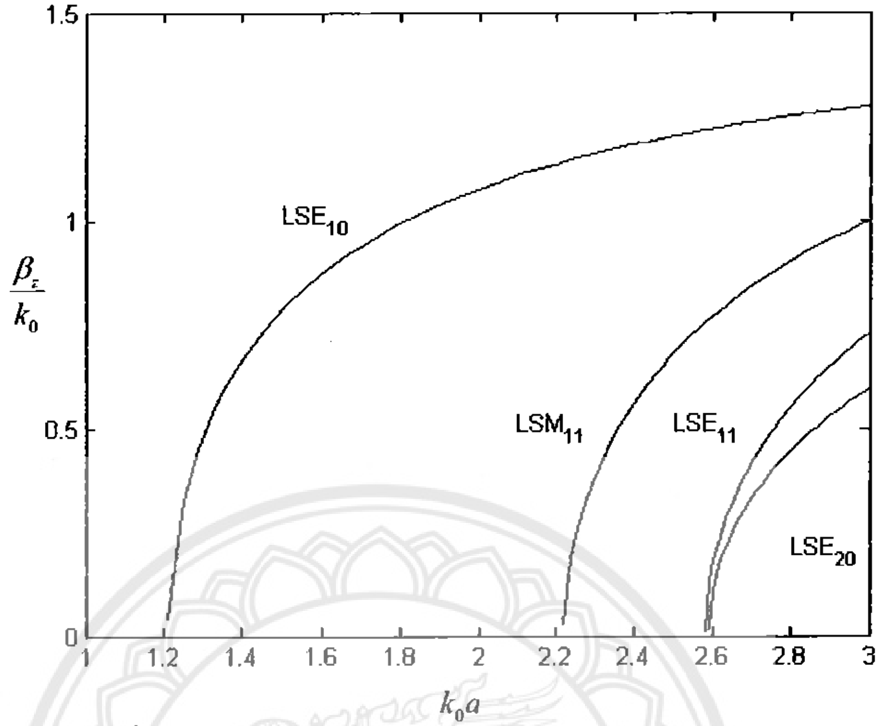
รูปที่ 3.6 แบบรูปสนามไฟฟ้า TM_{11}



รูปที่ 3.7 แบบรูปสนามไฟฟ้า TM_{21}

3.2 ผลการวิเคราะห์ท่อนำคลื่นที่บรรจุไดอิเล็กตริกบางส่วน

ท่อนำคลื่นที่นำมาใช้ในการศึกษานี้ จะมีอัตราส่วนระหว่างความยาวของด้านยาวต่อความยาวของด้านกว้างเท่ากับ 2 (a/b = 2) , w = a/2 ,สภาพยอมสัมพัทธ์ ε_r และความซาบซึมได้สัมพัทธ์ μ_r เท่ากับ 2.25 และ 1.0 ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์โดยใช้สมการ (2.73) - (2.75) และสมการ (2.88) - (2.90) สามารถนำมาแสดงเป็นกราฟได้ดังรูป 3.8 สำหรับ $k_0a = 1$ ถึง $k_0a = 3$ มีแบบรูปคลื่นที่เกิดขึ้นจำนวน 4 แบบรูป แบบแผนคลื่นเป็นใหญ่คือ แบบแผน LSE_{10} ซึ่งสามารถประมาณความถี่ตัดได้ว่ามีค่าเท่ากับ 1.2 แบบแผนคลื่นในอันดับที่สูงขึ้น คือ แบบแผนคลื่น LSM_{11}, LSE_{11} ,LSE_{20} ตามลำดับ



รูปที่ 3.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างของค่า β_z / k_0 และ k_0a ของท่อนำคลื่นที่บรรจุไดอิเล็กตริกไว้บางส่วน

จากรูปนี้ ถ้าเลือก $k_0a = 3$ ค่า β_z / k_0 สำหรับแต่ละแบบแผนคลื่นสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 แบบแผนคลื่นเมื่อ $k_0a = 3$

แบบแผนคลื่น	β_z / k_0 ที่ $k_0a = 3$
LSE10	1.2757
LSM11	0.9715
LSE11	0.7286
LSE20	0.6004

บทที่ 4
สรุปผลการวิเคราะห์และข้อเสนอแนะ

4.1 สรุปผลการวิเคราะห์

จากการวิเคราะห์ท่อนำคลื่นสองลักษณะคือท่อนำคลื่นกลวงและท่อนำคลื่นที่บรรจุไดอิเล็กตริกไว้บางส่วน พบว่าท่อนำคลื่นกลวงจะเกิดแบบแผนคลื่นสนามไฟฟ้าตามขวาง (TE) และแบบแผนคลื่นสนามแม่เหล็กตามขวาง (TM) ในท่อนำคลื่นกลวงนี้แบบแผน TE_{10} ถือว่าเป็นแบบแผนคลื่นเป็นใหญ่และมีความถี่ตัดที่ต่ำที่สุด ทิศทางและขนาดการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในท่อนำคลื่นจะมีลักษณะแตกต่างกันไปตามตัวเลขคลื่นของแต่ละแบบแผน, อิมพิแดนต์คลื่นจะเป็นได้ทั้งตัวเก็บประจุ (Capacitor) และตัวเหนี่ยวนำ (Inductor)

สำหรับท่อนำคลื่นที่บรรจุไดอิเล็กตริกไว้บางส่วนนั้นไม่ก่อให้เกิดสนามไฟฟ้าตามขวางและสนามแม่เหล็กตามขวางเหมือนในท่อนำคลื่นกลวง จะเกิดแบบแผนคลื่นสนามไฟฟ้าส่วนตัดตามยาว (LSE) และ แบบแผนคลื่นสนามแม่เหล็กส่วนตัดตามยาว (LSM) แบบแผนคลื่นเป็นใหญ่คือ LSE_{10} แบบแผนคลื่นนี้จะมีความถี่ตัดที่ต่ำที่สุด

GUI ได้รับการพัฒนาขึ้นเพื่อช่วยในการวิเคราะห์หา ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ, ทิศทางและขนาดการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในภาคตัดขวางสี่เหลี่ยมของท่อนำคลื่นนี้ เพื่อความสะดวก รวดเร็ว และความถูกต้องแม่นยำ อีกด้วย

4.2 ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากการวิเคราะห์ท่อนำคลื่นภาคตัดขวางสี่เหลี่ยมเป็นเพียงการวิเคราะห์ในทางคณิตศาสตร์ ซึ่งเป็นการจำลองทางทฤษฎีเท่านั้น ในการใช้งานจริงอาจมีปัจจัยภายนอกที่เกี่ยวข้อง เช่น ความสูญเสียของตัวกลางในท่อนำคลื่น ความสูญเสียที่เกิดจากผิวของโลหะท่อนำคลื่น และปัจจัยอื่นๆที่อาจทำให้ผลการวิเคราะห์นี้คลาดเคลื่อนไปบ้าง หากต้องการที่จะให้ข้อมูลเกี่ยวกับแบบรูปคลื่นได้ใกล้เคียงความจริงมากที่สุด ก็สามารถทำได้โดยการวัดและทดสอบกับอุปกรณ์จริง

เอกสารอ้างอิง

[1] Constantine A. Balanis. **Advanced Engineering Electromagnetics,** United States of America : John Wiley & Sons. 1938.

[2] Constantine A. Balanis. **Antenna Theory Analysis and Design.** 3rd Ed. United States of America : John Wiley & Sons. 2005.

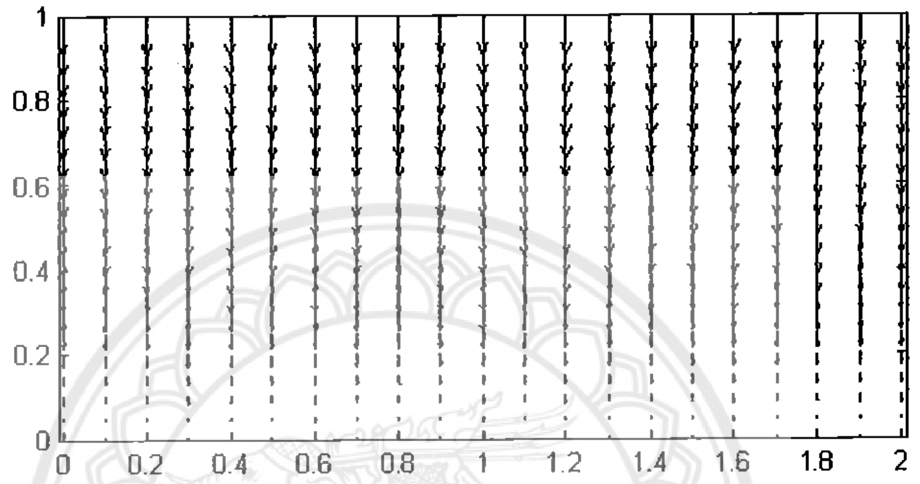
[3] ดร.ชัยรัตน์ พินทอง. **"ประสิทธิภาพของวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ สำหรับการวิเคราะห์ไอเกนโมดในท่อนำคลื่นแบบแอนไอโซทรอปิกที่ไม่มีการสูญเสีย".** วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิตมหาบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2539.

