

### บทที่ 3

## การวิเคราะห์ท่อนำคลื่นโดยระเบียบวิธีอีลีเมนต์ฟริกาเลอร์คิน

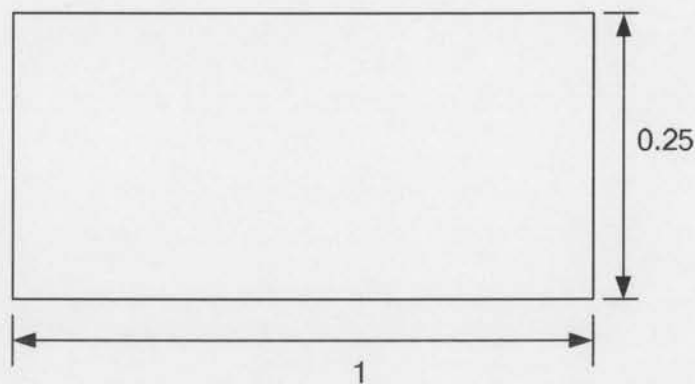
### 3.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงการใช้ระเบียบวิธีอีลีเมนต์ฟริกาเลอร์คินในการวิเคราะห์ท่อนำคลื่นใน 2 มิติ โดยใช้ฟังก์ชันรูปร่างแบบเคลื่อนที่กำลังสองน้อยที่สุด โดยเปรียบเทียบผลกับระเบียบวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์และผลที่ได้จากบทความอ้างอิงโดยทดลองคำนวณค่าในชุดตัวอย่าง 7 ตัวอย่าง เพื่อคำนวณหาเลขคลื่นตัด(cutoff wavenumber) โดยคำนวณค่าทั้งใน TE โมดและ TM โมด ซึ่งในการคำนวณเลขคลื่นตัดสโมดแรก กรณีที่คำนวณ TM โมด ซึ่งฟังก์ชันรูปร่างแบบเคลื่อนที่กำลังสองน้อยที่สุดนี้ไม่มีคุณสมบัติตามคุณสมบัติของโคเรเนกเกอร์ เดลตาฟังก์ชัน ผู้วิจัยจึงเลือกใช้ระเบียบวิธีพินอลตี้ (penalty) เพื่อกำหนดเงื่อนไขขอบเขตซึ่งวิธีนี้มีข้อดีคือขนาดของเมตริกซ์ยังเท่าเดิมซึ่งในที่นี้เลือกใช้ค่าสัมประสิทธิ์เท่ากับ  $10^3$

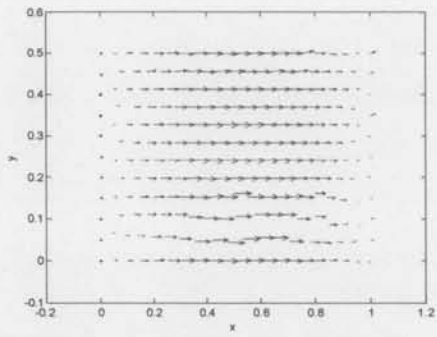
### 3.2 ผลการตรวจสอบโดยการคำนวณ

#### 3.2.1 ท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยม

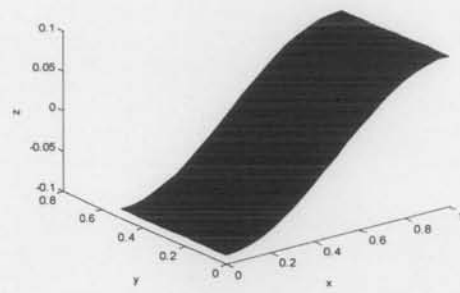
ในการคำนวณโดยใช้ตัวอย่างท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมนี้ใช้ท่อนำคลื่นที่มีขนาดตามรูป



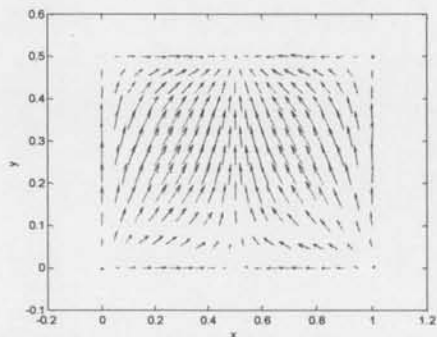
รูปที่ 3.1 โครงสร้างภาคตัดขวางของท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยม



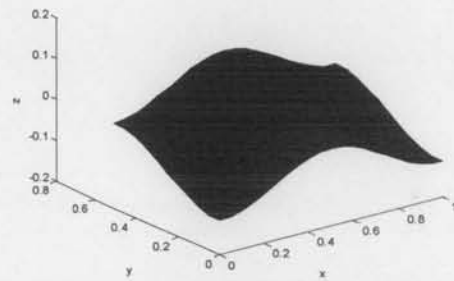
ก. โหมด  $TE_1$  สนามแม่เหล็กตามขวาง



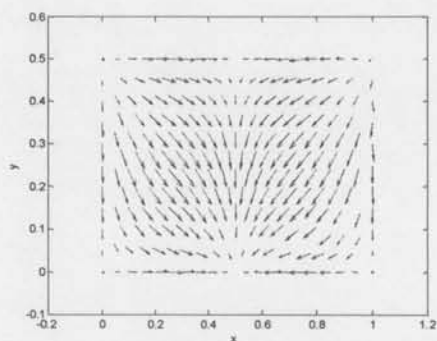
ข. โหมด  $TE_1$  สนามแม่เหล็กตามยาว



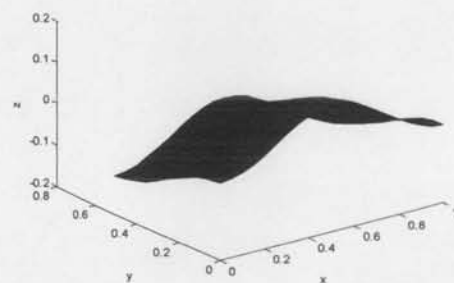
ค. โหมด  $TE_2$  สนามแม่เหล็กตามขวาง



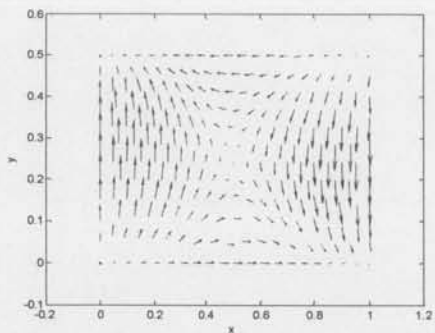
ง. โหมด  $TE_2$  สนามแม่เหล็กตามยาว



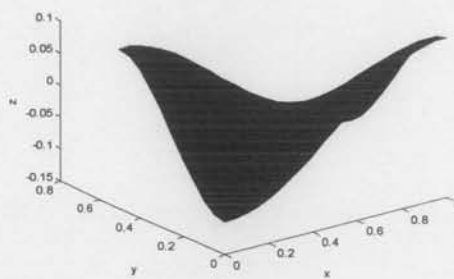
จ. โหมด  $TE_3$  สนามแม่เหล็กตามขวาง



ฉ. โหมด  $TE_3$  สนามแม่เหล็กตามยาว

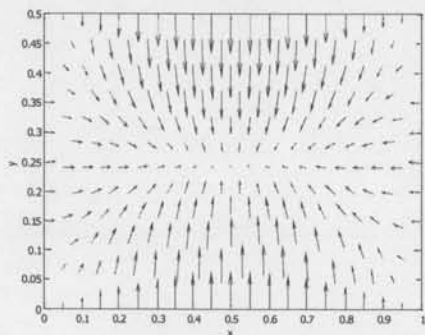


ช.โหมด  $TE_4$  สนามแม่เหล็กตามขวาง

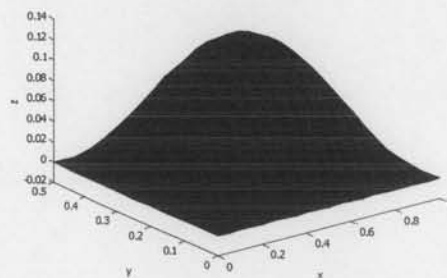


ซ.โหมด  $TE_4$  สนามแม่เหล็กตามยาว

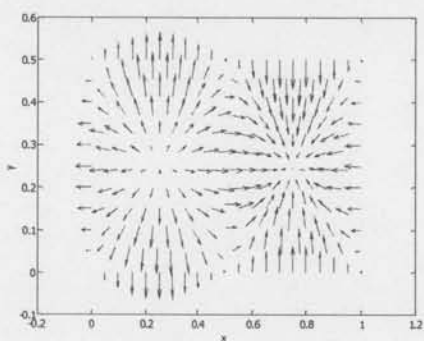
รูปที่ 3.2 แบบรูปสนามแม่เหล็กของท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมกรณิ TE โหมด



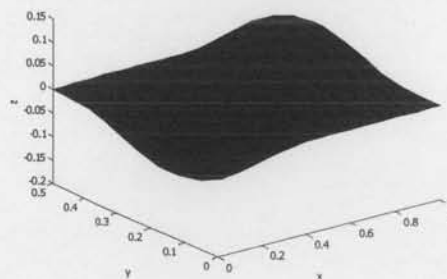
ก.โหมด  $TM_1$  สนามไฟฟ้าตามขวาง



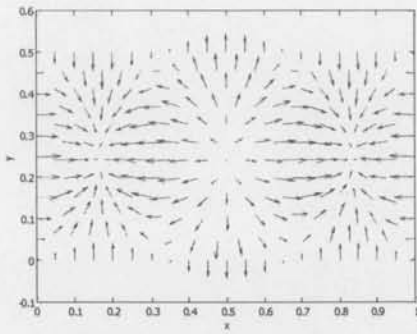
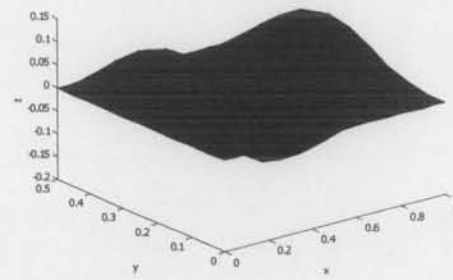
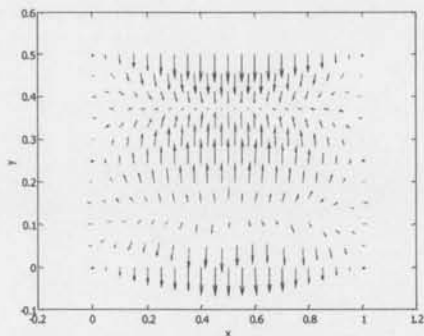
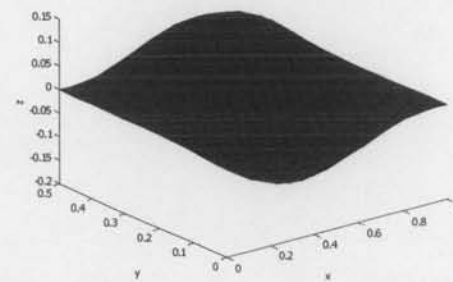
ข.โหมด  $TM_1$  สนามไฟฟ้าตามยาว



