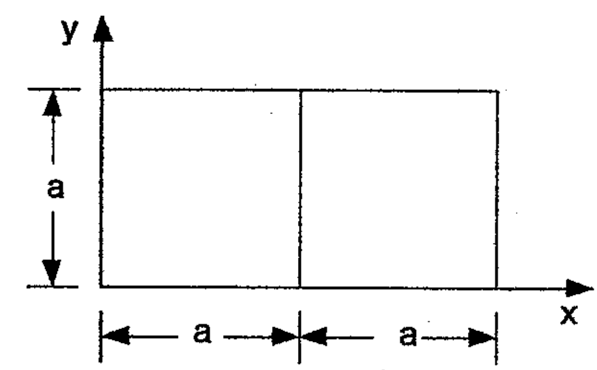
บทที่ 4

ผลการทดลอง และ ผลการวิเคราะห์

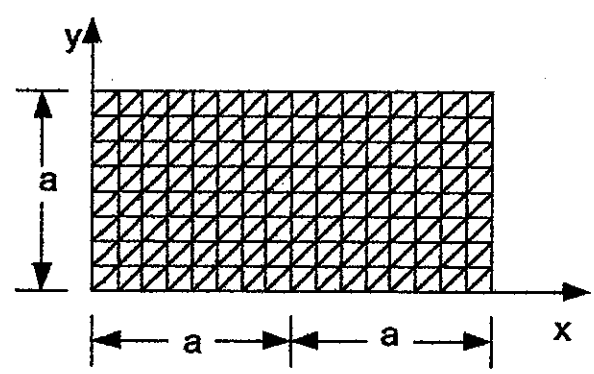
การวิเคราะห์ท่อนำคลื่นของวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์โดยใช้สนามแม่เหล็ก 3 องค์ประกอบที่กล่าวมาข้างต้นนั้น

4.1 ท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยไดอิเล็กตริก

พิจารณาท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยไดอิเล็กตริกที่มีขนาดเป็น $2a \times a$ ล้อมรอบด้วยตัวนำไฟฟ้าสมบูรณ์แบบและครึ่งหนึ่งของท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยไดอิเล็กตริกที่มีสภาพยอมสัมพัทธ์ ε_r และความซาบซึมได้สัมพัทธ์ μ_r เท่ากับ 2.25 และ 1.0 ตามลำดับดังแสดงในรูป4.1

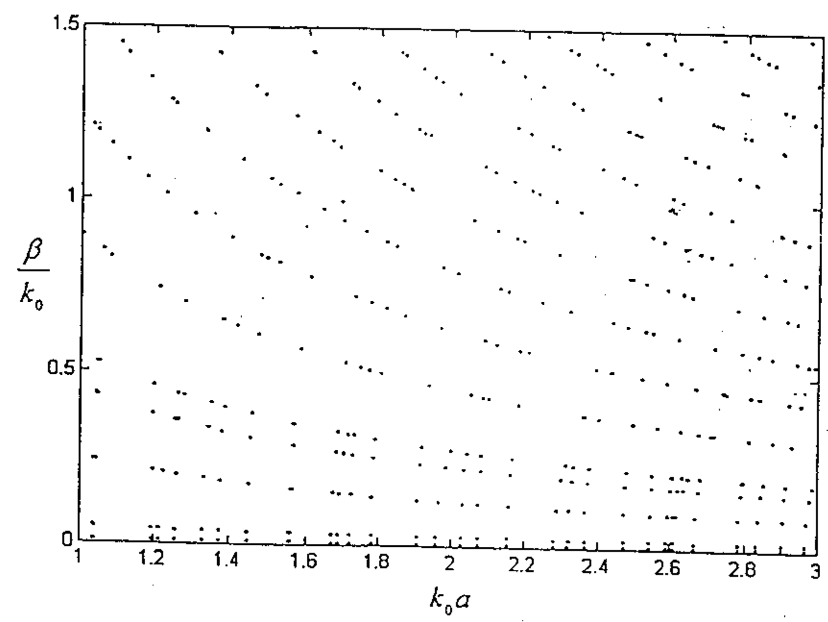


รูป 4.1 ภาคตัดขวางของท่อนำคลื่นบรรจุด้วยไดอิเล็กตริก

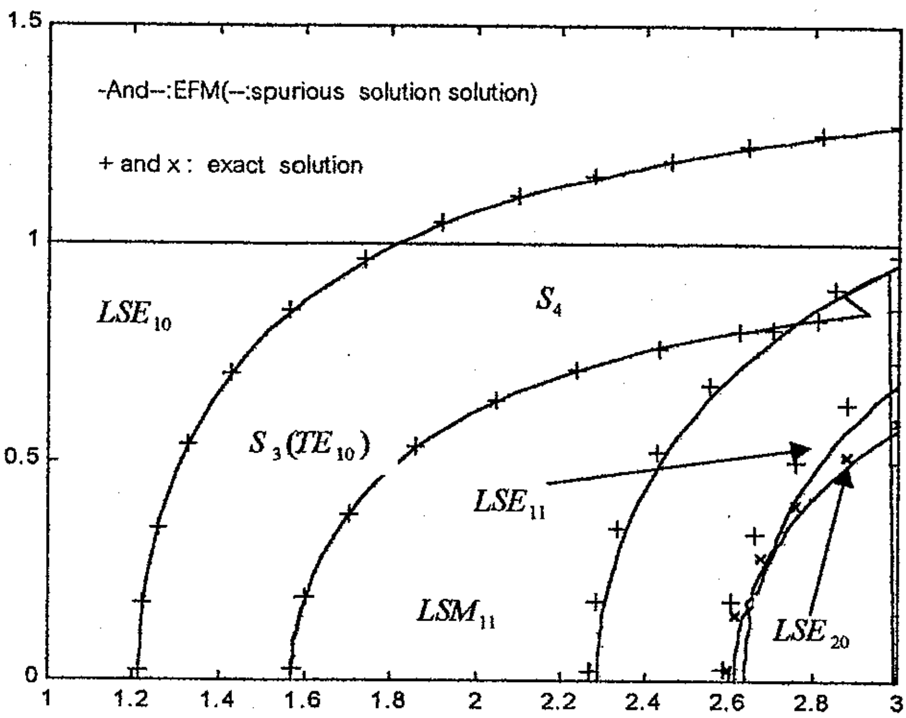


รูป 4.2 การแบ่งอีลีเมนต์บนภาคตัดขวางของท่อนำคลื่นบรรจุด้วยไดอิเล็กตริกออกเป็น 256 อีลีเมนต์ 153 โนด