[4] พรชัย พุกอูต. **"การวิเคราะห์กลุ่มสายอากาศเส้นตรงระยะห่างคงรูปและแอมพลิจูดไม่คงรูป".** ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร. 2550.

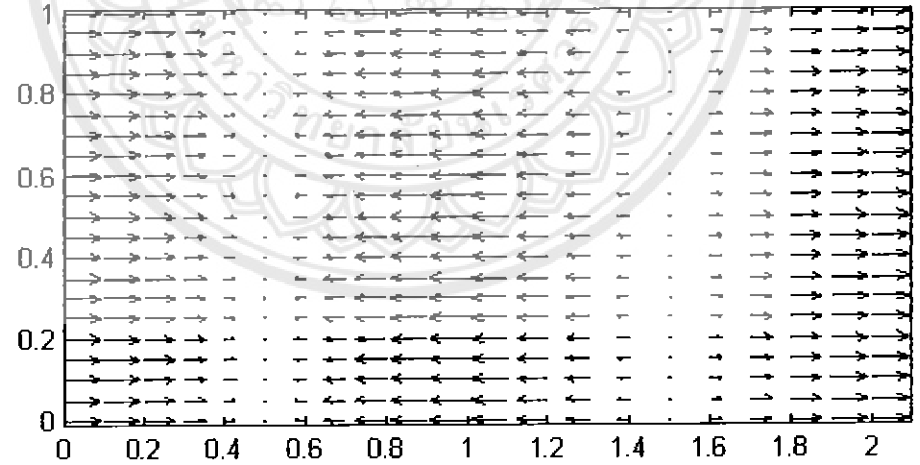
ภาคผนวก (ก)

แบบรูปสนามไฟฟ้าของท่อนำคลื่นภาคตัดขวางสี่เหลี่ยม

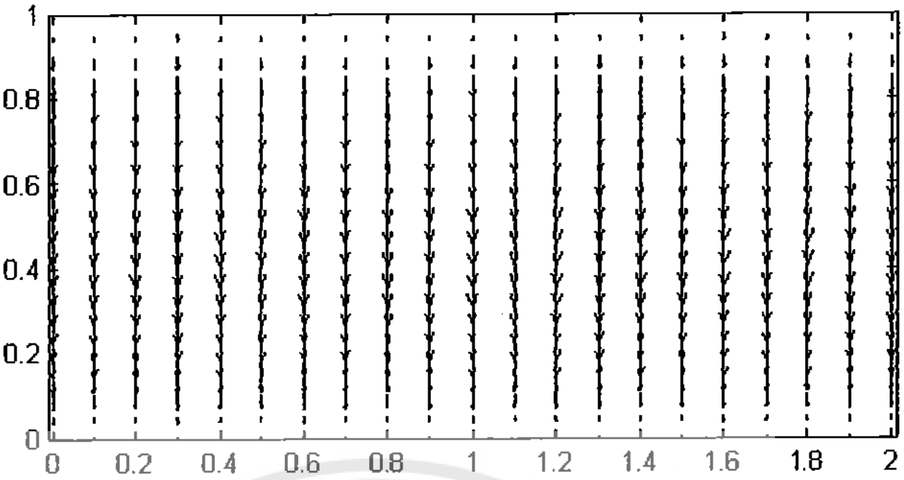
แบบรูปสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กของท่อนำคลื่นภาคตัดขวางสี่เหลี่ยม 18 รูป ดังนี้