ค.โหมด  $TM_2$  สนามไฟฟ้าตามขวาง



ง.โหมด  $TM_2$  สนามไฟฟ้าตามยาว

จ. โหมด  $TM_3$  สนามไฟฟ้าตามขวางฉ. โหมด  $TM_3$  สนามไฟฟ้าตามยาวช. โหมด  $TM_4$  สนามไฟฟ้าตามขวางซ. โหมด  $TM_4$  สนามไฟฟ้าตามยาว

รูปที่ 3.3 แบบรูปสนามไฟฟ้าของท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมกรณี TM โหมด

ผลการคำนวณเลขคลื่นตัดแสดงได้ดังตารางที่ 3.1 ซึ่งในการคำนวณนี้ได้ใช้ฟังก์ชันรูปร่างแบบคือคลื่นที่กำลังสองน้อยที่สุด เพื่อใช้ในการคำนวณเปรียบเทียบกับผลการคำนวณโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์และจากบทความอ้างอิงโดยการเปรียบเทียบเลขคลื่นตัดสี่โหมดแรก

ตารางที่ 3.1 เปรียบเทียบผลการคำนวณเลขคลื่นตัดของท่อนำคลื่นรูปร่าง แบบสี่เหลี่ยม ที่ได้จาก วิทยานิพนธ์นี้กับผลในบทความอ้างอิงกรณี  $TE$  mode เมื่อใช้ฟังก์ชันรูปร่างแบบ MLS

โหมด	Kc(exact)	FEM	MLS	% error
1	3.142	3.1454	3.1695	0.8752
2	6.285	6.3111	6.2947	0.1543
3	6.285	6.3148	6.3013	0.2594
4	7.027	7.0653	7.0466	0.2789

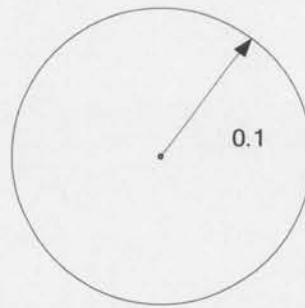
จากผลการคำนวณเพื่อหาค่าเลขคลื่นตัดในสี่โหมดแรกผลที่ได้เมื่อเปรียบเทียบกับระเบียบวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ปรากฏว่าผลที่ได้จากระเบียบวิธีไรเมชโดยใช้ฟังก์ชันรูปร่างแบบเคลื่อนที่ กำลังสองน้อยที่สุดให้ผลที่มีความผิดพลาดน้อยกว่าเมื่อโหมดสูงขึ้น

ตารางที่ 3.2 เปรียบเทียบผลการคำนวณเลขคลื่นตัดของท่อนำคลื่นรูปร่าง แบบสี่เหลี่ยม ที่ได้ จากวิทยานิพนธ์นี้กับผลในบทความอ้างอิงกรณี  $TM$  mode เมื่อใช้ฟังก์ชันรูปร่างแบบ MLS

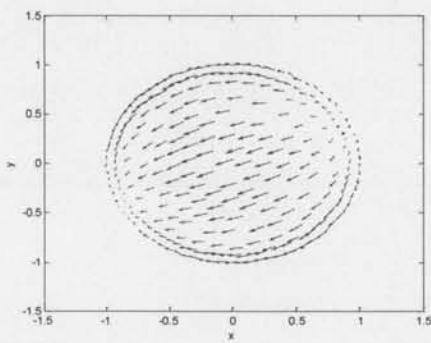
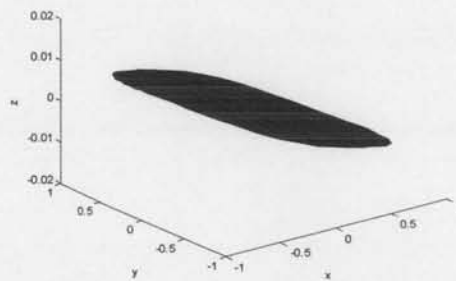
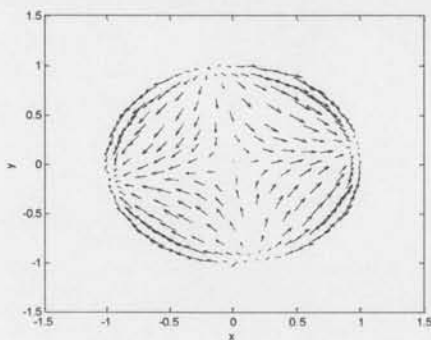
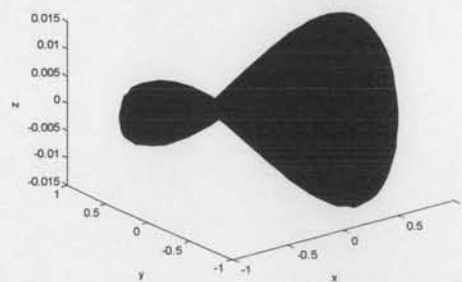
โหมด	Kc(exact)	FEM	MLS	% error
1	7.027	7.0643	6.9937	0.4739
2	8.889	8.9710	8.8569	0.3611
3	11.3272	11.4990	11.3007	0.2339
4	12.958	13.1835	12.9023	0.4299

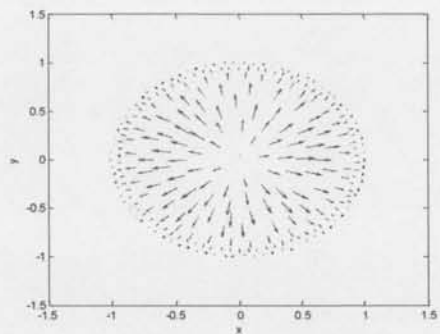
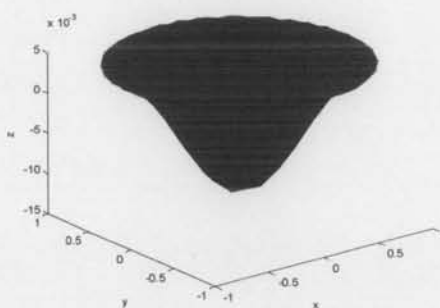
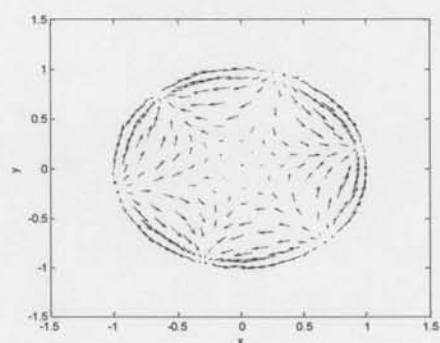
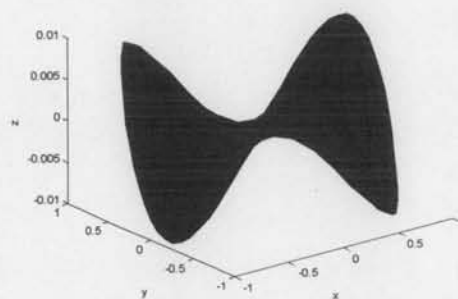
จากผลการคำนวณโดยระเบียบวิธีได้เมชผลการคำนวณที่ได้จะให้ผลการคำนวณที่มีความผิดพลาดน้อยกว่าที่ได้จากการคำนวณโดยระเบียบวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์โดยใช้รูปร่างโนดและผลที่ได้มีความใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการคำนวณโดยตรง

## 3.2.2 ท่อนำคลื่นแบบวงกลม

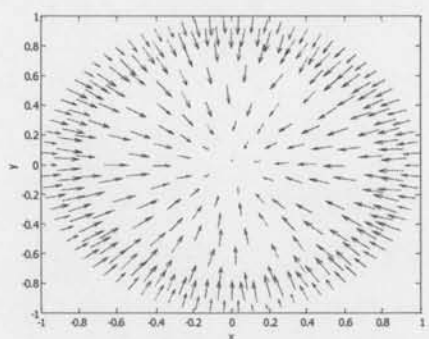
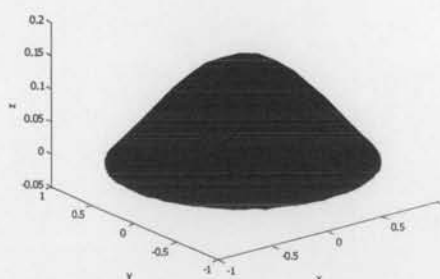


รูปที่ 3.4 โครงสร้างภาคตัดขวางของท่อนำคลื่นแบบวงกลม

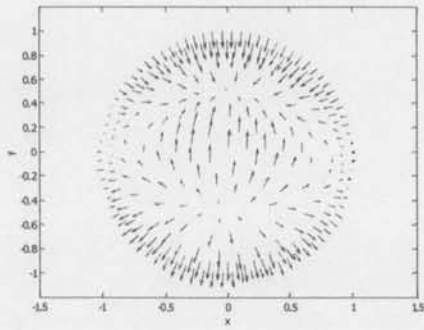
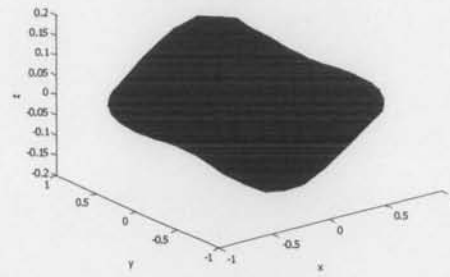
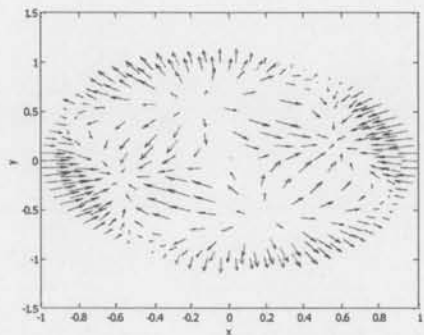
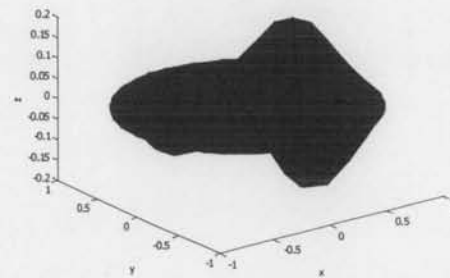
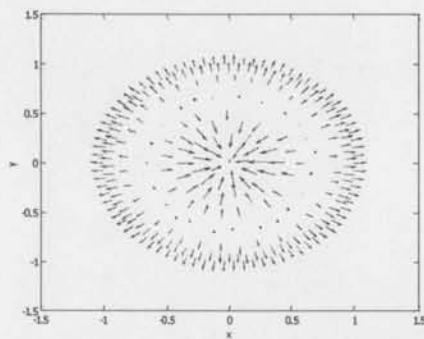
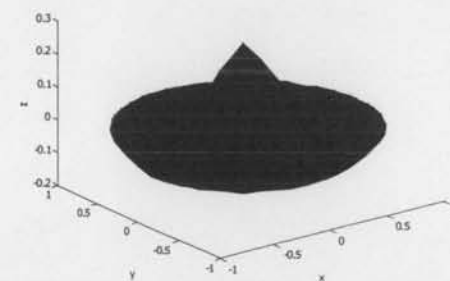
ก. โหมด  $TE_1$  สนามแม่เหล็กตามขวางข. โหมด  $TE_1$  สนามแม่เหล็กตามยาวค. โหมด  $TE_2$  สนามแม่เหล็กตามขวางง. โหมด  $TE_2$  สนามแม่เหล็กตามยาว