แบ่งภาคตัดขวางของท่อนำคลื่นออกเป็นสามเหลี่ยมตามหลักของวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ แสดงในรูป 4.2 โดยมีจำนวนอีลีเมนต์เท่า 256 และมีจำนวนโนดเท่ากับ 153 รูป 4.3 แสดงกราฟดิสเพอร์ชันที่ได้จากวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์โดยปราศจากพจน์พีนอลตี (p=0) พบว่าเกิดผลเฉลยปลอมเทียมทำให้ไม่สามารถแยกแยะกับผลเฉลยที่ถูกต้องได้ รูป 4.4 แสดงกราฟกราฟดิสเพอร์ชันที่ใช้สัมประสิทธิ์พีนอลตีเท่ากับ 1 (p=1) เส้นทึบและเส้นประแสดงผลที่ได้จากการคำนวณโดยใช้วิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ สัญลักษณ์ + และ × คือผลเฉลยแม่นตรงที่ได้จากวิธีเชิงวิเคราะห์ (Balanis, 1989)



รูป 4.3 กราฟดิสเพอร์ชันที่ได้จากวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามแม่เหล็ก 3 องค์ประกอบของท่อนำคลื่นบรรจุด้วยไดอิเล็กตริก เมื่อปราศจากพจน์พีนอลตี (p=0)



รูป 4.4 กราฟดิสเพอร์ชันที่ได้จากวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามแม่เหล็ก 3องค์ประกอบของท่อนำคลื่นบรรจุด้วยไดอิเล็กตริกเมื่อ p= 1 เทียบกับผลเฉลยแม่นตรงที่ได้จากวิธีเชิงวิเคราะห์

จากรูป 4.4 พบว่าโมดมูลฐาน LSE_{10} สอดคล้องกับผลเฉลยแม่นตรงที่ได้จากวิธีเชิงวิเคราะห์ ส่วนโมด LSM_{11}, LSE_{11} และ LSE_{20} ต่างจากผลเฉลยแม่นตรงไม่มากนัก อย่างไรก็ตามโมดเหล่านี้จะมีค่าสอดคล้องกับผลเฉลยแม่นตรงมากขึ้นเมื่อเพิ่มจำนวนอีลีเมนต์ให้สูงขึ้น

จากรูป 4.4 นอกจากโมดที่ถูกต้องที่วิเคราะห์ได้แล้ว พบว่ามีผลเฉลยปลอมเทียมซึ่งแสดงเป็นเส้นประออกมาด้วยผลเฉลยปลอมเทียมดังกล่าวนี้คือผลเฉลยปลอมเทียม S_3 และ S_4 ผลเฉลยปลอมเทียม S_3 สอดคล้องกับสมการ (2.19) และสมมูลกับโนด TE_{10} ของท่อนำคลื่นกลวงที่ที่มีภาคตัดขวางเท่ากัน ซึ่งโมด TE_{10} มีความถี่ตัดเป็น (Balanis ,1989)

$$k_a a = p\frac{\pi}{2} \tag{4.1a}$$

$$= (1)\frac{\pi}{2} \approx 1.571 \tag{4.1b}$$

ผลเฉลยปลอมเทียม S_3 นี้จะปรากฏในบริเวณ $\beta/k_0 \subset 1$ เท่านั้น

นอกจากผลเฉลยปลอมเทียม S_3 ที่ Koshiba และคณะได้กล่าวถึงแล้ว ผู้ทำโครงงานยังตรวจพบผลเฉลยชนิดใหม่ที่เพิ่มขึ้นมาด้วย โดยผู้ทำโครงงานเรียกผลเฉลยปลอมเทียมชนิดใหม่นี้ว่า ผลปลอมเทียม S_4 ผู้ทำโครงงานได้ทำการตรวจสอบคุณลักษณะที่สำคัญของผลเฉลยปลอมเทียม S_4 เปรียบเทียบกับโมดมูลฐาน (LSE_{10}) ที่ตำแหน่ง x = 1.125a , y = 0.375a ได้แสดงในตาราง 4.1

จากข้อมูลที่ได้ในตาราง 4.1 ผลเฉลยปลอมเทียม S_4 ที่เกิดขึ้นสามารถอธิบายได้ตามขั้นตอนและดังสมการต่อไปนี้

เมื่อพิจารณาจุดต่ำสุดของสมการ (2.17) จะได้สมการต่อไปนี้

$$\begin{aligned}&\iint_{\Omega} \delta H^* \cdot \left[\nabla \times \left([\varepsilon_r]^{-1} \nabla \times H\right) - p^2 \nabla(\nabla \cdot \mu_R H) - k_0^2 \mu_r H\right] d\Omega \\ &- \int_{r} \delta H^* \cdot \left[n \times \left([\varepsilon_r]^{-1} \nabla \times H\right) - p^2 (\nabla \cdot \mu H) n\right] d\Gamma = 0\end{aligned} \tag{4.2}$$

โดยที่ n คือเวกเตอร์หนึ่งหน่วยในทิศทางตั้งฉากกับผนังท่อนำคลื่น

สมการออยเลอร์ (Euler equation) ของสมการ (4.2) คือ

$$\nabla \times \left([\varepsilon_r]^{-1} \nabla \times H\right) - p^2 \nabla\left(\nabla \cdot \mu_r H\right) - k_0^2 \mu_r H = 0 \tag{4.3}$$

เนื่องจาก $\nabla \times H$ ของผลเฉลยปลอมเทียม S_4 มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับที่ได้จากโมดมูลฐาน (LSE_{10}) สมการ4.3จึงเขียนได้เป็น

$$p^2 \nabla(\nabla \cdot \mu_r \mathrm{H}) + k_0^2 \mu_r \mathrm{H} = 0 \tag{4.4}$$

ผลเฉลย	H	$\nabla\times\mathrm{H}$	$\nabla\cdot\mu_0\mathrm{H}$	$\nabla_t\cdot\mu_0\mathrm{H}$ $\nabla_t=\frac{\partial}{\partial x}+\frac{\partial}{\partial y}$	$\nabla_t\mathrm{H}_z$
โมด LSE_{10}	$-0.4531a_x$ $+1.1306\times10^{-4}a_z$ $-j0.3731a_z$	$j(0.0015a_x$ $+0.8990a_y$ $-j0.0016a_z)$	$0.0278\mu_0$	$0.4009\varpi_0$	$j(-0.4459a_x$ $+0.0014a_y)$
ผลปลอมเทียม S_4	$-2.1714\times10^{-16}a_x$ $-1.4385\times10^{-14}a_y$ $+1.0000a_z$.	$j10^{-14}$ $(1.4925a_x$ $-2.7316a_y$ $+j4.1637a_x)$	$1.0000\mu_0$	10^{-15} $5.4522\mu_0$	$j10^{-14}$ $(2.7534a_x$ $+2.9310a_y)$