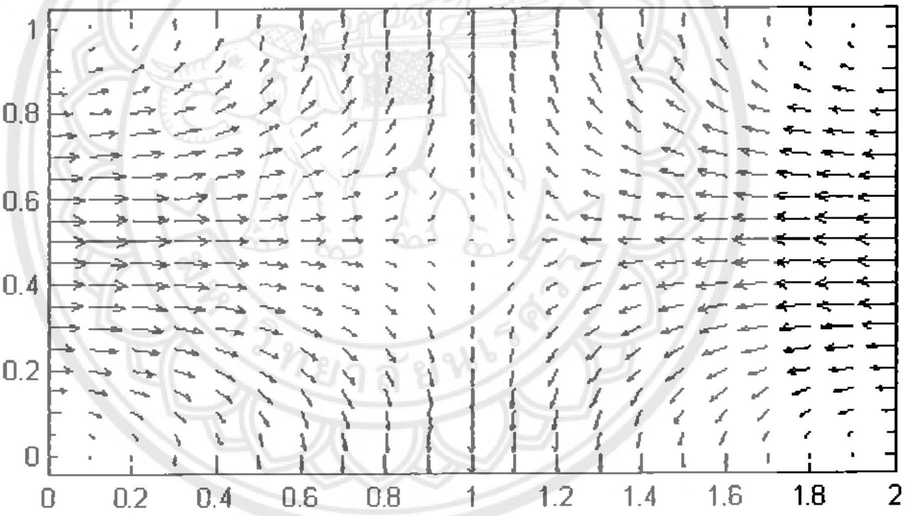
รูปที่ ก.1 แบบรูปสนามไฟฟ้า TE_{10}



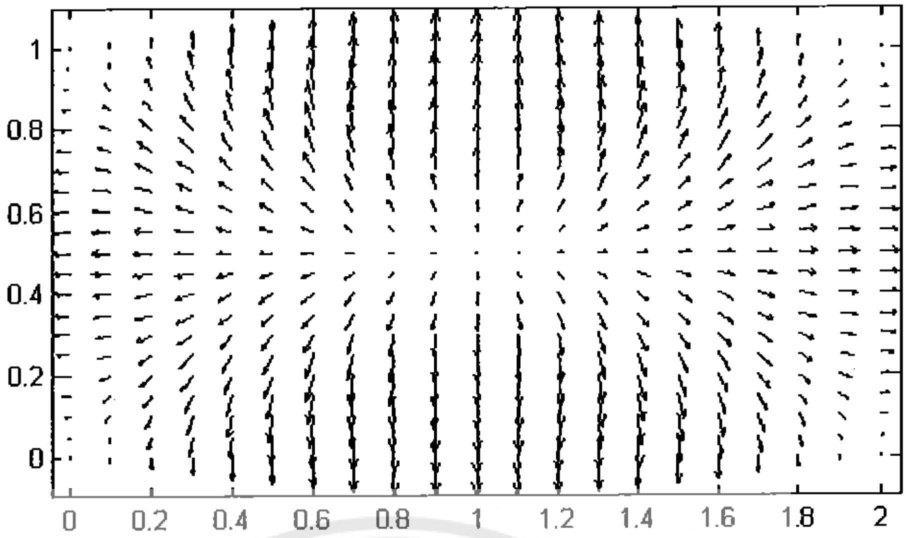
รูปที่ ก.2 แบบรูปสนามไฟฟ้า TE_{01}



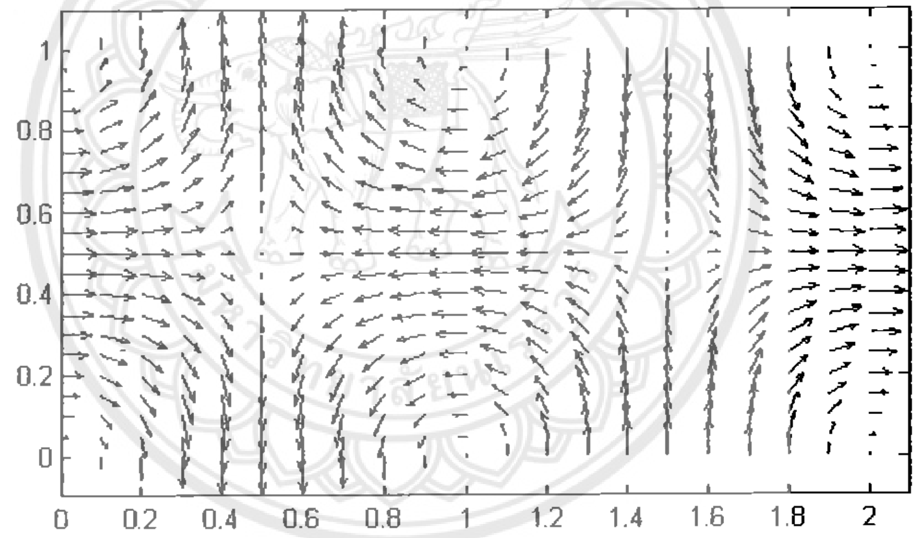
รูปที่ ก.3 แบบรูปสนามไฟฟ้า TE_{20}



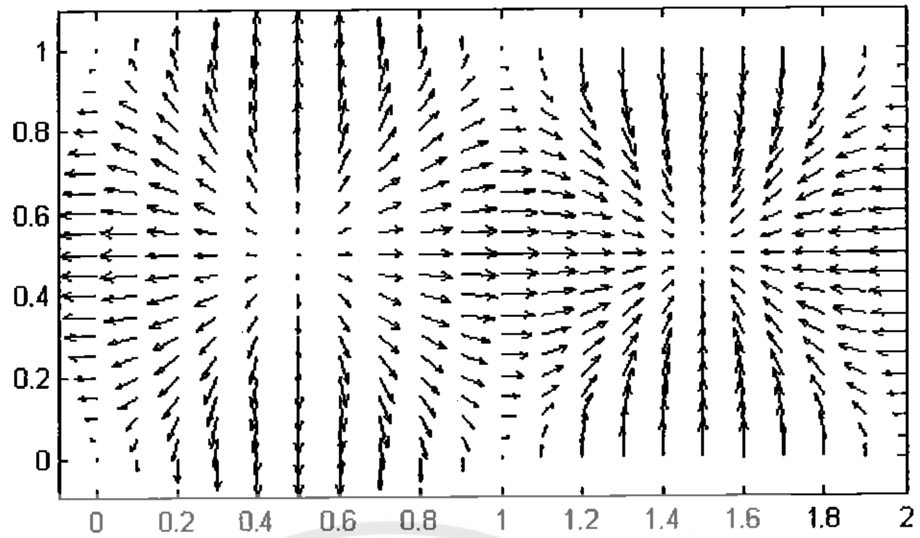
รูปที่ ก.4 แบบรูปสนามไฟฟ้า TE_{11}



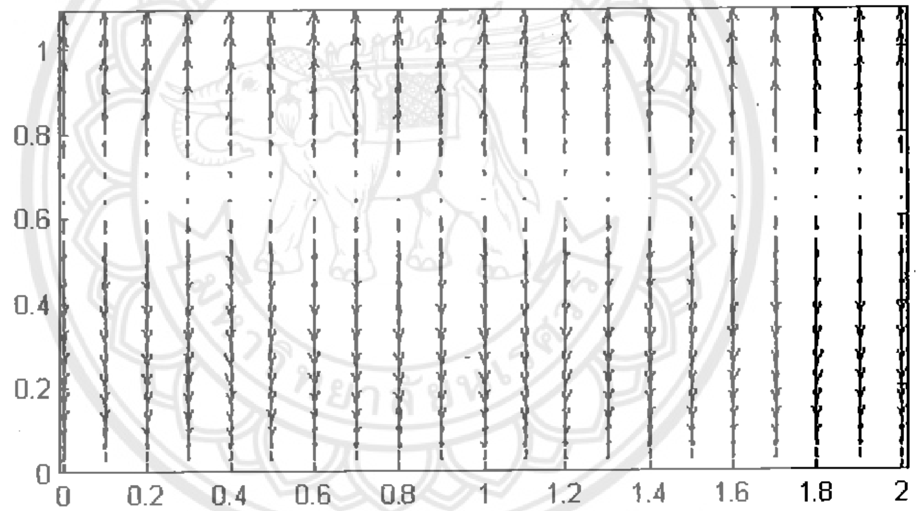
รูปที่ ก.5 แบบรูปสนามไฟฟ้า TM_{11}



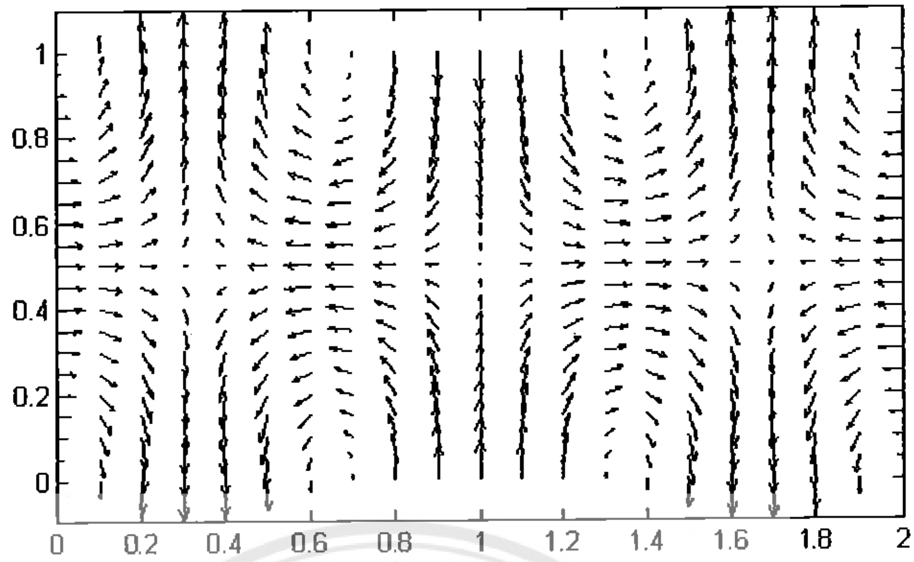
รูปที่ ก.6 แบบรูปสนามไฟฟ้า TE_{21}



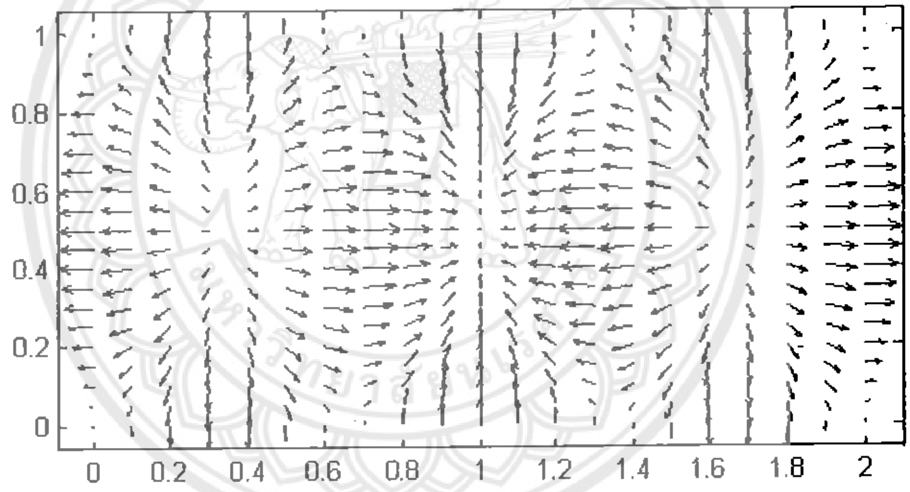
รูปที่ ก.7 แบบรูปสนามไฟฟ้า TM_{21}



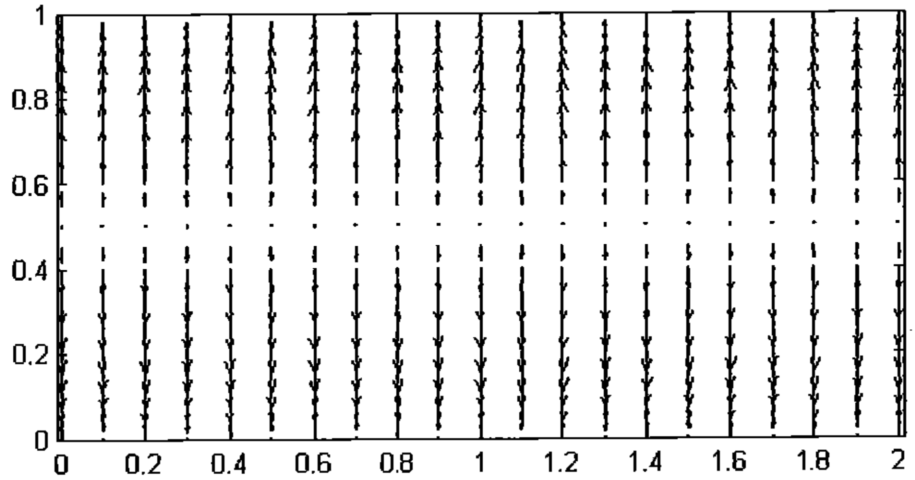
รูปที่ ก.8 แบบรูปสนามไฟฟ้า TE_{30}



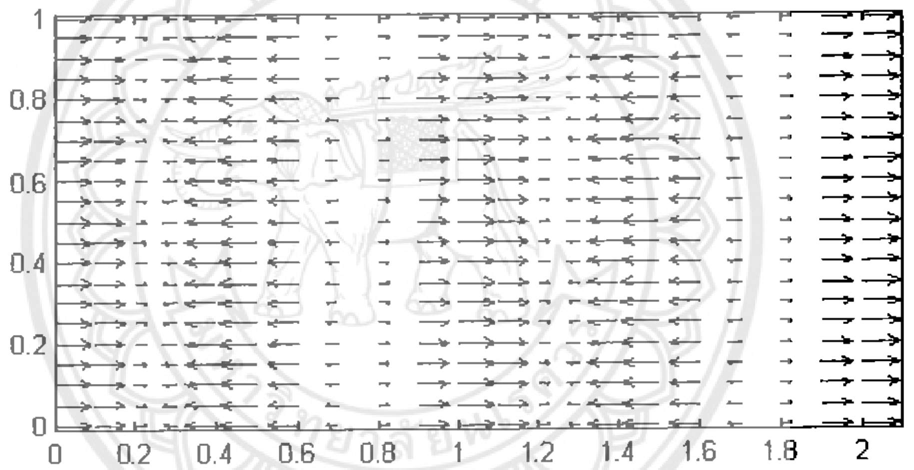