จ. โหมด  $TE_3$  สนามแม่เหล็กตามขวางฉ. โหมด  $TE_3$  สนามแม่เหล็กตามยาวช. โหมด  $TE_4$  สนามแม่เหล็กตามขวางซ. โหมด  $TE_4$  สนามแม่เหล็กตามยาว

รูปที่ 3.5 แบบรูปสนามแม่เหล็กของท่อนำคลื่นแบบวงกลมกรณี TE โหมด

ก. โหมด  $TM_1$  สนามไฟฟ้าตามขวางข. โหมด  $TM_1$  สนามไฟฟ้าตามยาว



ค.โหมด  $TM_2$  สนามไฟฟ้าตามขวางง.โหมด  $TM_2$  สนามไฟฟ้าตามยาวจ.โหมด  $TM_3$  สนามไฟฟ้าตามขวางฉ.โหมด  $TM_3$  สนามไฟฟ้าตามยาวช.โหมด  $TM_4$  สนามไฟฟ้าตามขวางซ.โหมด  $TM_4$  สนามไฟฟ้าตามยาว

รูปที่ 3.6 แบบรูปสนามไฟฟ้าของท่อนำคลื่นแบบวงกลมกรณี  $TM$  โหมด



ตารางที่ 3.3 เปรียบเทียบผลการคำนวณเลขคลื่นตัดของท่อนำคลื่นรูปร่าง แบบวงกลม ที่ได้จาก วิทยานิพนธ์นี้กับผลในบทความอ้างอิงกรณี  $TE$  mode เมื่อใช้ฟังก์ชันรูปร่างแบบ MLS

โหมด	Kc(exact)	SIE	FEM	MLS	% error
1	1.8412	1.8462	1.8475	1.8441	0.1575
2	3.0542	3.0645	3.0851	3.0712	0.5566
3	3.8317	3.8422	3.8966	3.8733	1.0857
4	4.2012	4.2200	4.2893	4.1943	0.1642

จากผลการคำนวณที่ได้เมื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณโดยตรงผลที่ได้จากการคำนวณโดยใช้ฟังก์ชันรูปร่างแบบเคลื่อนที่กำลังสองน้อยที่สุดจะให้ค่าความผิดพลาดในโหมดน้อยกว่าที่ได้จากการคำนวณโดยระเบียบวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ทั้งสี่โหมดและเมื่อเปรียบเทียบกับบทความอ้างอิงของ Swaminathan, M., Arvas, E. Sakar, T.K., and Djordjevic, A.R. (1990) ผลที่ได้จากโหมดแรกและโหมดที่สี่มีความผิดพลาดน้อยกว่า

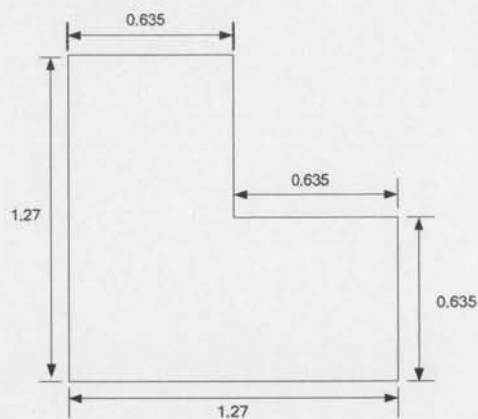
ตารางที่ 3.4 เปรียบเทียบผลการคำนวณเลขคลื่นตัดของท่อนำคลื่นรูปร่าง แบบวงกลม ที่ได้จาก วิทยานิพนธ์นี้กับผลในบทความอ้างอิงกรณี  $TM$  mode เมื่อใช้ฟังก์ชันรูปร่างแบบ MLS

โหมด	Kc(exact)	SIE	FEM	MLS	% error
1	2.4048	2.4111	2.4151	2.4070	0.0915
2	3.8317	3.8416	3.8842	3.7896	1.0987
3	5.1356	5.1458	5.2664	5.0279	2.0971
4	5.5200	5.5346	5.6969	5.4582	1.1196

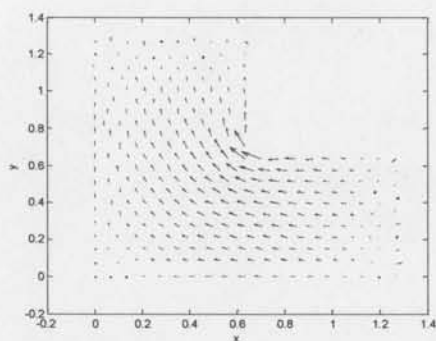
จากตารางผลการคำนวณหาค่าเลขคลื่นตัดเมื่อเปรียบเทียบกับผลการคำนวณที่ได้จาก ระเบียบวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ระเบียบวิธีไร้มัชจะให้ค่าความผิดพลาดน้อยกว่าทั้งสี่โหมดและเมื่อเปรียบเทียบกับบทความอ้างอิงโดยใช้ระเบียบวิธี Surface integral ผลที่ได้ระเบียบวิธีไร้มัชจะให้ค่าความผิดพลาดน้อยกว่าในโหมดแรก

### 3.2.3 ท่อนำคลื่นรูปร่างแบบ L

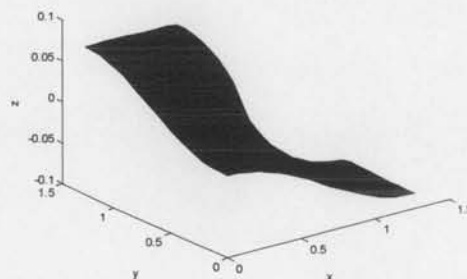
โครงสร้างภาคตัดขวางของท่อนำคลื่นมีสันแบบรูปร่าง L มีลักษณะทางกายภาพคือ รูปร่างของท่อนำคลื่นเหมือนรูปตัว L ความยาวด้านแนวตั้งและแนวนอนมีขนาดเท่ากัน ดังรูป



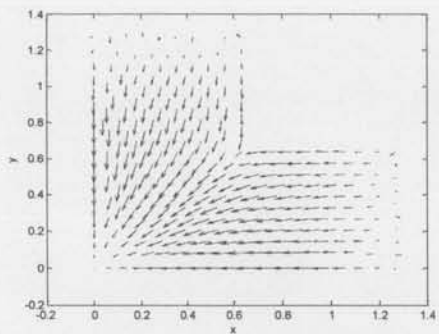
รูปที่ 3.7 โครงสร้างภาคตัดขวางของท่อนำคลื่นแบบรูปร่าง L



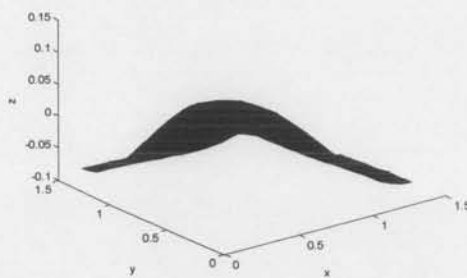
ก. โหมด  $TE_1$  สนามแม่เหล็กตามขวาง



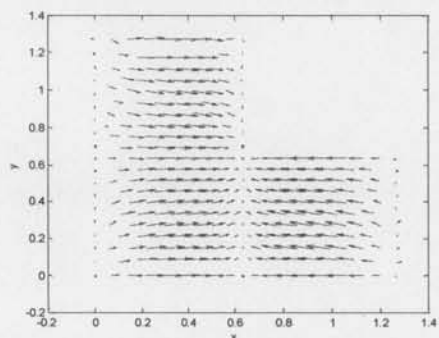
ข. โหมด  $TE_1$  สนามแม่เหล็กตามยาว



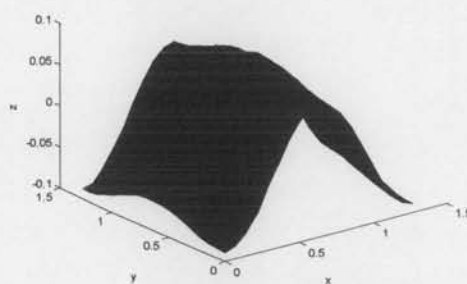
ค. โหมด  $TE_2$  สนามแม่เหล็กตามขวาง



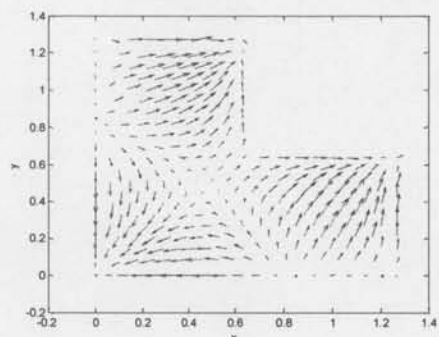
ง. โหมด  $TE_2$  สนามแม่เหล็กตามยาว



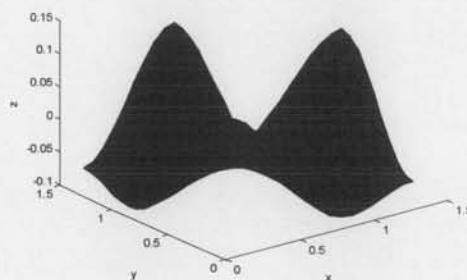
จ. โหมด  $TE_3$  สนามแม่เหล็กตามขวาง



ฉ. โหมด  $TE_3$  สนามแม่เหล็กตามยาว

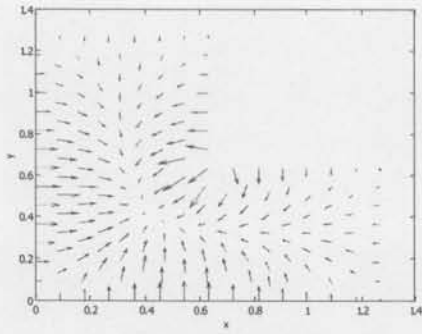


ช. โหมด  $TE_4$  สนามแม่เหล็กตามขวาง

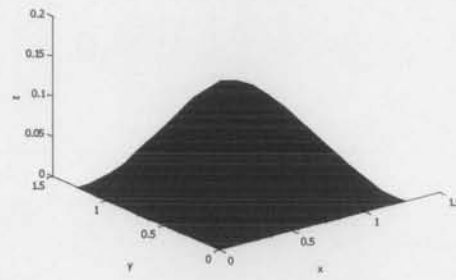


ซ. โหมด  $TE_4$  สนามแม่เหล็กตามยาว

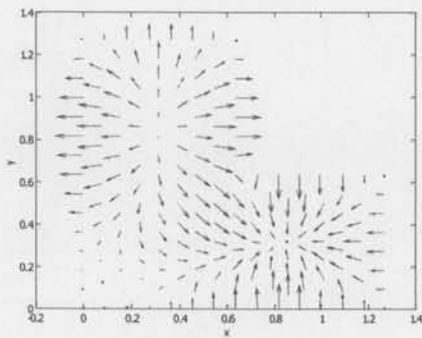
รูปที่ 3.8 แบบรูปสนามแม่เหล็กของท่อนำคลื่นรูปร่างแบบ L กรณี TE โหมด