ตาราง4.1 คุณลักษณะของผลเฉลยปลอมเทียม S_4 และโมดมูลฐาน (LSE_{10}) ที่คำนวณได้จากวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ $\beta a=1.0$ ตำแหน่ง $x=1.125a, y=0.375a$ ของท่อนำคลื่นบรรจุด้วยไดอิเล็กตริก เมื่อทำการแบ่งอีลีเมนต์ดังแสดงในรูป 4.2 โดยที่สัมประสิทธิ์พื้นอลตีเท่ากับ 1 (กำหนดให้ขนาดสูงสุดของสนามแม่เหล็กที่โนดบนภาคตัดขวางของท่อนำคลื่นมีค่าเท่ากับ 1)

ตัวดำเนินการเดล (del operator) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปองค์ประกอบตามขวางและองค์ประกอบในแนวแกน z ได้ดังนี้

$$\nabla=\nabla_t-j\beta a_z \tag{4.5}$$

เมื่อใช้ความสัมพันธ์ในสมการ (4.5) สมการ (4.4) สามารถเขียนได้เป็น

$$p^2\nabla(\nabla_t\cdot\mu_r\mathrm{H})-p^2\nabla(j\beta\mu_rH_z)+k_0^2\mu_r\mathrm{H}=0 \tag{4.6}$$

จากตาราง 4.1 ค่าของ H_x, H_y และ $\nabla_t \cdot \mu_0 \mathrm{H}$ ของผลเฉลยปลอมเทียม S_4 มีค่าน้อยมากเทียบกับที่ได้จากโมดมูลฐาน สมการ (4.6) จึงเขียนได้ดังนี้

$$-p^2(j\beta\mu_r)(\nabla_t H_z - j\beta H_Z a_z) + k_0^2 \mu_r H_Z a_z = 0 \tag{4.7}$$

จากตาราง 4.1 ค่าของ $\nabla_t H_z$ ของผลเฉลยปลอมเทียม S_4 มีค่าน้อยมากเทียบกับที่ได้จากโมดมูลฐานสมการ (4.7) จึงเขียนได้เป็น

$$[(\frac{\beta}{k_0})^2 (\frac{1}{p})^2]\mu_r H_z = 0 \tag{4.8}$$

ผลเฉลยของสมการ (4.8) คือ

$$\frac{\beta}{k_0} = \pm\frac{1}{p} \tag{4.9}$$

เมื่อค่า β ที่เป็นบวกหมายถึงการแพร่กระจายในทิศ +z และค่า β ที่เป็นลบหมายถึงการแพร่กระจายในทิศ –z สำหรับในกรณีตัวอย่างปัญหานี้สัมประสิทธิ์พีนอลตีถูกกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 1 เพราะฉะนั้นเมื่อพิจารณาเฉพาะการแพร่กระจายในทิศ +z ผลเฉลยปลอมเทียม S_4 จะปรากฏที่ $\beta/\ k_0 = 1$ ซึ่งสอดคล้องกับผลการคำนวณในกราฟดิสเพอร์ชันรูป 4.4

จากที่กล่าวมาพบว่าผลเฉลยปลอมเทียม S_3 เกิดขึ้นในช่วง $\beta/\ k_0 < 1/\ p$ และผลเฉลยปลอมเทียม S_4 เกิดขึ้นที่ $\beta/\ k_0 = 1/\ p$ เพราะฉะนั้นจึงสรุปได้ว่าผลเฉลยปลอมเทียมทั้งหมดปรากฏในบริเวณสมการ (4.10) เท่านั้น

$$\frac{\beta}{k_0} \le \frac{1}{p} \tag{4.10}$$

บริเวณที่เกิดผลเฉลยปลอมเทียม S_3 และ S_4 สามารถกำหนดได้จากสัมประสิทธิ์พีนอลตี กล่าวคือบริเวณที่เกิดผลเฉลยปลอมเทียม S_3 จะแคบลงเมื่อสัมประสิทธิ์พีนอลตีมีค่าสูงขึ้น แต่การเพิ่มสัมประสิทธิ์พีนอลตีให้สูงขึ้น ทำให้ความแม่นของผลเฉลยที่ได้ลดลงไปด้วย ตัวอย่างของค่า $\beta/\ k_0$ และขนาดความผิดพลาดที่ $k_0 a = 3.0$ จากโมดมูลฐาน LSE_{10}, LSM_{11} , LSE_{11}

และ LSE_{20} ที่คำนวณจากวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ เมื่อทำการแบ่งอีลีเมนต์ดังแสดงในรูป 4.2 โดยที่สมดสัมประสิทธิ์พีนอลตีเท่ากับ 1 และ 1/ 0.75 ตามลำดับ แสดงในตาราง 4.2

โมด	ผลเฉลยแม่นตรงของ β/k_0 ที่ $k_0a = 3.0$	β/k_0 ที่ $k_0a = 3.0$ จากวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์		ขนาดความผิดพลาดของ β/k_0 ที่ $k_0a = 3.0$ จากวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์	
		$p=1$	$p=1/0.75$	$p=1$	$p=1/0.75$
LSE_{10}	1.275757	1.27243	1.270253	0.260%	0.431%
LSM_{11}	0.971538	0.95392	0.946630	1.813%	2.564%
LSE_{11}	0.728649	0.68084	0.662076	6.561%	9.137%
LSM_{20}	0.593897	0.57572	0.571497	3.060%	3.772%

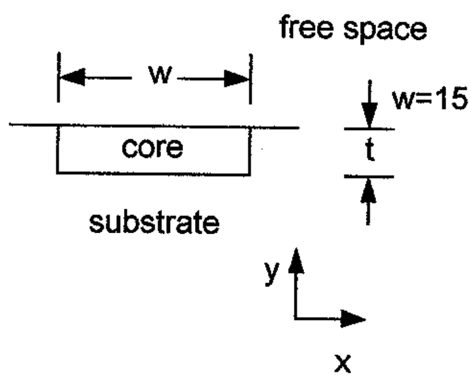
ตาราง 4.2 ตัวอย่างของค่า $\beta/\ k_0$ ที่ $k_0a = 3.0$ ที่คำนวณได้จากวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์และวิธีเชิงวิเคราะห์รวมขนาดความผิดพลาด เมื่อทำการแบ่งอีลีเมนต์ดังแสดงในรูป 2.2 โดยที่