รูปที่ ก.9 แบบรูปสนามไฟฟ้า TE_{31}



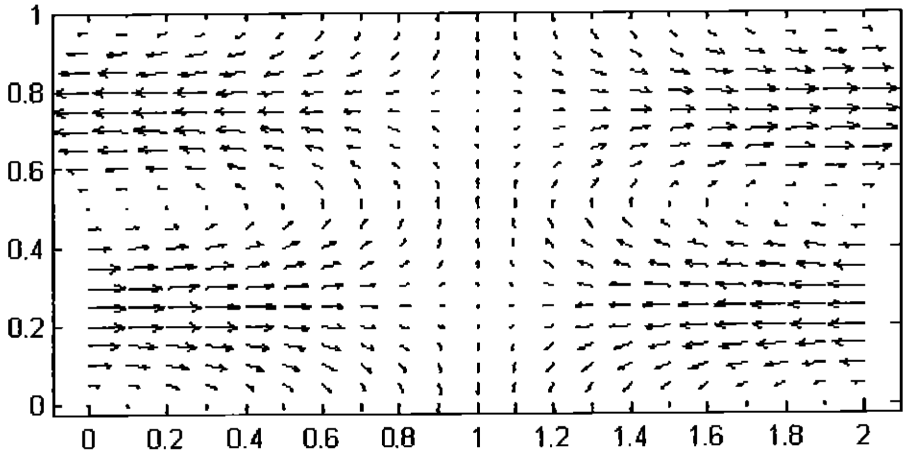
รูปที่ ก.10 แบบรูปสนามไฟฟ้า TM_{31}



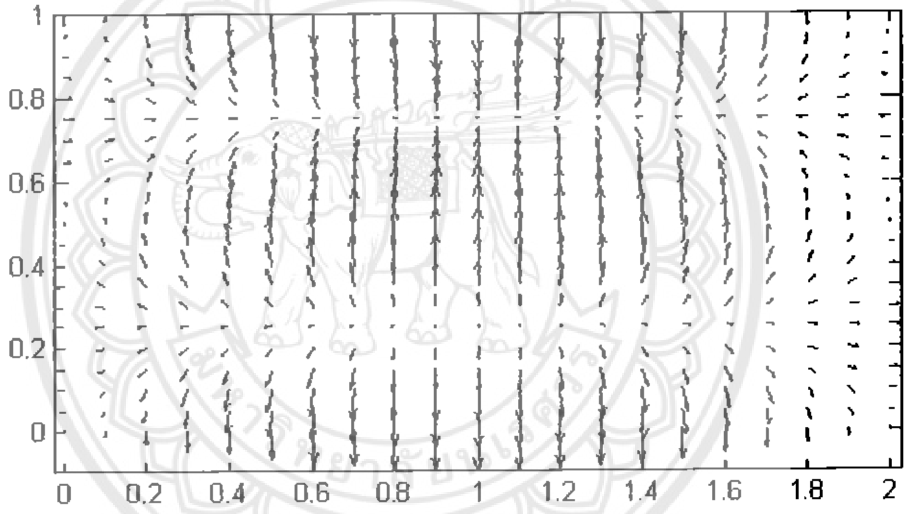
รูปที่ ก.11 แบบรูปสนามไฟฟ้า TE_{40}



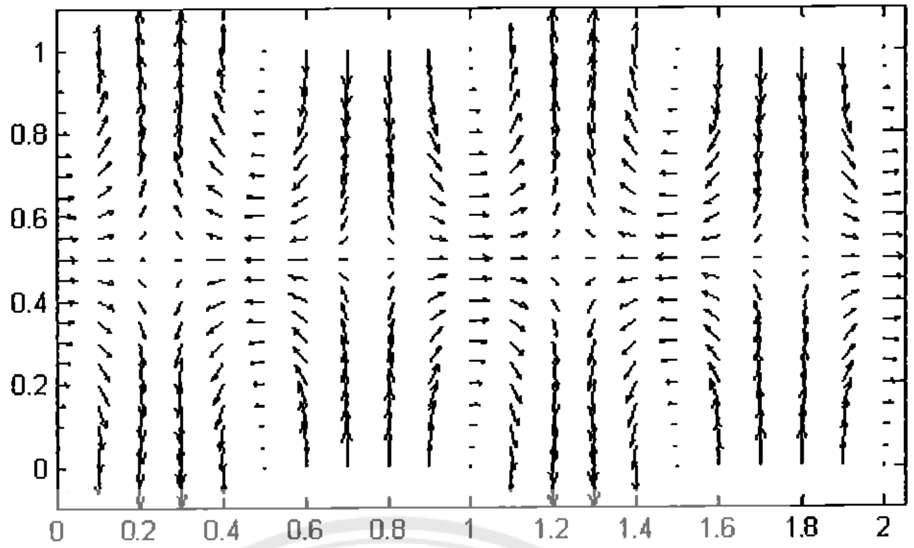
รูปที่ ก.12 แบบรูปสนามไฟฟ้า TE_{02}



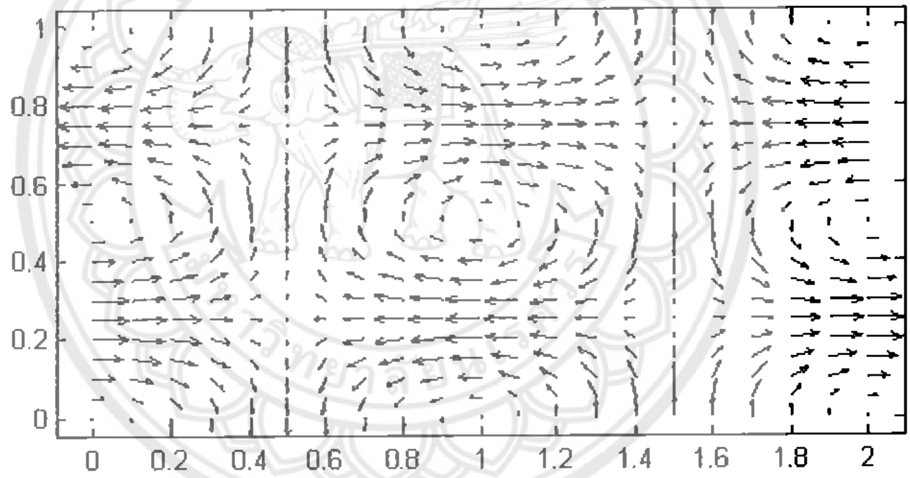
รูปที่ ก.13 แบบรูปสนามไฟฟ้า TE_{12}



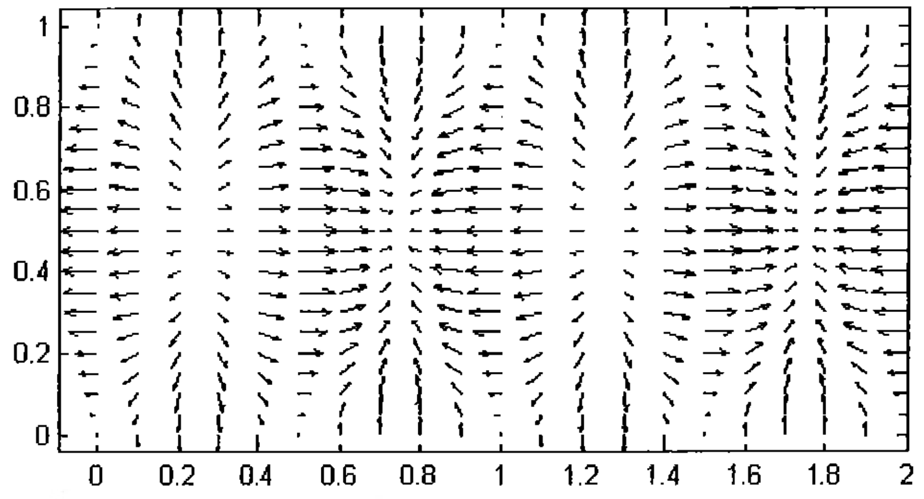
รูปที่ ก.14 แบบรูปสนามไฟฟ้า TM_{12}



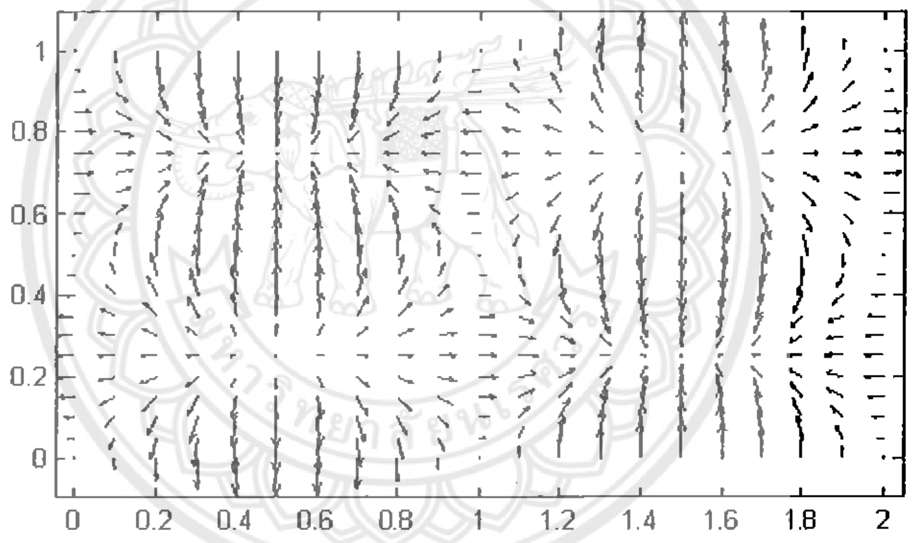
รูปที่ ก.15 แบบรูปสนามไฟฟ้า TE_{41}



รูปที่ ก.16 แบบรูปสนามไฟฟ้า TE_{22}



รูปที่ ก.17 แบบรูปสนามไฟฟ้า TM_{41}



รูปที่ ก.18 แบบรูปสนามไฟฟ้า TM_{22}

ภาคผนวก (ข)