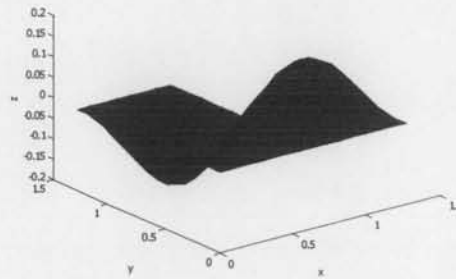
ก. โหมด  $TM_1$  สนามไฟฟ้าตามขวาง



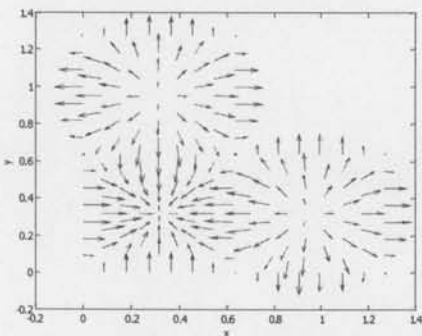
ข. โหมด  $TM_1$  สนามไฟฟ้าตามยาว



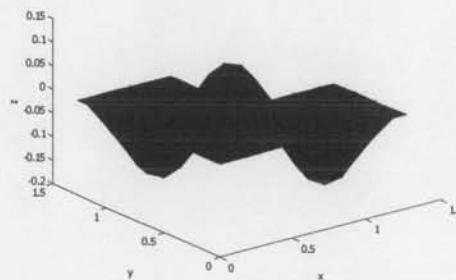
ค. โหมด  $TM_2$  สนามไฟฟ้าตามขวาง



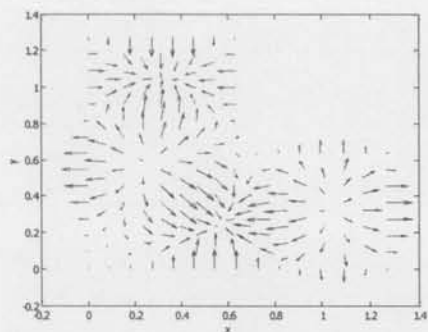
ง. โหมด  $TM_2$  สนามไฟฟ้าตามยาว



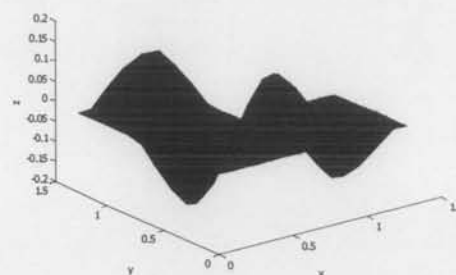
จ. โหมด  $TM_3$  สนามไฟฟ้าตามขวาง



ฉ. โหมด  $TM_3$  สนามไฟฟ้าตามยาว



ช. โหมด  $TM_4$  สนามไฟฟ้าตามขวาง



ข. โหมด  $TM_4$  สนามไฟฟ้าตามยาว

รูปที่ 3.9 แบบรูปสนามไฟฟ้าของท่อนำคลื่นรูปรางแบบ L กรณี TM โหมด

ตารางที่ 3.5 เปรียบเทียบผลการคำนวณเลขคลื่นตัดของท่อนำคลื่นรูปราง L ที่ได้จากวิธานิพนธ์นี้กับผลในบทความอ้างอิงกรณี  $TE$  mode เมื่อใช้ฟังก์ชันรูปรางแบบ MLS

โหมด	SIE	FD-SIC	FEM	MLS	% error/SIE	% error/FD
1	1.8917	1.9111	1.9299	1.9293	1.9876	0.9523
2	2.9159	2.9600	2.9682	2.9640	1.6496	0.1351
3	4.8755	4.9452	4.9813	4.9518	1.5650	0.1335
4	5.2463	5.3128	5.3609	5.3237	1.753	0.2052

จากผลการคำนวณเมื่อเปรียบเทียบผลที่ได้จากการคำนวณกับบทความอ้างอิงผลของ Guan, J.M. and Su, C.C. (1995) ซึ่งใช้ระเบียบวิธีผลต่างสลับเนื่อง (Finite Difference Method) ผลที่ได้มีความใกล้เคียงกันแต่เมื่อเทียบกับผลที่ได้จากผลที่ได้จาก Swaminathan, M., Arvas, E., Sakar, T.K., and Djordjevic, A.R. (1990) ผลที่ได้จะค่อนข้างต่างกัน

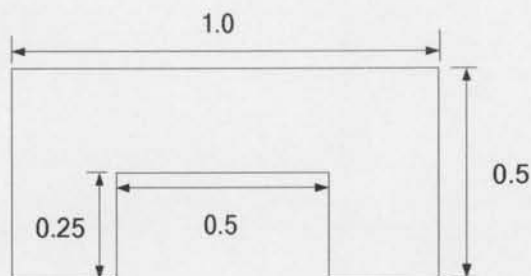
ตารางที่ 3.6 เปรียบเทียบผลการคำนวณเลขคลื่นตัดของท่อนำคลื่นรูปร่าง L ที่ได้จากวิทยานิพนธ์นี้กับผลในบทความอ้างอิงกรณี กรณี  $TM$  mode เมื่อใช้ฟังก์ชันรูปร่างแบบ MLS

โมด	SIE	FD-SIC	FEM	MLS	% error/SIE	% error/FD
1	4.8677	4.8949	4.9463	4.924	1.1566	0.5945
2	6.1361	6.1350	6.1908	6.1442	0.1320	0.1500
3	6.9980	6.9921	7.0782	6.9907	0.1043	0.0200
4	8.5525	8.5458	8.7020	8.5537	0.0140	0.0924

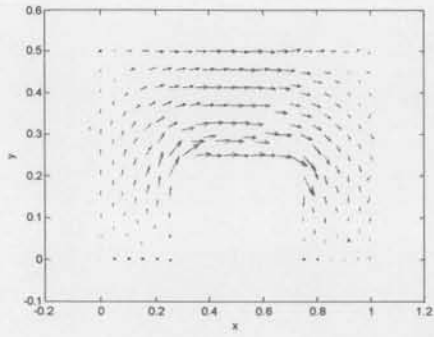
จากผลการคำนวณที่ได้เมื่อเปรียบเทียบกับบทความอ้างอิงผลผลที่ได้จากระเบียบวิธีไร้มESH มีความใกล้เคียงกับผลที่ได้จากบทความอ้างอิงทั้งสองบทความ

### 3.2.4 ท่อนำคลื่นแบบสันเดียว

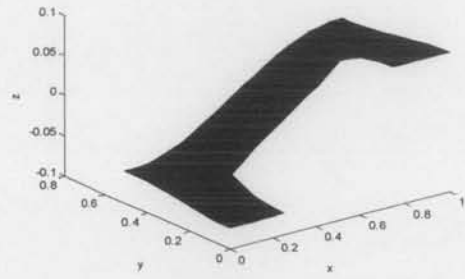
โครงสร้างภาคตัดขวางของท่อนำคลื่นมีสันแบบสันเดียว มีลักษณะทางกายภาพคือมีการโค้งเข้าของผนังด้านนำ 1 ด้าน หรือมีการสอดตัวนำเข้าไป 1 แท่งดังรูป



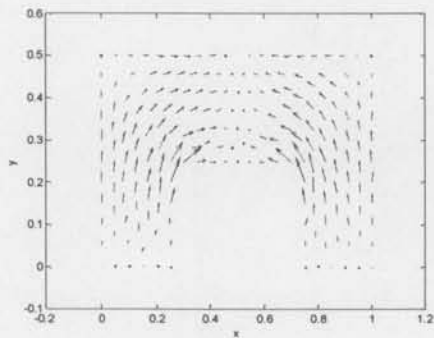
รูปที่ 3.10 โครงสร้างภาคตัดขวางของท่อนำคลื่นมีสันแบบเดียว