สัมประสิทธิ์พีนอลตีเท่ากับ 1 และ 1/ 0.75

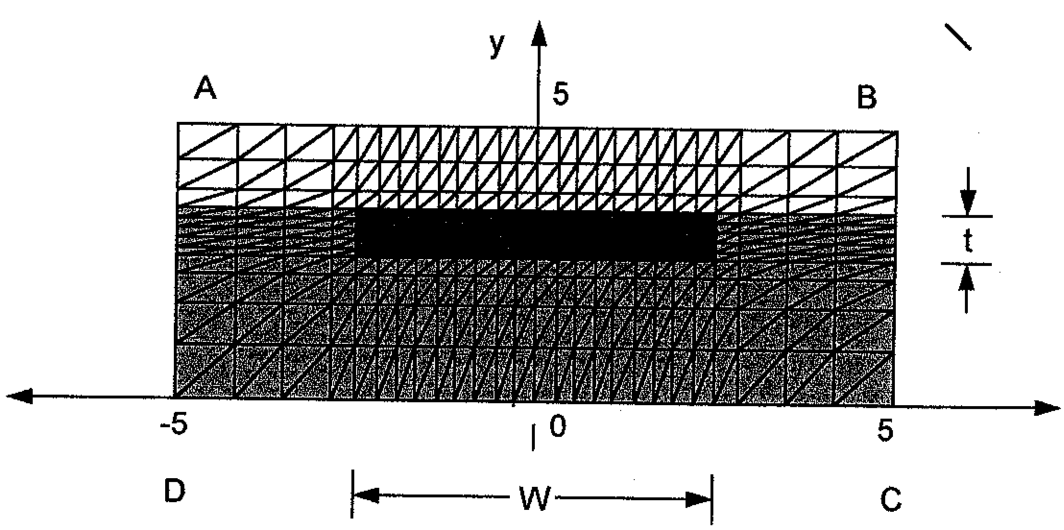
จากผลการวิเคราะห์ที่ได้แสดงในตารางที่ 4.2 แสดงการเปรียบเทียบค่า $\beta/\ k_0$ ที่ $k_0a = 3.0$ ที่คำนวณได้จากวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์และวิธีเชิงวิเคราะห์รวมถึงขนาดความผิดพลาด โดยที่ พิจารณาค่าดังกล่าวที่ โมดมูลฐาน 4 โมด และได้ผลดังตารางที่ 4.2 แสดงให้เห็นว่า ค่าความผิดพลาดอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามแม่เหล็ก 3 องค์ประกอบ ที่เสนอโดย Koshiba และคณะ สามารถวิเคราะห์ท่อนำคลื่นแบบไอโซทรอปิกไม่เอกพันธุ์ได้ แต่ต้องมีการควบคุมการปรากฏของผลเฉลยปลอมเทียมด้วยพจน์พีนอลตี

4.2 ท่อนำแสงแบบฝังในซับสเตรท

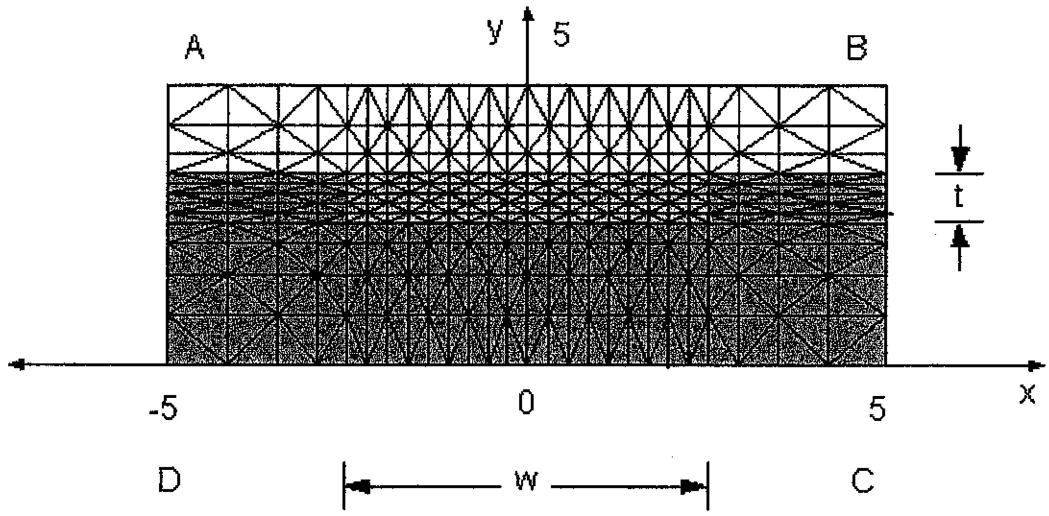
พิจารณาท่อนำแสงแบบฝังในซับสเตรท ที่ประกอบด้วยแกน (core) ฝังในซับสเตรท (substrate)ซึ่งเป็นส่วนรองรับแกนอยู่ด้านล่างและด้านบนของแกนเป็นอากาศว่าง ดังแสดงในรูป 4.5 การศึกษาในส่วนนี้จะแบ่งเป็น 2 กรณีคือ กรณีที่ท่อนำแสงเป็นแอนไอโซทรอปิกแนวทแยง และกรณีที่ท่อนำแสงเป็นแอนไอโซทรอปิกตามขวาง ซึ่งแต่ละกรณีมีรายละเอียดดังนี้



รูป 4.5 ภาคตัดขวางท่อนำแสงแบบฝังในซับสเตรท



รูป 4.6 การแบ่งอีลีเมนต์ภาคตัดขวางท่อนำคลื่นแบบที่ 1 ออกเป็น 624 อีลีเมนต์ 351 โนด



รูป 4.7 การแบ่งอีลีเมนต์ภาคตัดขวางท่อนำคลื่นแบบที่ 2
ออกเป็น 624 อีลีเมนต์ 351 โนด

กรณีที่ท่อนำแสงเป็นแอนไอโซทรอปิกแนวทแยง (Koshiba, 1992)