โปรแกรมวิเคราะห์ท่อนำคลื่นภาคตัดขวางสี่เหลี่ยม

โปรแกรมหาค่าคงตัวการแพร่กระจายคลื่นตามขวางของท่อนำคลื่นกลวง

เมื่อนำสมการ(22-a) ถึงสมการ (22-c) และสมการ (34-a) ถึงสมการ (34-c) มาวิเคราะห์เพื่อหาค่าคงตัวการแพร่กระจายคลื่นตามขวางของท่อกลวงของแต่ละแบบแผนคลื่น ในที่นี้โปรแกรมจะแสดงค่าคงตัวการแพร่กระจายทั้งสิ้นจำนวน 8 แบบแผนคลื่นดังแสดงในรูปที่ 3.3 และสามารถเขียนเป็นโปรแกรมได้ดังนี้

```
clear all
clc

%TE10%
a1=[1.571:0.006:7];
a2=1-(((1.571)./a1).^2);
a3=sqrt(a2);
plot(a1,a3,'k-')
hold on
axis([1 7 0 1]);
xlabel('k_0a')
ylabel('\beta_Z/k_0')
text(1.5,0.6,'TE_1_0')

%TE01%
b1=[3.141:0.01:7];
b2=1-(((3.141)./b1).^2);
b3=sqrt(b2);
plot(b1,b3,'k--')
hold on
text(3.1,0.5,'TE_0_1')

%TE20%
c1=[3.141:0.8:7];
c2=1-(((3.141)./c1).^2);
c3=sqrt(c2);
plot(c1,c3,'k+')
hold on
text(3.1,0.55,'TE_2_0')

%TE11%
d1=[3.5124:0.01:7];
d2=1-(((3.5124)./d1).^2);
d3=sqrt(d2);
plot(d1,d3,'k-.')
hold on
text(3.8,0.3,'TE_1_1')

%TM11%
e1=[3.5124:0.8:7];
e2=1-(((3.5124)./e1).^2);
```

```
e3=sqrt(e2);
plot(e1,e3,'k*')
hold on
text(3.9,0.35,'TM_1_1')

%TM21%
f1=[4.4428:0.01:7];
f2=1-(((4.4428)./f1).^2);
f3=sqrt(f2);
plot(f1,f3,'k-')
hold on
text(4.8,0.3,'TM_2_1')

%TM31%
g1=[5.6636:0.01:7];
g2=1-(((5.6636)./g1).^2);
g3=sqrt(g2);
plot(g1,g3,'k--')
hold on
text(5.45,0.3,'TM_3_1')

%TM12%
h1=[6.475:0.01:7];
h2=1-(((6.475)./h1).^2);
h3=sqrt(h2);
plot(h1,h3,'k-.')
hold on
text(6.25,0.3,'TM_1_2')
```

%%

โปรแกรมแสดงแบบแผนคลื่นสนามไฟฟ้าตามขวางของท่อนำคลื่นกลวง

โปรแกรมแสดงแบบแผนคลื่นสนามไฟฟ้าตามขวางของท่อนำคลื่นกลวงได้นำเอาสมการ (15-a) และสมการ (15-b) มาพิจารณา เพื่อแสดงผลการวิเคราะห์ออกมาในรูปแบบของกราฟฟิก 2 มิติของท่อนำคลื่นภาคตัดขวางสี่เหลี่ยม จะแบ่งพิจารณาเป็น 2 กรณีเพื่อสะดวกต่อการเขียนโปรแกรม โดยที่ กรณีแรกจะพิจารณาแบบแผนคลื่นสนามไฟฟ้าเมื่อ n=0 และ m=1, 2, 3,... และอีกกรณีจะพิจารณาแบบแผนคลื่นสนามไฟฟ้าเมื่อ n=1, 2, 3,... และ m=1, 2, 3,... ดังรายละเอียดต่อไปนี้

เมื่อพิจารณาแบบแผนคลื่นสนามไฟฟ้าเมื่อ n=0 และ m=1, 2, 3,... จะได้โปรแกรมแสดงแบบแผนคลื่นสนามไฟฟ้าดังนี้

```
clear all
clc
     z1=[2];
     z2=[1];
     z3=input('m=');
     z5=(z3*pi)/z1;
     [x,y] = meshgrid(0:.1:2,0:.05:1);
     z7 = zeros(21,21);
     z8 = -(z5/8.85*10^12).*sin(z5.*y) ;
     quiver(x,y,z7,z8), axis image
```

%%%

เมื่อพิจารณาแบบแผนคลื่นสนามไฟฟ้าเมื่อ n=1, 2, 3,... และ m=1, 2, 3,... จะได้โปรแกรมแสดงแบบแผนคลื่นสนามไฟฟ้าดังนี้

```
clear all
clc
      z1=[2];
      z2=[1];
      z3=input('m=');
      z4=input('n=');
      z5=(z3*pi)/z1;
      z6=(z4*pi)/z2;
      [x,y] = meshgrid(0:.1:2,0:.05:1);
      z7 = (z6/8.85*10^12).*cos(z5.*x).*sin(z6.*y) ;
      z8 = -(z5/8.85*10^12).*sin(z5.*x).*cos(z6.*y);
      quiver(x,y,z7,z8), axis image
```

%%%

โปรแกรมแสดงแบบแผนคลื่นสนามแม่เหล็กตามขวางของท่อนำคลื่นกลวง

โปรแกรมแสดงแบบแผนคลื่นสนามแม่เหล็กตามขวางของท่อนำคลื่นกลวงได้นำเอาสมการ(32-d) และสมการ (32-e) มาพิจารณา เพื่อแสดงผลการวิเคราะห์ออกมาในรูปแบบของกราฟฟิก 2 มิติของท่อนำคลื่นภาคตัดขวางสี่เหลี่ยม จะแบ่งพิจารณาเป็น 2 กรณีเพื่อสะดวกต่อการเขียนโปรแกรม โดยที่ กรณีแรกจะพิจารณาแบบแผนคลื่นสนามแม่เหล็กเมื่อ m=0 และ n=1, 2, 3,... และอีกกรณีจะพิจารณาแบบแผนคลื่นสนามไฟฟ้าเมื่อ m=1, 2, 3,... และ n=1, 2, 3,... ดังรายละเอียดต่อไปนี้

เมื่อพิจารณาแบบแผนคลื่นสนามแม่เหล็กเมื่อ m=0 และ n=1, 2, 3,... จะได้โปรแกรมแสดงแบบแผนคลื่นสนามแม่เหล็กดังนี้

```
clear all
clc
      z1=[2];
      z2=[1];
      %z3=input('m=');
      z4=input('n=');
      %z5=(z3*pi)/z1;
      z6=(z4*pi)/z2;
      [x,y] = meshgrid(0:.1:2,0:.05:1);
      z7 = (z6/8.85*10^12).*cos(z6.*x) ;
      z8 = zeros(21,21);
      quiver(x,y,z7,z8), axis image
```

%%%

เมื่อพิจารณาแบบแผนคลื่นสนามแม่เหล็กเมื่อ m=1, 2, 3,... และ n=1, 2, 3,... จะได้โปรแกรมแสดงแบบแผนคลื่นสนามแม่เหล็กดังนี้

```
clear all
clc
      z1=[2];
      z2=[1];
      z3=input('m=');
      z4=input('n=');
      z5=(z3*pi)/z1;
      z6=(z4*pi)/z2;
      g=(4*pi*10^-7)*(8.85*10^12);
      h=sqrt(g);
      [x,y] = meshgrid(0:.1:2,0:.05:1);
      z7 = -(z5*0.8/h).*cos(z5.*x).*sin(z6.*y) ;
      z8 = -(z6*0.8/h).*sin(z5.*x).*cos(z6.*y);
      quiver(x,y,z7,z8), axis image
```