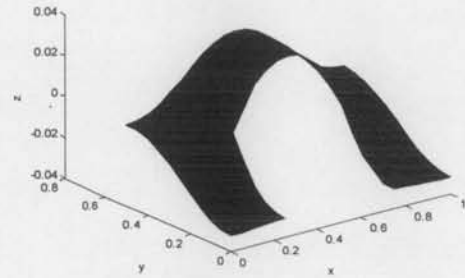
ก. โหมด  $TE_1$  สนามแม่เหล็กตามขวาง



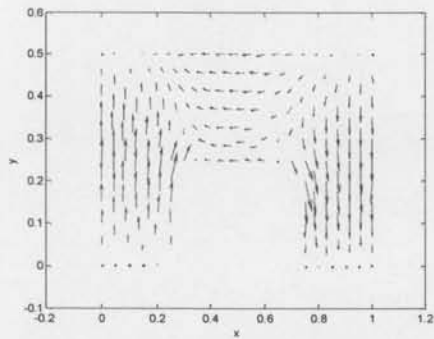
ข. โหมด  $TE_1$  สนามแม่เหล็กตามยาว



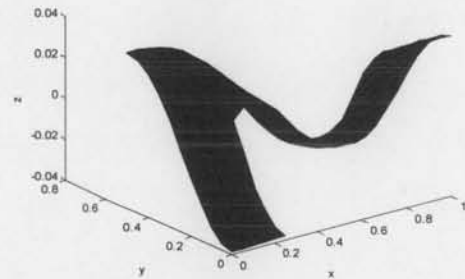
ค. โหมด  $TE_2$  สนามแม่เหล็กตามขวาง



ง. โหมด  $TE_2$  สนามแม่เหล็กตามยาว

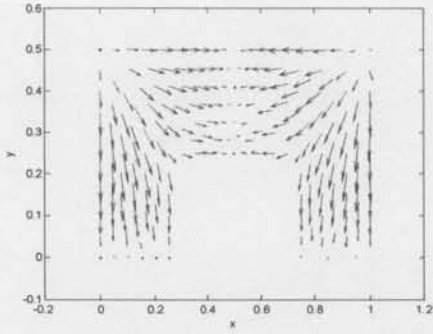


จ. โหมด  $TE_3$  สนามแม่เหล็กตามขวาง

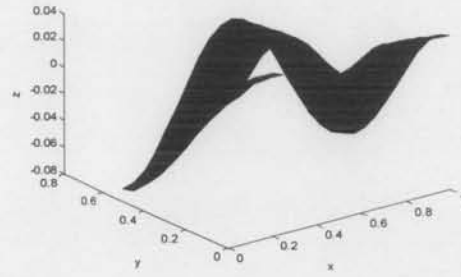


ฉ. โหมด  $TE_3$  สนามแม่เหล็กตามยาว



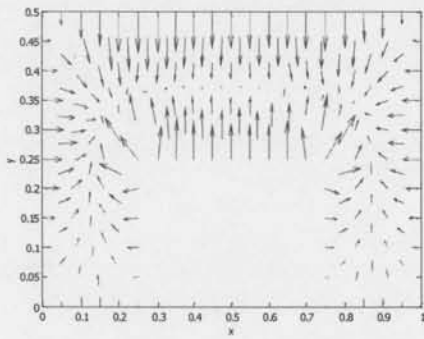


ช.โหมด  $TE_4$  สนามแม่เหล็กตามขวาง

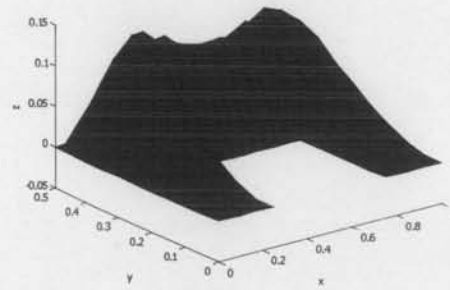


ซ.โหมด  $TE_4$  สนามแม่เหล็กตามยาว

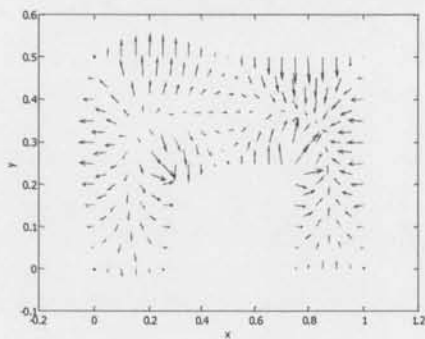
รูปที่ 3.11 แบบรูปสนามแม่เหล็กของท่อนำคลื่นมีสันแบบเดี่ยวกรณี TE โหมด



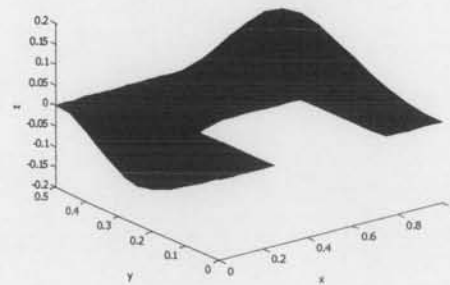
ก.โหมด  $TM_1$  สนามไฟฟ้าตามขวาง



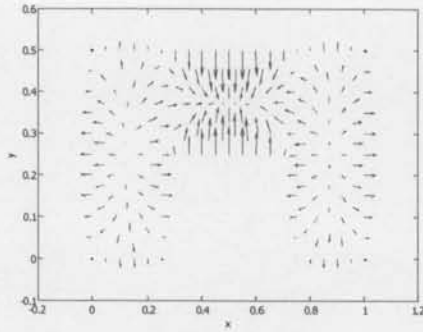
ข.โหมด  $TM_1$  สนามไฟฟ้าตามยาว



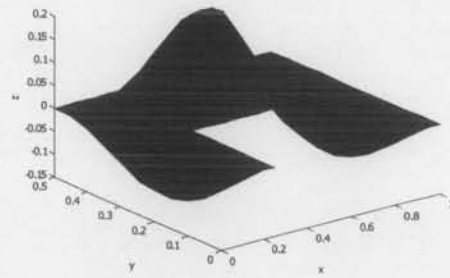
ค.โหมด  $TM_2$  สนามไฟฟ้าตามขวาง



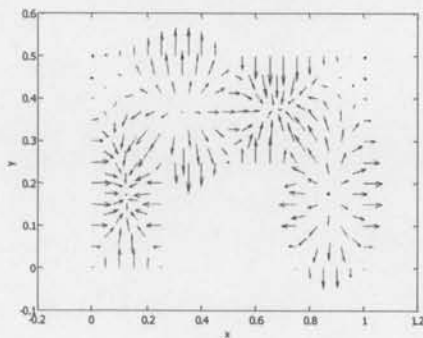
ง.โหมด  $TM_2$  สนามไฟฟ้าตามยาว



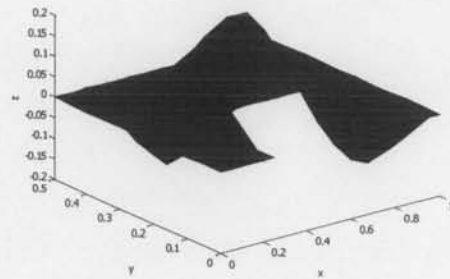
จ. โหมด  $TM_3$  สนามไฟฟ้าตามขวาง



ฉ. โหมด  $TM_3$  สนามไฟฟ้าตามยาว



ข. โหมด  $TM_4$  สนามไฟฟ้าตามขวาง



ค. โหมด  $TM_4$  สนามไฟฟ้าตามยาว

รูปที่ 3.12 แบบรูปสนามไฟฟ้าของท่อนำคลื่นมีสันแบบเดี่ยวกรณี TM โหมด

ตารางที่ 3.7 เปรียบเทียบผลการคำนวณเลขคลื่นตัดของท่อนำคลื่นรูปร่าง แบบสันเดี่ยวที่ได้จาก วิทยานิพนธ์นี้กับผลในบทความอ้างอิงกรณี  $TE$  mode เมื่อใช้ฟังก์ชันรูปร่างแบบ MLS

โหมด	SIE	FD-SIC	FEM	MLS	% error/SIE	% error/FD
1	2.2496	2.2422	2.2626	2.2867	1.6492	1.9847
2	4.9436	4.8543	4.9265	4.9199	0.4794	1.3514
3	6.5189	6.4476	6.5121	6.4920	0.4126	0.6886
4	7.5642	7.5185	7.5570	7.5458	0.2432	0.3631

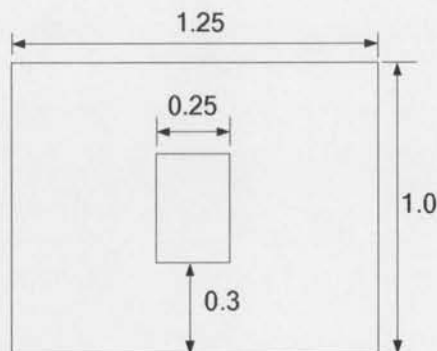
จากผลการคำนวณที่ได้เมื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ปรากฏว่าผลที่ได้มีความใกล้เคียงกันและใกล้เคียงกับผลที่ได้จากบทความอ้างอิงเมื่อโหมดมีอันดับที่สูงขึ้น

ตารางที่ 3.8 เปรียบเทียบผลการคำนวณเลขคลื่นตัดของท่อนำคลื่นรูปร่าง แบบสันเดี่ยวที่ได้จาก วิทยานิพนธ์นี้กับผลในบทความอ้างอิงกรณี *TM mode* เมื่อใช้ฟังก์ชันรูปร่างแบบ MLS

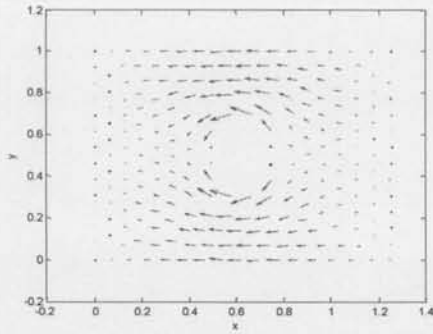
โหมด	SIE	FD-SIC	FEM	MLS	% error/SIE	% error/FD
1	12.0381	12.4447	12.3675	12.2072	1.4047	1.9084
2	12.2938	12.4331	12.6851	12.5382	1.980	0.8453
3	13.9964	14.0037	14.2448	14.0156	0.1372	0.0850
4	15.5871	15.5829	15.8785	15.6324	0.2906	0.3177

จากผลการคำนวณที่ได้ผลที่ได้เมื่อเปรียบเทียบกับระเบียบวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ผลที่ได้จาก ระเบียบวิธีไร้มชมีความใกล้เคียงกับบทความอ้างอิงทั้งสองบทความมากกว่าและเมื่อเปรียบเทียบกับบทความอ้างอิงผลที่ได้จะมีค่าใกล้เคียงกันโดยเฉพาะเมื่ออยู่ในโหมดที่สูงขึ้น

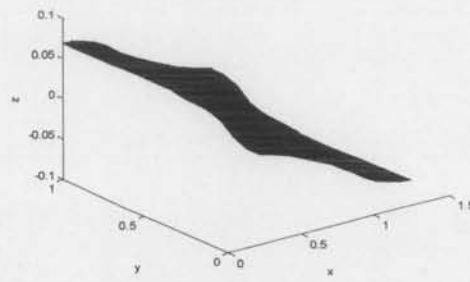
### 3.2.5 ท่อนำคลื่นแบบโคแอกเซียลสี่เหลี่ยม(coaxial rectangular)



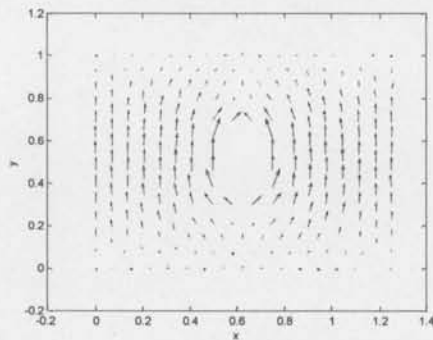
รูปที่ 3.13 โครงสร้างภาคตัดขวางของท่อนำคลื่นแบบโคแอกเซียลสี่เหลี่ยม