พิจารณาท่อนำแสงแบบฝังในซับสเตรทที่ มีภาคตัดขวางดังแสดงในรูป 4.5 แกนและซับเสตรทของท่อนำคลื่นนี้เป็นแอนไอโซทรอปิกเนกาทิฟยูนิแอกเชียล (negative uniaxial anisotropic) ที่แกนทางแสงขนานกับแกน x สภาพยอมสัมพัทธ์และความซาบซึมได้สัมพัทธ์ของแกนมีค่าดังนี้

$$[\varepsilon_r] = \begin{bmatrix} 2.222^2 & 0 & 0 \\ 0 & 2.3129^2 & 0 \\ 0 & 0 & 2.3129^2 \end{bmatrix} \qquad (4.11)$$

$$\mu_r = 1.0 \qquad (4.12)$$

สภาพยอมสัมพัทธ์และความซาบซึมได้สัมพัทธ์ของซับสเตรทมีค่าดังนี้

$$[\varepsilon_r] = \begin{bmatrix} 2.20^2 & 0 & 0 \\ 0 & 2.29^2 & 0 \\ 0 & 0 & 2.29^2 \end{bmatrix} \tag{4.13}$$

$$\mu_r = 1.0 \tag{4.14}$$

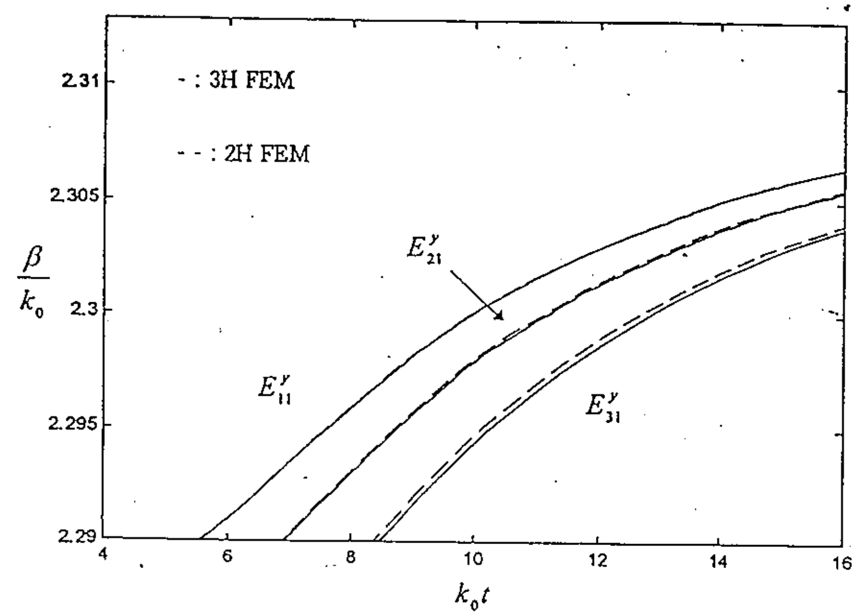
แบ่งภาคตัดขวางของท่อนนำคลื่นออกเป็นสามเหลี่ยม โดยมีจำนวนอีลีเมนต์เท่ากับ 624 มีจำนวนโนดเท่ากับ 351 ดังแสดงใน 4.6 และ 4.7 ตามลำดับ โดยที่ขอบเขต AB,BC,CD และ DA คือขอบเขตเสมือน (virtual boundary) ซึ่งสมมุติให้เป็นตัวนำไฟฟ้าสมบูรณ์แบบ

เพื่อไม่ให้มีผลเฉลยปลอมเทียม S_3 และ S_4 ในบริเวณที่ถูกนำทาง (guided region) ของกราฟดิสเพอร์ชัน สัมประสิทธิ์พีนอลตีต้องสอดคล้องกับสมการ

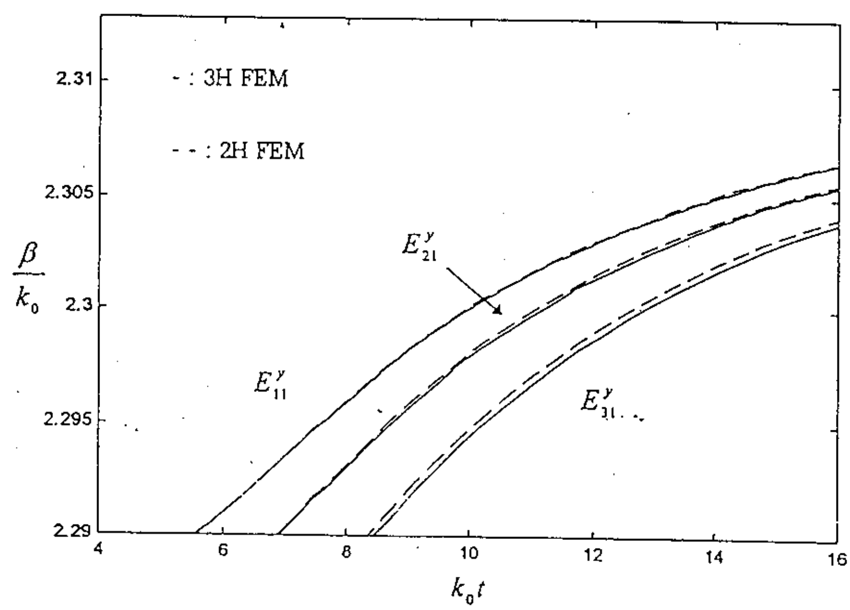
$$p > 1/n_{g,\min} \tag{4.15}$$

เมื่อ $n_{g,\min}$ คือดัชนีหักเหที่มีค่ามากที่สุดในซับสเตรท ด้วยเหตุนี้สัมประสิทธิ์พีนอลตีถูกกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 1/2.289

เนื่องจากท่อนำแสงในกรณีนี้ ไม่สามารถหาผลเฉลยแม่นตรงจากวิธีวิเคราะห์ได้ จึงจำเป็นต้องตรวจสอบความถูกต้องโดยเทียบผลคำนวณที่ได้กับผลคำนวณที่ได้จากวิธีอื่น ผลการคำนวณที่นำมาเปรียบเทียบคือ ผลการคำนวณที่ได้จากวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามแม่เหล็กตามขวาง 2 องค์ประกอบ (Hayata,Eguchi และ Koshiba,1986) รูป 4.8 (ก) และ (ข) แสดงผลการคำนวณกราฟดิสเพอร์ชันที่ได้จากวิธีไฟไนอีลีเมนต์เมื่อใช้การแบ่งอีลีเมนต์แบบที่ 1 ดังแสดงในรูป 4.15 และแบบที่ 2 ดังแสดงในรูป 4.16 ตามลำดับ เส้นทึบแสดงผลการคำนวณที่ได้จากวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามแม่เหล็ก 3 องค์ประกอบ เมื่อสัมประสิทธิ์พีนอลตี (p) เท่ากับ 1/2.289 (เพื่อความสะดวกได้กำหนดให้ $p = 1/2.289$) เส้นประแสดงผลการคำนวณที่ได้จากวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามแม่เหล็กตามขวาง 2 องค์ประกอบ