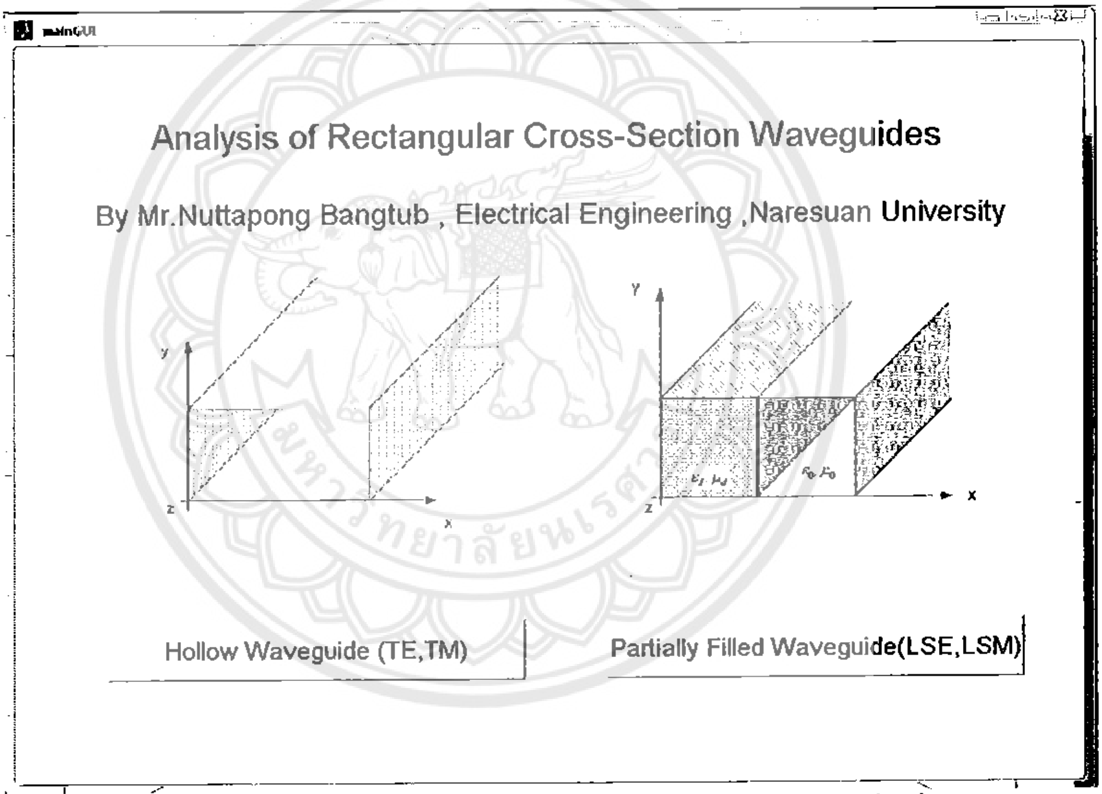
%%

ภาคผนวก(ค)

การเชื่อมต่อกับผู้ใช้ทางกราฟฟิก

(Graphic User Interfaces (GUI))

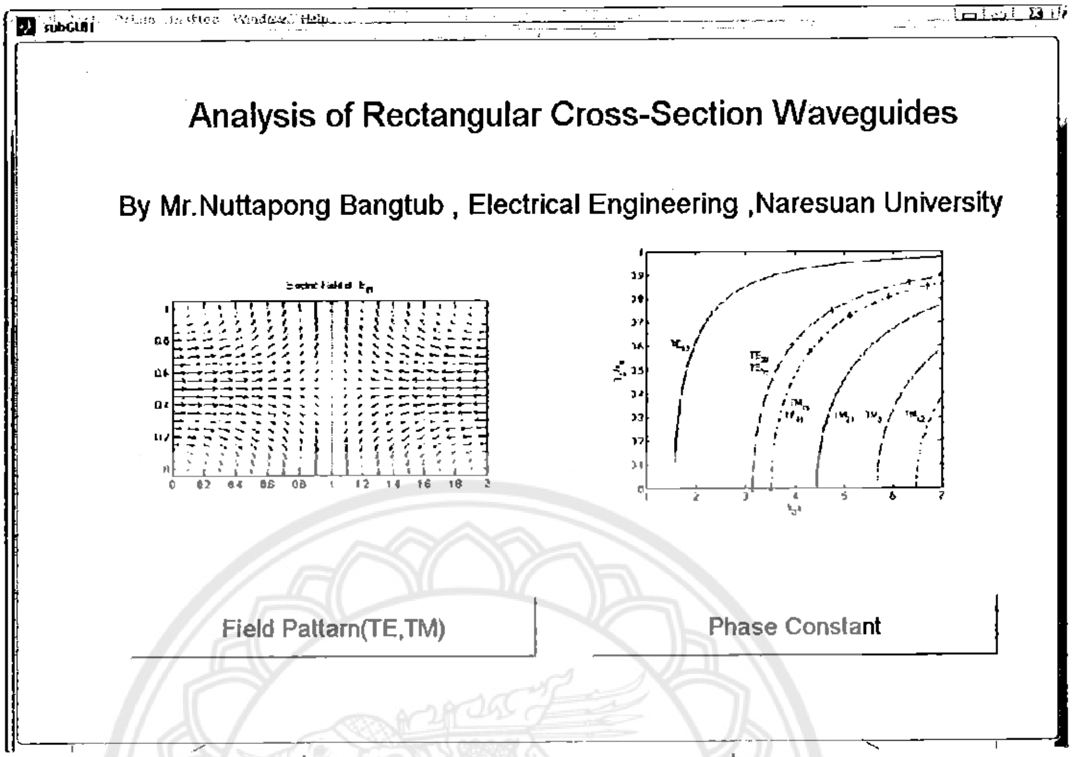
การเชื่อมต่อกับผู้ใช้ทางด้านกราฟฟิก (GUI) เป็นการเชื่อมต่อระหว่างผู้ใช้และคอมพิวเตอร์ โดยคอมพิวเตอร์จะรับการสั่งงานจากผู้ใช้ผ่านทางคีย์บร์อด เม้าส์ อย่างใดอย่างหนึ่งให้กับคอมพิวเตอร์ คอมพิวเตอร์จึงจะนำข้อมูลนั้นมาประมวลผล และแสดงผลเป็นตัวอักษรหรือรูปภาพกราฟฟิก บนจอมอนิเตอร์



รูปที่ ค.1 หน้าหลักของโปรแกรมวิเคราะห์ท่อนำคลื่นภาคตัดขวางสี่เหลี่ยม

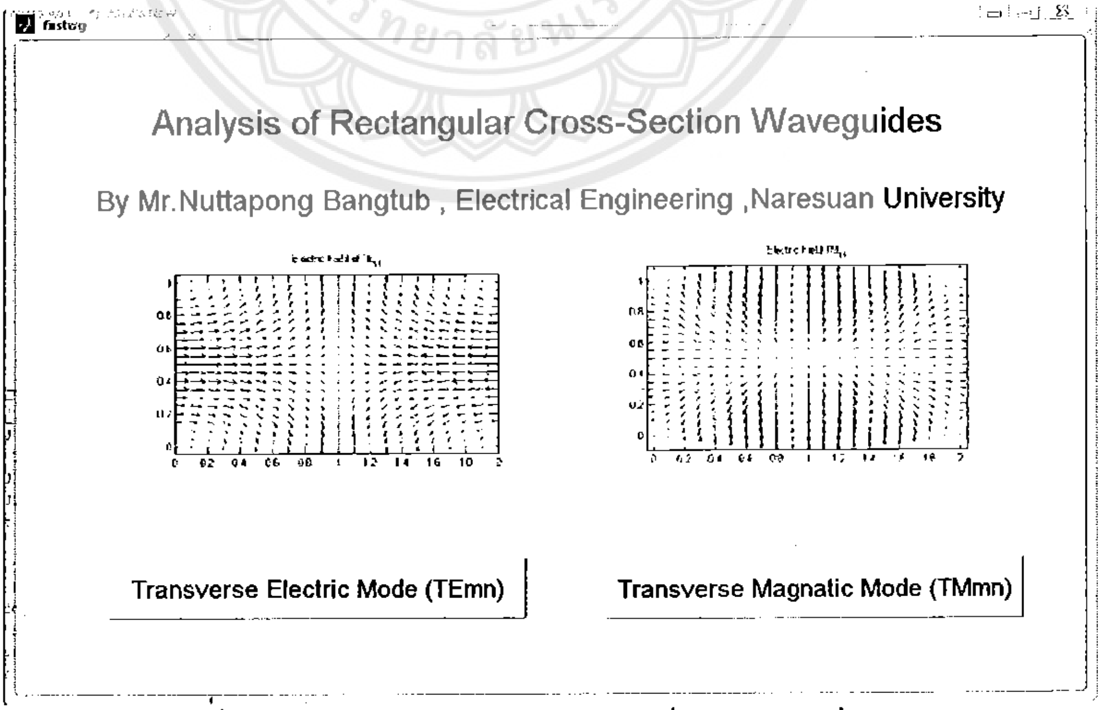
หน้าหลักของโปรแกรมวิเคราะห์ท่อนำคลื่นภาคตัดขวางสี่เหลี่ยมเพื่อความง่ายและความสะดวกต่อผู้ใช้จะแบ่งเป็นสองส่วนโดยส่วนแรกจะนำไปสู่การวิเคราะห์ท่อนำคลื่นกลวงในรูปที่ ค.2 และส่วนที่สองจะนำไปสู่การวิเคราะห์ท่อนำคลื่นที่บรรจุไดอิเล็กตริกบางส่วนในรูปที่ ค.3