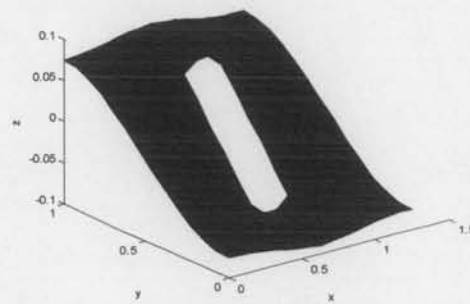
ก. โหมด  $TE_1$  สนามแม่เหล็กตามขวาง



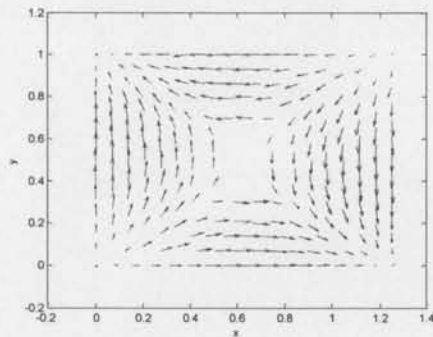
ข. โหมด  $TE_1$  สนามแม่เหล็กตามยาว



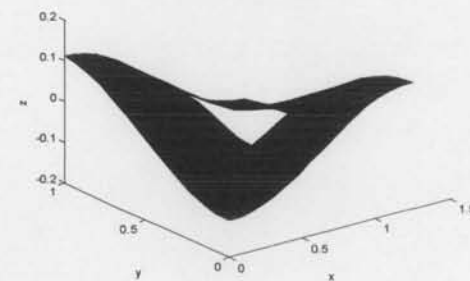
ค. โหมด  $TE_2$  สนามแม่เหล็กตามขวาง



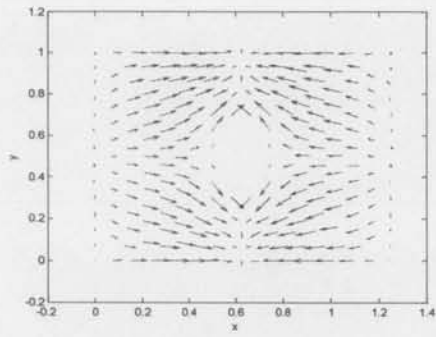
ง. โหมด  $TE_2$  สนามแม่เหล็กตามยาว



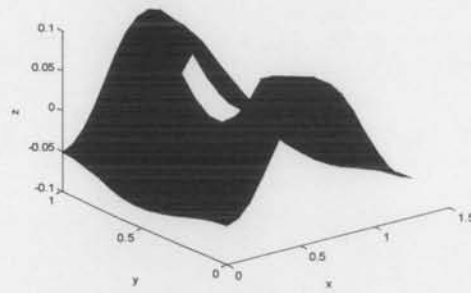
จ. โหมด  $TE_3$  สนามแม่เหล็กตามขวาง



ฉ. โหมด  $TE_3$  สนามแม่เหล็กตามยาว

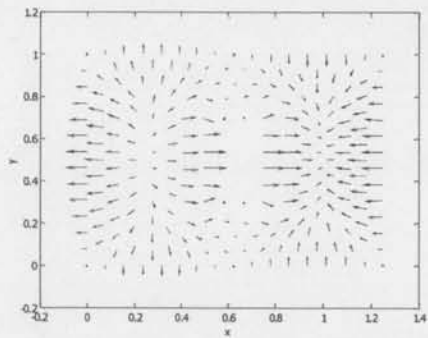


ข. โหมด  $TE_4$  สนามแม่เหล็กตามขวาง

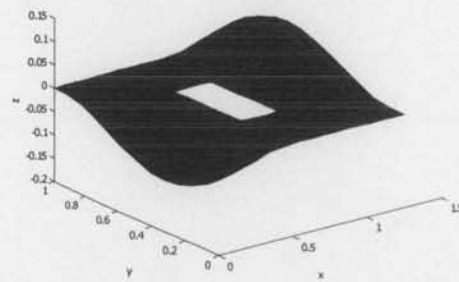


ช. โหมด  $TE_4$  สนามแม่เหล็กตามยาว

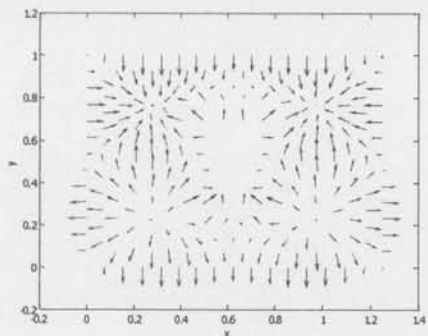
รูปที่ 3.14 แบบรูปสนามแม่เหล็กของท่อนำคลื่นแบบโคแอกเซียลสี่เหลี่ยมกรณี TE โหมด



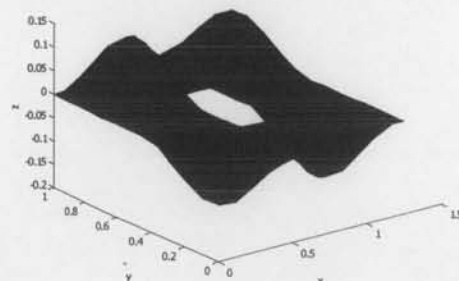
ก. โหมด  $TM_1$  สนามไฟฟ้าตามขวาง



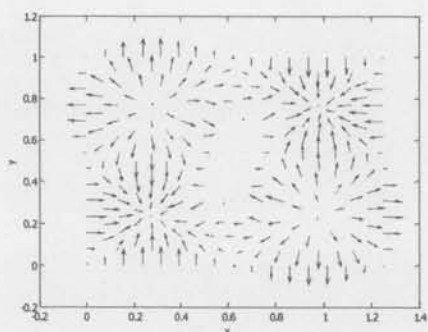
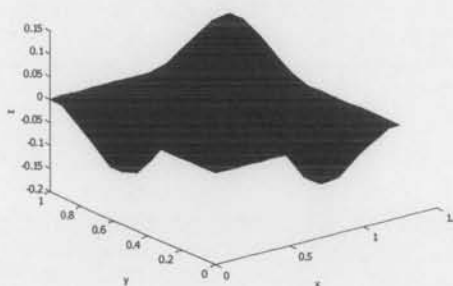
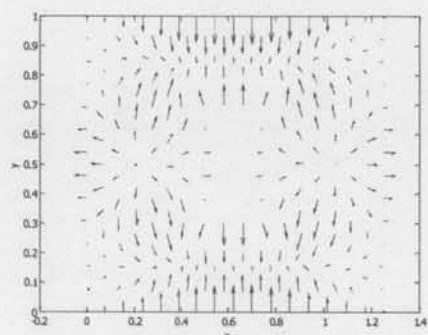
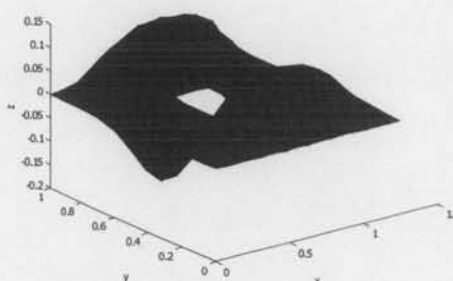
ข. โหมด  $TM_1$  สนามไฟฟ้าตามยาว



ค. โหมด  $TM_2$  สนามไฟฟ้าตามขวาง



ง. โหมด  $TM_2$  สนามไฟฟ้าตามยาว

จ.โหมด  $TM_3$  สนามไฟฟ้าตามขวางฉ.โหมด  $TM_3$  สนามไฟฟ้าตามยาวข.โหมด  $TM_4$  สนามไฟฟ้าตามขวางค.โหมด  $TM_4$  สนามไฟฟ้าตามยาว

รูปที่ 3. 15 แบบรูปสนามไฟฟ้าของท่อนำคลื่นแบบโคแอกเซียลสี่เหลี่ยมกรณี TM โหมด

ตารางที่ 3.9 เปรียบเทียบผลการคำนวณเลขคลื่นตัดของท่อนำคลื่นรูปร่างแบบ coaxial rectangular ที่ได้จากวิทยานิพนธ์นี้กับผลในบทความอ้างอิงกรณี  $TE$  mode เมื่อใช้ฟังก์ชันรูปร่างแบบ MLS

โหมด	SIE	FEM	MLS	% error/SIE
1	2.0789	2.0820	2.0774	0.0722
2	2.8465	2.8523	2.8504	0.1370
3	3.9631	3.9760	3.9692	0.1539
4	5.2864	5.2121	5.1898	1.8273

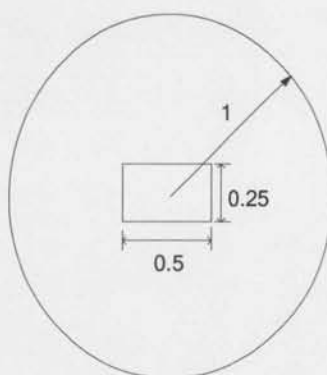
จากผลการคำนวณที่ได้เมื่อเปรียบเทียบกับระเบียบวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ผลที่ได้จากระเบียบวิธีไร้เมชมีความใกล้เคียงกับที่ได้จากบทความอ้างอิงและผลที่ได้เมื่อเปรียบเทียบกับบทความอ้างอิงผลที่ได้มีความใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 3.10 เปรียบเทียบผลการคำนวณเลขคลื่นตัดของท่อนำคลื่นรูปร่างแบบ coaxial สีเหลี่ยมที่ได้จากวิทยานิพนธ์นี้กับผลในบทความอ้างอิงกรณี *TM mode* เมื่อใช้ฟังก์ชันรูปร่างแบบ MLS

โหมด	SIE	FEM	MLS	% error/SIE
1	6.8400	6.9575	6.8777	0.5512
2	8.3286	8.6346	8.4725	1.7278
3	8.4905	8.7767	8.6374	1.7302
4	10.2959	10.7226	10.5005	1.9872

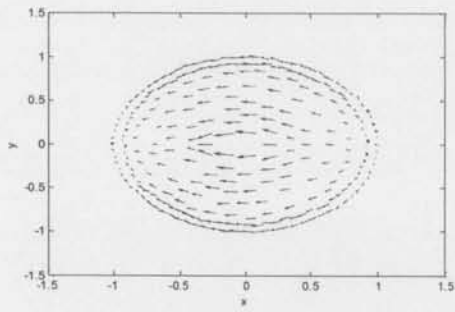
จากผลการคำนวณที่ได้เมื่อเปรียบเทียบกับระเบียบวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ผลที่ได้จากระเบียบวิธีไร้เมชมีความใกล้เคียงกับผลที่ได้จากบทความอ้างอิงมากกว่าซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับบทความอ้างอิงผลที่ได้มีความใกล้เคียงกัน