(ก)



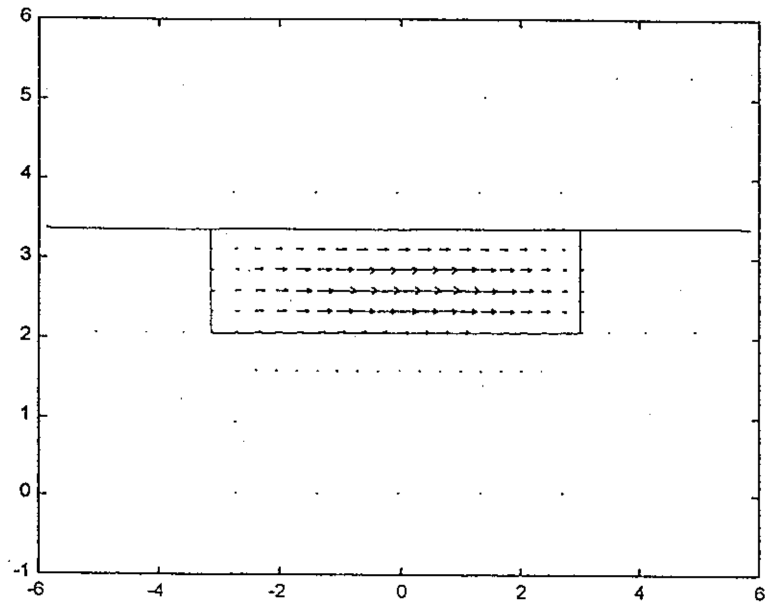
(ข)

รูป 4.8 กราฟดิสเพอร์ชันที่ได้จากวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามแม่เหล็ก 3 องค์ประกอบ เมื่อ $p = 1/2.289$ และที่ได้จากวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามแม่เหล็กตามขวาง 2 องค์ประกอบ ของท่อนำแสงแบบฝังในซับสเตรทที่มีแกนและซับสเตรทเป็นเนกาทิฟยูนิแอกเชียล เมื่อใช้

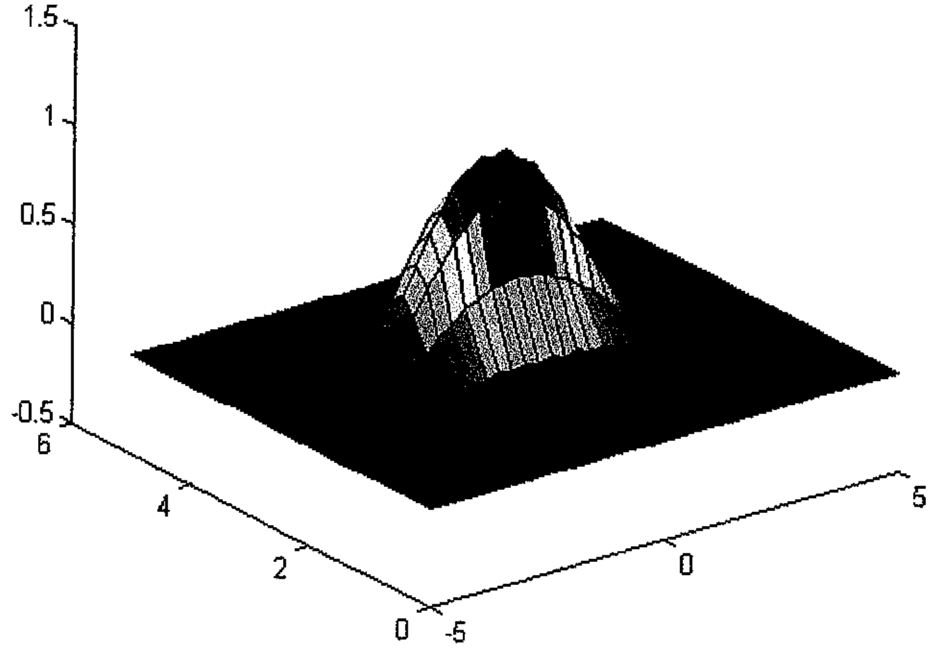
(ก) การแบ่งอีลีเมนต์แบบที่ 1 (ข) การแบ่งอีลีเมนต์แบบที่ 2

จากรูป 4.17 พบว่าโมด 3 อันดับแรกที่เลือกมาแสดงคือโมด E_{11}^{y} ,E_{21}^{y} และ E_{31}^{y} เมื่อ E_{pq}^{y} คือโมดที่มีองค์ประกอบของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าหลักคือ E_{y} และ H_{x} ดัชนีล่าง (subscript) p และ q แทนอันดับ (order) ของโมด ทิศ x และ y ตามลำดับโดย p และ q มีค่าเท่ากับจำนวนจุดสูงสุดหรือต่ำสุด (extrema) ที่เกิดขึ้นในการกระจายขององค์ประกอบหลักในทิศ x และ y ตามลำดับ (Marcuse, 1974; Koshiba, 1992) จะเห็นได้ว่าโมด E_{11}^{y} และ E_{21}^{y} ที่ได้จากวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามแม่เหล็ก 3 องค์ประกอบ และวิธีที่ใช้สนามแม่เหล็กตามขวาง 2 องค์ประกอบทั้งที่ได้จากการแบ่งอีลีเมนต์แบบที่ 1 และแบบที่ 2 ให้ผลเฉลยที่สอดคล้องกัน ส่วนผลการคำนวณที่ได้ในโมด E_{31}^{y} ต่างกันไม่มากนัก แต่อย่างไรก็ตามโมด E_{31}^{y} ที่ได้จากทั้งสองวิธีนี้จะมีค่าสอดคล้องกันมากขึ้น เมื่อใช้จำนวณอีลีเมนต์ที่สูงขึ้น จากรูป 4.17 พบว่าไม่มีการปรากฏของผลเฉลยปลอมเทียม เนื่องจากได้จำกัดให้ผลเฉลยปลอมเทียมเกิดขึ้นในช่วง $\beta/k_0 < 2.289$ ซึ่งบริเวณนี้เป็นบริเวณแผ่พลังงาน (radiation region)