เมื่อเลือกพิจารณาในส่วนของท่อนำคลื่นกลวง สามารถแยกศึกษาในส่วนของแบบรูปคลื่น (Field Patterns) และ ค่าคงตัวเฟส (Phase Constant) ดังรูป ค.2

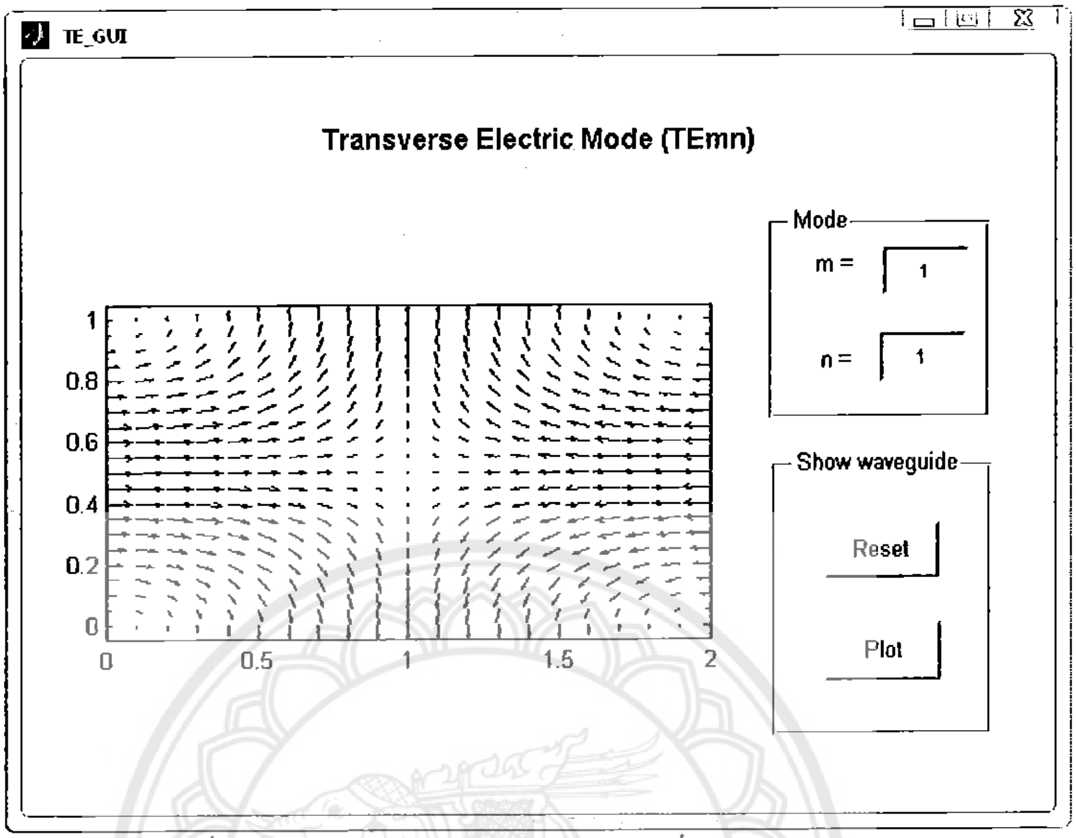


รูปที่ ค.2 หน้าย่อยสำหรับวิเคราะห์ท่อนำคลื่นกลวง

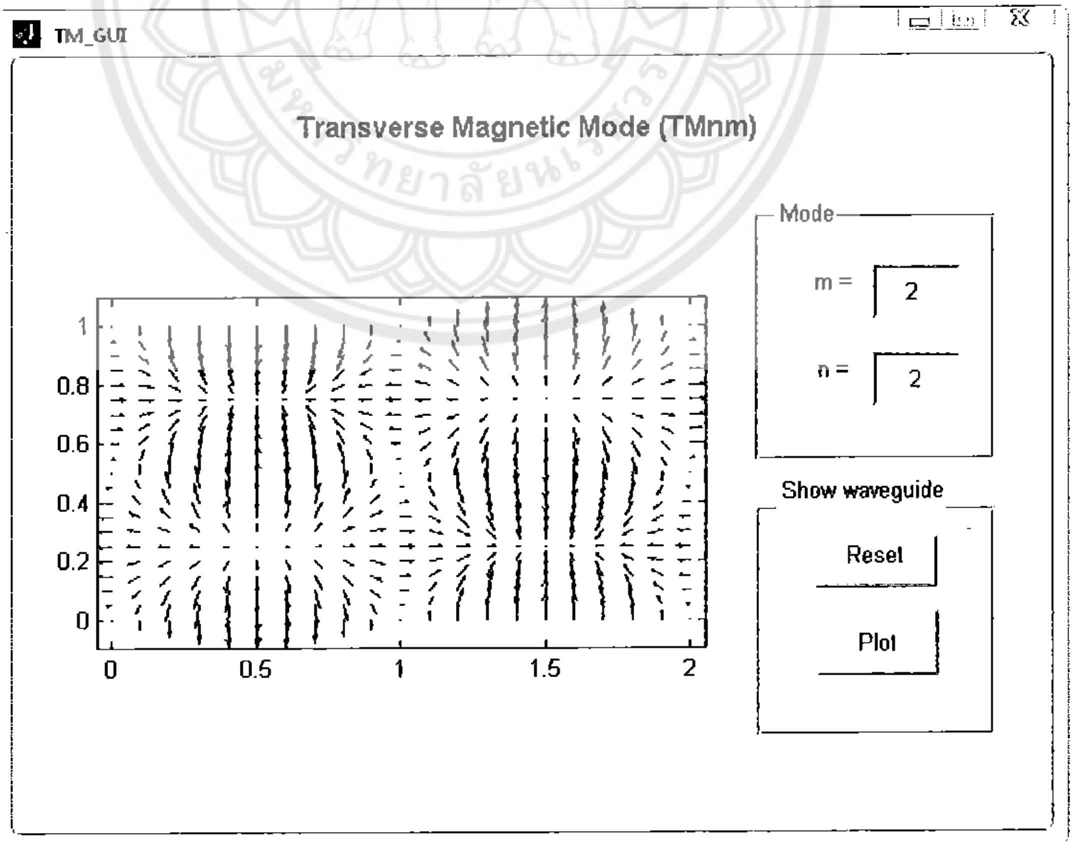
ในส่วนของแบบรูปคลื่นนั้นจะสามารถพิจารณาแบบรูปคลื่นสนามไฟฟ้าตามขวาง (TE) และแบบรูปคลื่นสนามแม่เหล็กตามขวาง (TM) โดยจะมีหน้าโปรแกรมย่อยดังนี้