### 3.2.6 ท่อนำคลื่นแบบโคแอกเซียล(coaxial)

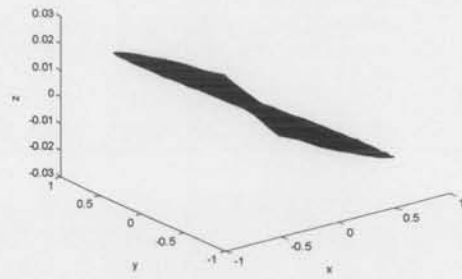


รูปที่ 3.16 โครงสร้างภาคตัดขวางของท่อนำคลื่นแบบโคแอกเซียล

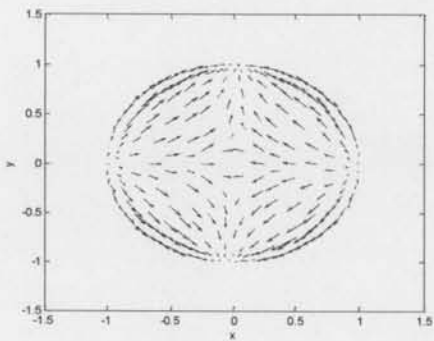




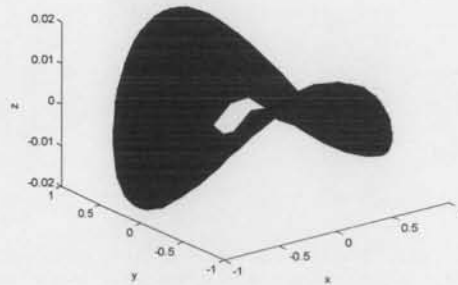
ก.โหมด  $TE_0$  สนามแม่เหล็กตามขวาง



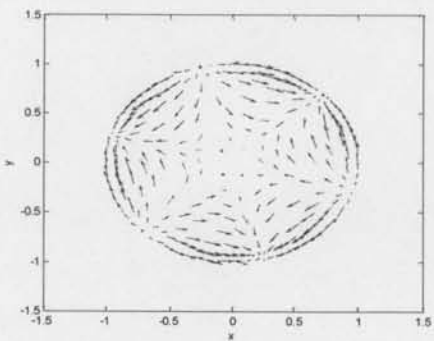
ข.โหมด  $TE_1$  สนามแม่เหล็กตามยาว



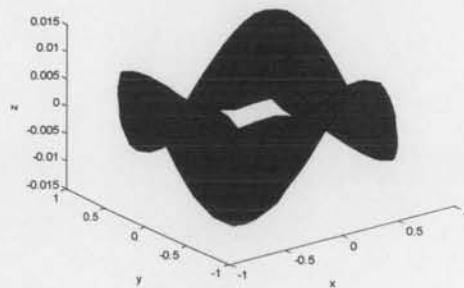
ค.โหมด  $TE_2$  สนามแม่เหล็กตามขวาง



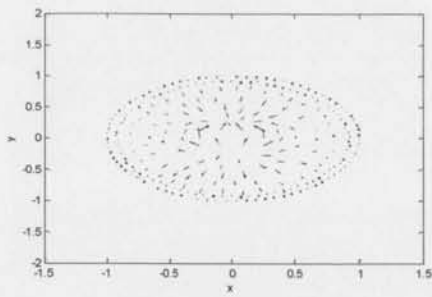
ง.โหมด  $TE_2$  สนามแม่เหล็กตามยาว



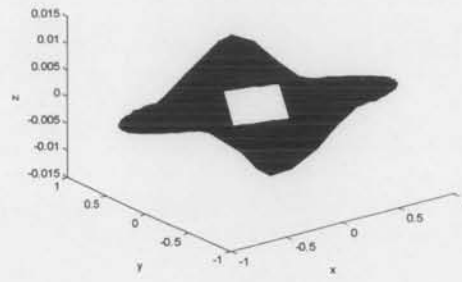
จ.โหมด  $TE_3$  สนามแม่เหล็กตามขวาง



ฉ.โหมด  $TE_3$  สนามแม่เหล็กตามยาว

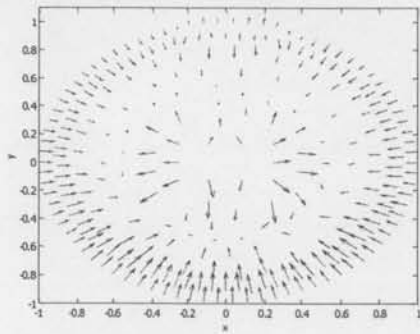


ช.โหมด  $TE_4$  สนามแม่เหล็กตามขวาง

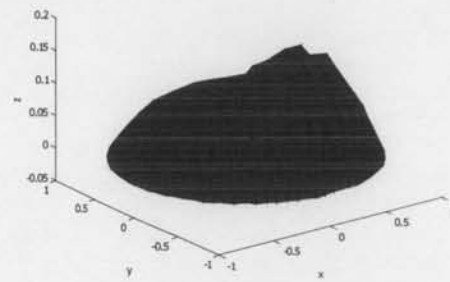


ซ.โหมด  $TE_4$  สนามแม่เหล็กตามยาว

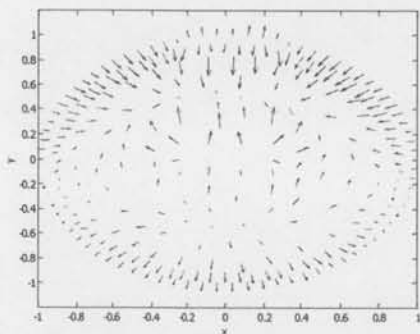
รูปที่ 3.17 แบบรูปสนามแม่เหล็กของท่อนำคลื่นแบบโคแอกเซียลกรณี TE โหมด



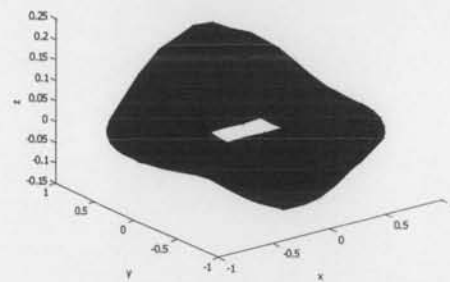
ก.โหมด  $TM_1$  สนามไฟฟ้าตามขวาง



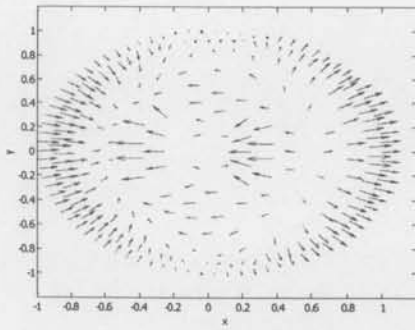
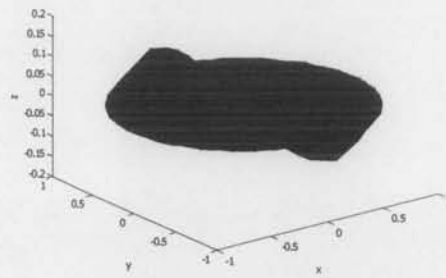
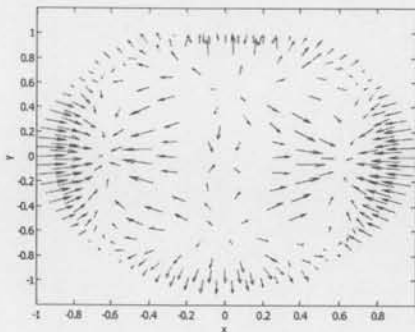
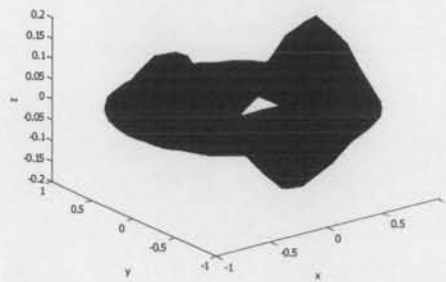
ข.โหมด  $TM_1$  สนามไฟฟ้าตามยาว



ค.โหมด  $TM_2$  สนามไฟฟ้าตามขวาง



ง.โหมด  $TM_2$  สนามไฟฟ้าตามยาว

จ. โหมด  $TM_3$  สนามไฟฟ้าตามขวางฉ. โหมด  $TM_3$  สนามไฟฟ้าตามยาวข. โหมด  $TM_4$  สนามไฟฟ้าตามขวางค. โหมด  $TM_4$  สนามไฟฟ้าตามยาว

รูปที่ 3.18 แบบรูปสนามไฟฟ้าของท่อนำคลื่นแบบโคแอกเซียลกรณี TM โหมด

ตารางที่ 3.11 เปรียบเทียบผลการคำนวณเลขคลื่นตัดของท่อนำคลื่นแบบโคแอกเซียล ที่ได้จากวิทยานิพนธ์นี้กับผลในบทความอ้างอิงกรณี  $TE$  mode เมื่อใช้ฟังก์ชันรูปร่างแบบ MLS

โหมด	SIE	FEM	MLS	% error/SIE
1	1.7407	1.7569	1.7465	0.3332
2	3.0411	3.0534	3.0503	0.3025
3	4.2199	4.2663	4.2031	0.3981
4	4.6451	4.8314	4.7573	2.4154

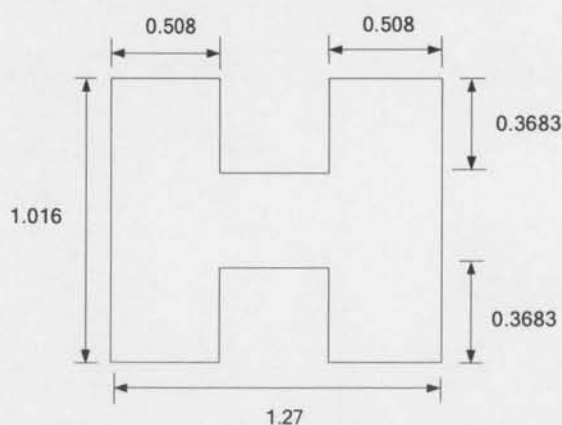
จากผลการคำนวณที่ได้เมื่อเปรียบเทียบกับระเบียบวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ผลที่ได้มีความใกล้เคียงกับบทความอ้างอิงมากกว่าและเมื่อเปรียบเทียบกับบทความอ้างอิงผลที่ได้มีความใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 3.12 เปรียบเทียบผลการคำนวณเลขคลื่นตัดของท่อนำคลื่นแบบ โคแอกเซียล ที่ได้จากวิทยานิพนธ์นี้กับผลในบทความอ้างอิงกรณี *TM mode* เมื่อใช้ฟังก์ชันรูปร่างแบบ MLS

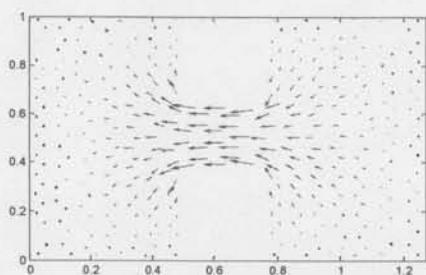
โมด	SIE	FEM	MLS	% error/SIE
1	3.8911	4.1220	4.0382	3.7804
2	4.1666	4.2523	4.2293	1.5048
3	4.4450	4.6057	4.5777	2.9854
4	5.2645	5.3795	5.2311	0.6344