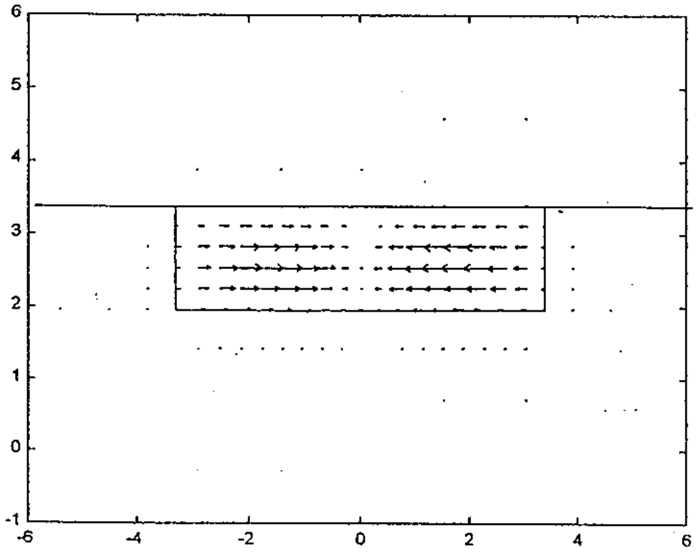
รูป 4.18 และ 4.19 แสดงแบบรูปของสนามแม่เหล็ก H และการกระจายของ H_{x} ในลักษณะ 3 มิติตามลำดับ ที่ $k_0 t = 16.0$ ในโมด E_{11}^{y} ,E_{21}^{y} และ E_{31}^{y} โดยกำหนดให้ขนาดสูงสุดของสนามแม่เหล็กที่โนดบนภาคตัดขวางของท่อนำคลื่นมีค่าเท่ากับ 1



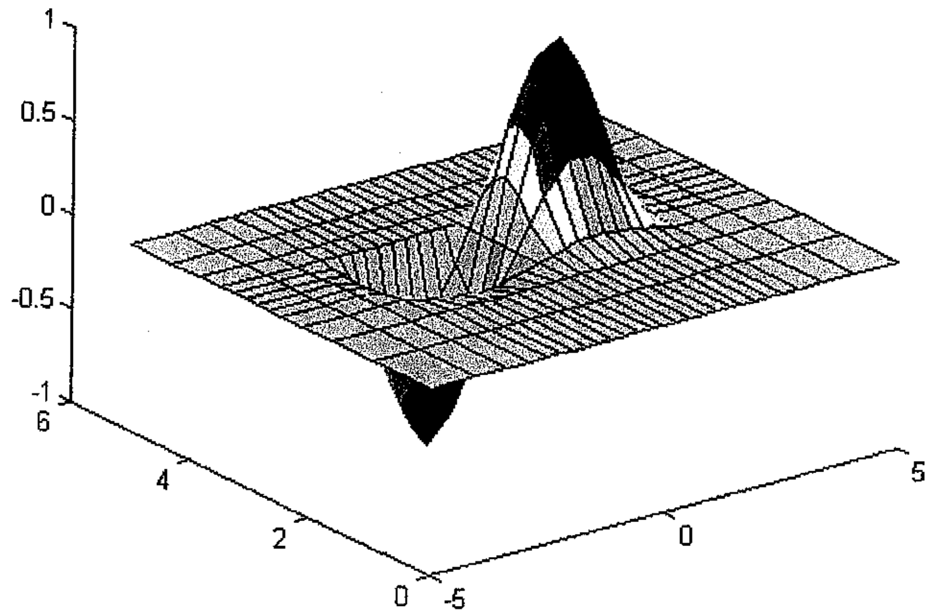
รูป 4.9 แบบรูปของสนามแม่เหล็กที่ $k_0 t = 16.0$ ใน โมด E_{11}^{y} คำนวณจาก
วิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามแม่เหล็ก 3 องค์ประกอบ เมื่อ $p = 1/2.289$ ของท่อนำแสง
แบบฝังในซับสเตรทที่มีแกนและซับสเตรทเป็นเนกาทิฟยูนิแอกเซียลโดยใช้การแบ่งอีลี
เมนต์แบบที่ 1



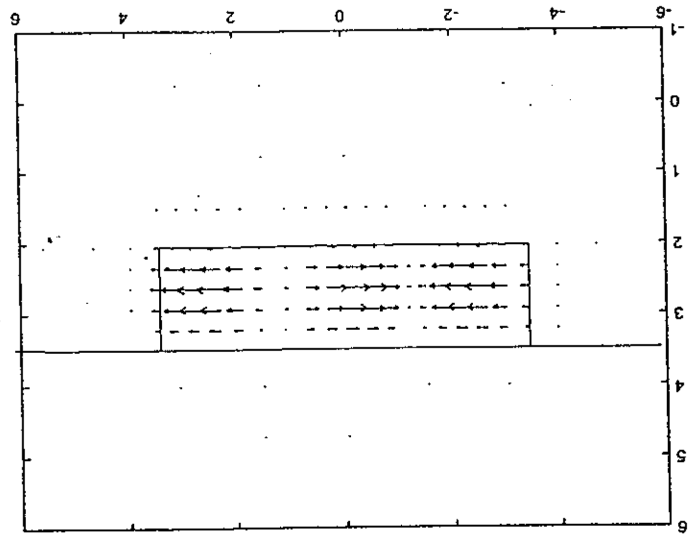
รูป 4.10 แบบรูป 3 มิติของสนามแม่เหล็กที่ $k_0 t = 16.0$ ใน โมด E_{11}^{y} คำนวณจากวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามแม่เหล็ก 3 องค์ประกอบ เมื่อ $p = 1/2.289$ ของท่อนำแสงแบบฝังในซับสเตรทที่มีแกนและซับสเตรทเป็นเนกาทิฟยูนิแอกเซียลโดยใช้การแบ่งอีลีเมนต์แบบที่ 1