รูปที่ ค.3 หน้าย่อยสำหรับวิเคราะห์แบบรูปคลื่นของท่อนำคลื่นกลวง



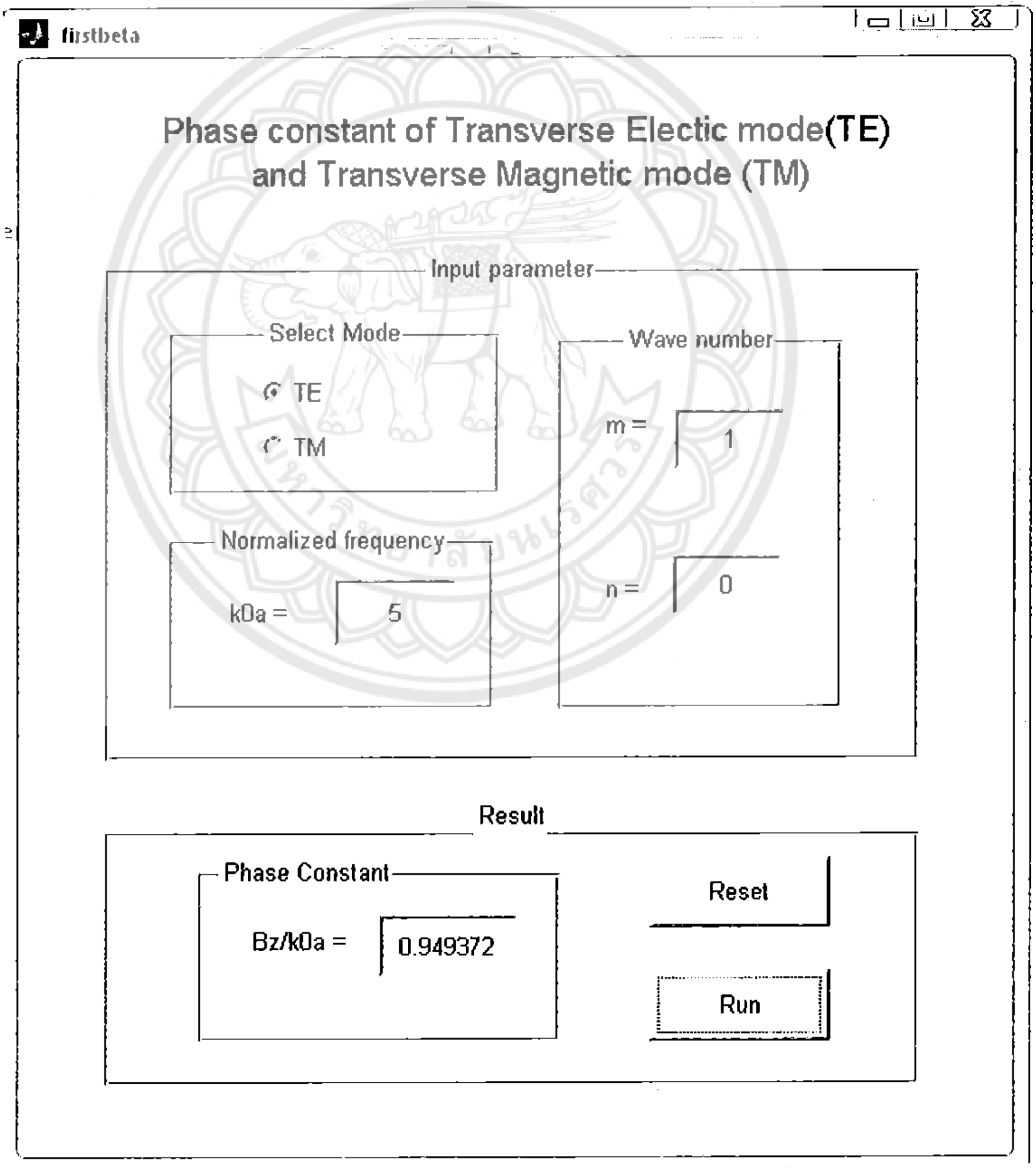
รูปที่ ค.4 หน้าย่อยสำหรับวิเคราะห์แบบแผนคลื่นสนามไฟฟ้าตามขวาง



รูปที่ ค.5 หน้าย่อยสำหรับวิเคราะห์แบบแผนคลื่นสนามแม่เหล็กตามขวาง

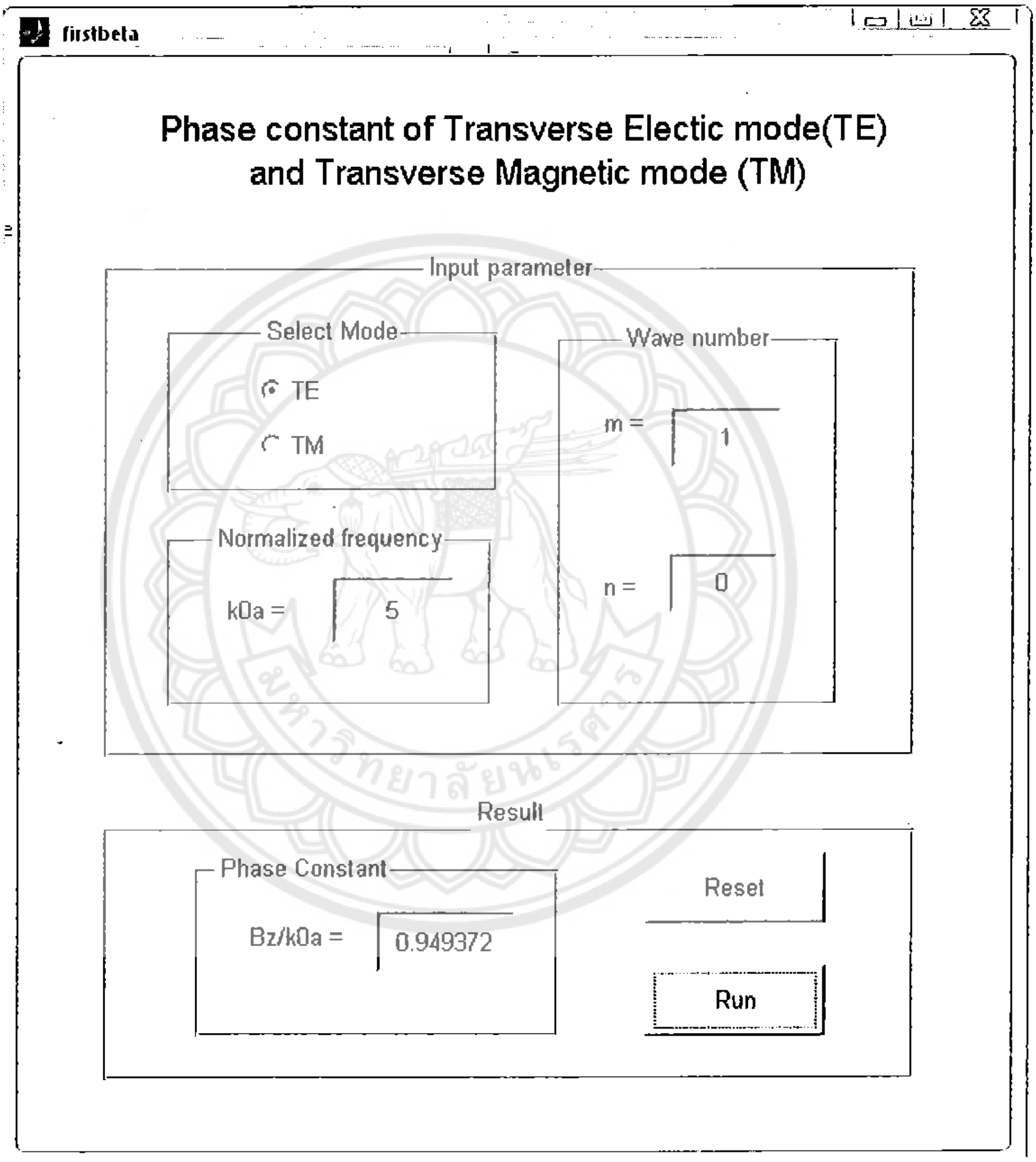
จากรูปที่ ค.4 จะอาศัยสมการ (15-a) และสมการ (15-b) ในบทที่ 2 เพื่อแสดงความสัมพันธ์ของสมการสนามไฟฟ้าตามขวางที่เกิดขึ้นในท่อนำคลื่นเมื่อพิจารณาเฉพาะภาคตัดขวางสี่เหลี่ยม โดยผู้ใช้จะต้องกำหนดตัวเลขแบบแผนคลื่นให้กับโปรแกรม โปรแกรมจึงจะแสดงผลในรูปกราฟฟิก 2 มิติเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ท่อนำคลื่นต่อไปในทำนองเดียวกัน จากรูปที่ ค.5 จะอาศัยสมการ (32-d) และสมการ (32-e)

เมื่อพิจารณาค่าคงตัวเฟสของท่อนำคลื่นกลวงนั้นจะอาศัยโปรแกรมในรูป ค.6 โดยที่จะแสดงผลลัพธ์ขอโปรแกรมออกมาในรูปของค่า $\frac{\beta_z}{k_0}$ เมื่อป้อนค่าตัวเลขคลื่นและค่า k_0a ลงในโปรแกรม



รูปที่ ค.6 หน้าย่อยสำหรับวิเคราะห์ค่าคงตัวเฟสของท่อนำคลื่นกลวง

สำหรับท่อนำคลื่นที่บรรจุไดอิเล็กตริกไว้บางส่วนจะกล่าวถึงเฉพาะค่าคงตัวเฟส จะไม่กล่าวถึงการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในกรณีท่อนำคลื่นกลวง จึงสามารถเขียนเป็นโปรแกรมได้ดังรูป ค.7



รูปที่ ค.7 หน้าย่อยสำหรับวิเคราะห์ค่าคงตัวเฟสของท่อนำคลื่นที่บรรจุไดอิเล็กตริกบางส่วน

จากทั้งหมดที่กล่าวมาข้างต้นแสดงให้เห็นว่าการวิเคราะห์ท่อนำคลื่นโดยการสร้างการเชื่อมต่อกับผู้ใช้ทางกราฟฟิกขึ้นมานั้น การเปลี่ยนแปลงตัวแปรต่างๆเพียงแค่เปลี่ยนแปลงค่าในหน้าต่าง GUI โดยไม่จำเป็นต้องเข้าไปแก้ไขในตัวโปรแกรมหลัก ทำให้การวิเคราะห์ท่อนำคลื่นมีความสะดวกรวดเร็วและมีความยืดหยุ่นยิ่งขึ้น

ประวัติผู้เขียนโครงงาน

ชื่อ นายณัฐพงษ์ บางทับ

ภูมิลำเนา 83 หมู่ 1 ต.สูงเม่น อ.สูงเม่น จ.แพร่ 54130

ประวัติการศึกษา

-จบระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนพิริยาลัยจังหวัดแพร่

-ปัจจุบันกำลังศึกษาอยู่ในระดับปริญญาตรีชั้นปีที่ 4 สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

E-mail : mr.nuttapong.bangtub@gmail.com