จากผลการคำนวณผลที่ได้เมื่อเปรียบเทียบกับระเบียบวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ผลที่ได้มีความใกล้เคียงกับบทความอ้างอิงมากกว่าและเมื่อเปรียบเทียบกับบทความอ้างอิงผลที่ได้มีความใกล้เคียงกันเมื่อโมดสูงขึ้น

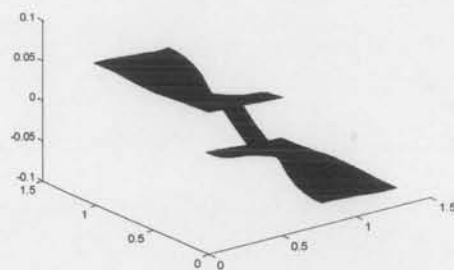
### 3.2.7 ท่อนำคลื่นแบบสั้นคู่



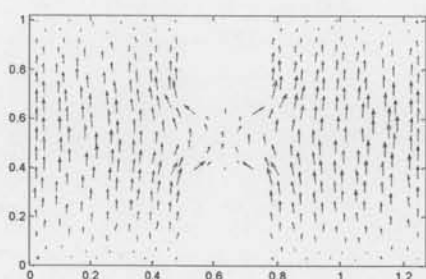
รูปที่ 3.19 โครงสร้างภาคตัดขวางของท่อนำคลื่นแบบ สั้นคู่



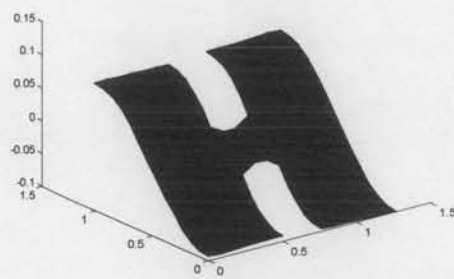
ก. โหมด  $TE_1$  สนามแม่เหล็กตามขวาง



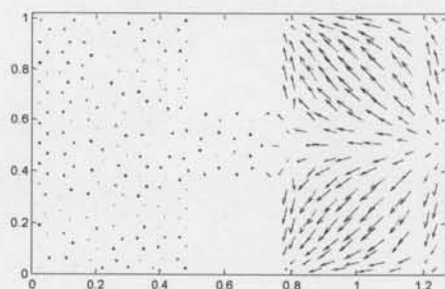
ข. โหมด  $TE_1$  สนามแม่เหล็กตามยาว



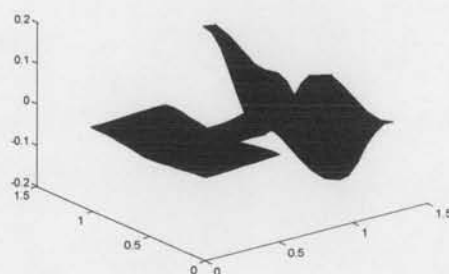
ค. โหมด  $TE_2$  สนามแม่เหล็กตามขวาง



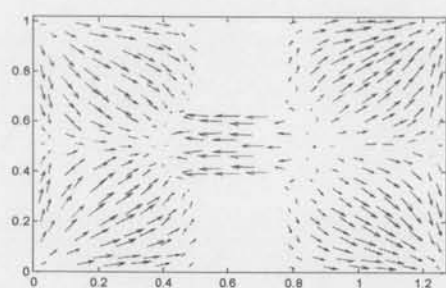
ง. โหมด  $TE_2$  สนามแม่เหล็กตามยาว



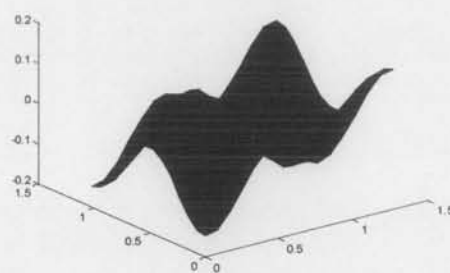
จ. โหมด  $TE_3$  สนามแม่เหล็กตามขวาง



ฉ. โหมด  $TE_3$  สนามแม่เหล็กตามยาว

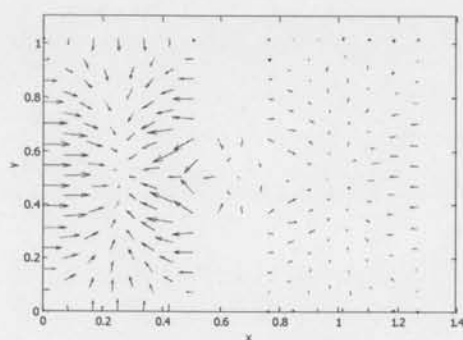


ช.โหมด  $TE_4$  สนามแม่เหล็กตามขวาง

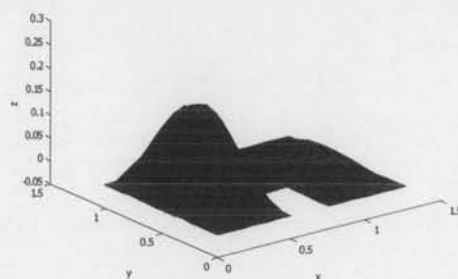


ซ.โหมด  $TE_4$  สนามแม่เหล็กตามยาว

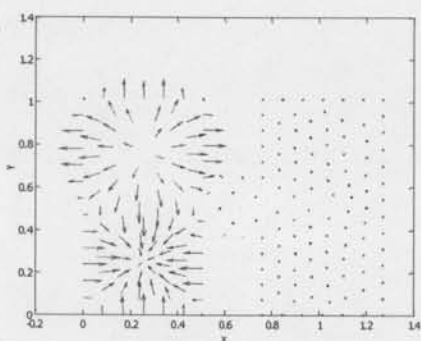
รูปที่ 3.20 แบบรูปสนามแม่เหล็กของท่อนำคลื่นมีสันแบบคู่กรณี TE โหมด



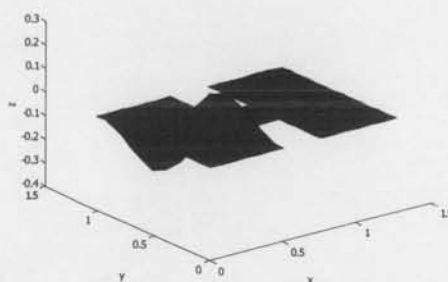
ก.โหมด  $TM_1$  สนามไฟฟ้าตามขวาง



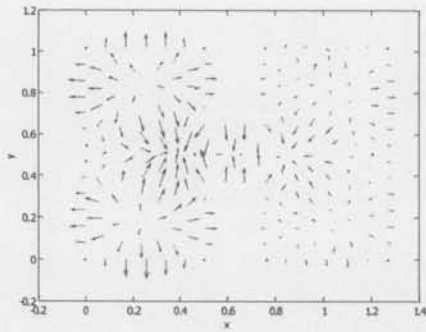
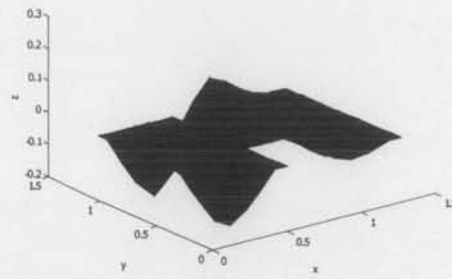
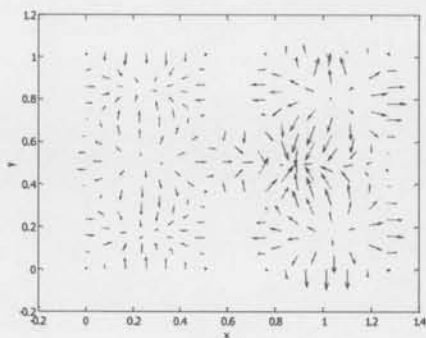
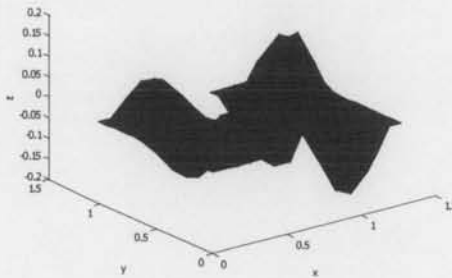
ข.โหมด  $TM_1$  สนามไฟฟ้าตามยาว



ค.โหมด  $TM_2$  สนามไฟฟ้าตามขวาง



ง.โหมด  $TM_2$  สนามไฟฟ้าตามยาว

จ. โหมด  $TM_3$  สนามไฟฟ้าตามขวางข. โหมด  $TM_3$  สนามไฟฟ้าตามยาวช. โหมด  $TM_4$  สนามไฟฟ้าตามขวางซ. โหมด  $TM_4$  สนามไฟฟ้าตามยาวรูปที่ 3.21 แบบรูปสนามไฟฟ้าของท่อนำคลื่นมีสันแบบคู่กรณี  $TM$  โหมด

ตารางที่ 3.13 เปรียบเทียบผลการคำนวณเลขคลื่นตัดของท่อนำคลื่นแบบ coaxial ที่ได้จากวิทยานิพนธ์นี้กับผลในบทความอ้างอิงกรณี  $TE$  mode เมื่อใช้ฟังก์ชันรูปร่างแบบ MLS

โหมด	FD-SIC	FEM	MLS	% error/FD
1	1.434	1.4686	1.4886	3.8075
2	3.168	3.1817	3.1849	0.5335
3	6.192	6.2548	6.2129	0.3375
4	6.705	6.7895	6.7434	0.5727

จากผลการคำนวณที่ได้เมื่อเปรียบเทียบกับบทความอ้างอิงผลที่ได้มีความใกล้เคียงกันเมื่อโหมดสูงขึ้น



### 3.3 สรุปผลการคำนวณ

ในบทนี้ได้นำเสนอระเบียบวิธีอีลีเมนต์ฟรีกาเลอร์คินเพื่อใช้คำนวณหาเลขคลื่นตัดสี่โหมดแรกโดยทดลองคำนวณโดยใช้ 7 ตัวอย่างซึ่งผลการจากผลการคำนวณที่ได้ผลที่ได้จะได้ค่าความผิดพลาดน้อยกว่าที่ได้จากการคำนวณโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์เมื่อใช้จำนวนโนดในการคำนวณที่ใกล้เคียงกัน โดยในที่นี้ในกรณีที่คำนวณเลขคลื่นตัดใน TM โหมดได้ใช้ระเบียบวิธีฟินอลตี้อีกเพื่อกำหนดเงื่อนไขขอบเขตซึ่งผลที่ได้เมื่อเปรียบเทียบกับบทความอ้างอิงและจากระเบียบวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ซึ่งกำหนดเงื่อนไขขอบเขตโดยการแทนค่าที่โนดโดยตรงซึ่งผลที่ได้มีค่าใกล้เคียงกัน