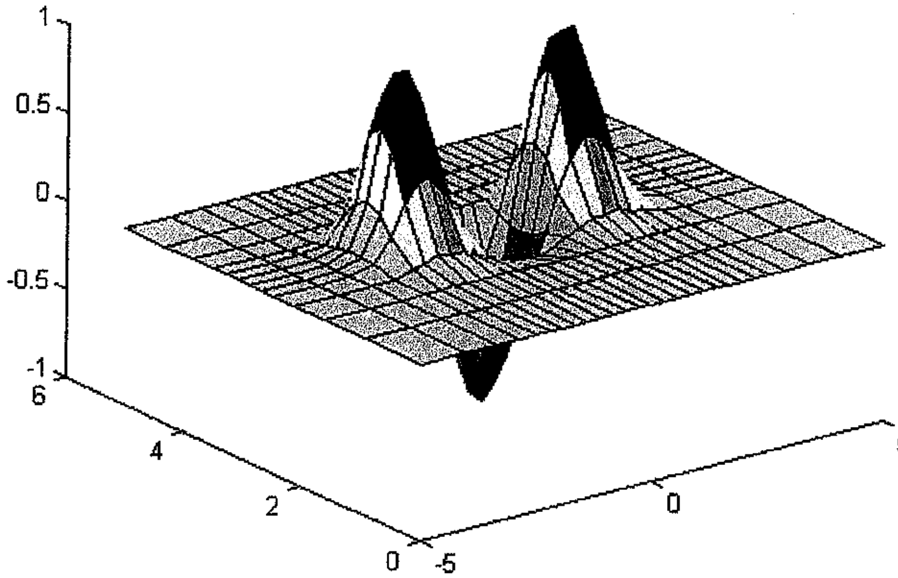
รูป 4.11 แบบรูปของสนามแม่เหล็กที่ $k_0t = 16.0$ ใน โมด E^y_{21} ที่คำนวณจาก
วิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามแม่เหล็ก 3 องค์ประกอบ เมื่อ $p = 1/2.289$ ของท่อนำแสง
แบบฝังในซับสเตรทที่มีแกนและซับสเตรทเป็นเนกาทิฟยูนิแอกเซียลโดยใช้การแบ่งอีลี
เมนต์แบบที่ 1



รูป 4..12 แบบรูป 3 มิติของสนามแม่เหล็กที่ $k_0t = 16.0$ ใน โมด E_{21}^{y} ที่คำนวณจาก วิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามแม่เหล็ก 3 องค์ประกอบ เมื่อ $p = 1/2.289$ ของท่อนำแสงแบบฝังในซับสเตรทที่มีแกนและซับสเตรทเป็นเนกาทิฟยูนิแอกเซียล โดยใช้การแบ่งอีลีเมนต์แบบที่ 1



รูป 4.13 แบบรูปของสนามแม่เหล็กที่ $k_0 t = 16.0$ ใน) โมด E^y_{31} ที่ คำนวณจาก วิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามแม่เหล็ก 3 องค์ประกอบ เมื่อ $p = 1/2.289$ ของท่อนำแสงแบบฝังในซับสเตรทที่มีแกนและซับสเตรทเป็นเนกาทิฟยูนิแอกเซียลโดยใช้การแบ่งอีลีเมนต์แบบที่ 1



รูป 4.14 แบบ รูป3 มิติของสนามแม่เหล็กที่ $k_0 t = 16.0$ ใน โมด E_{31}^{y} ที่ คำนวณจาก วิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามแม่เหล็ก 3 องค์ประกอบ เมื่อ $p = 1/2.289$ ของท่อนำแสงแบบฝังในซับสเตรทที่มีแกนและซับสเตรทเป็นเนกาทิฟยูนิแอกเชียลโดยใช้การแบ่งอีลีเมนต์แบบที่ 1

$$\varepsilon_{xx} = n_e^2 \cos^2\theta + n_0^2 \sin^2\theta \quad (4.16a)$$

$$\varepsilon_{yy} = n_0^2 \cos^2\theta + n_e^2 \sin^2\theta \quad (4.16b)$$

$$\varepsilon_{zz} = n_0^2 \quad (4.16c)$$

$$\varepsilon_{xy} = \varepsilon_{yx} = \left(n_e^2 - n_0^2\right)\sin\theta\cos\theta \quad (4.16d)$$

$$n_0 = 2.3129 \quad (4.16e)$$

$$n_e = 2.222 \quad (4.16f)$$

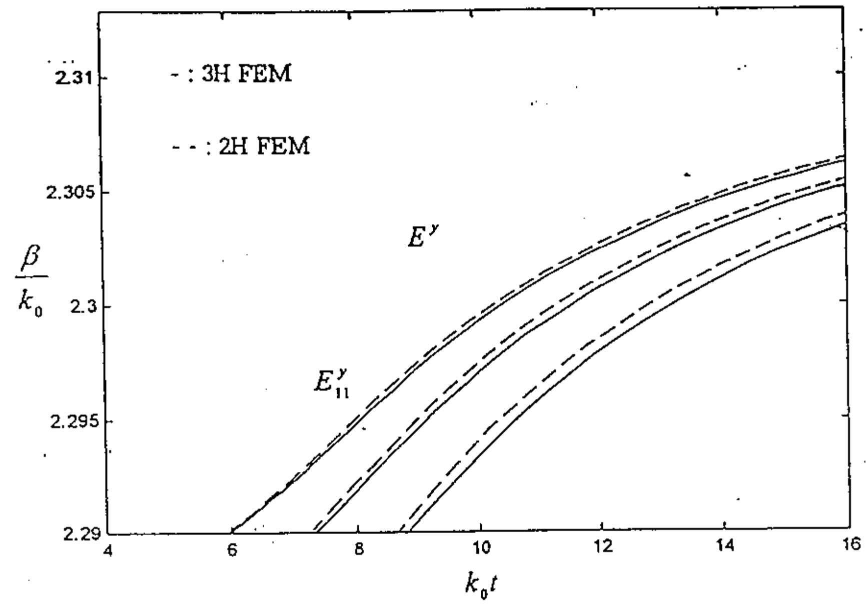
เมื่อ n คือดัชนีหักเห (refractive index), θ คือมุมระหว่างแกนทางแสง x ในที่นี้กำหนดให้มีค่าเท่ากับ $-\pi/8$ เรเดียน ซับเสตรทของท่อนำคลื่นนี้เป็นแอนไอโซทรอปิกเนกาทิฟยูนิแอกเซียลที่แกนทางแสงขนานกับแกน x สภาพยอมสัมพัทธ์และความซาบซึมได้สัมพัทธ์ของซับสเตรทคือ

$$[\varepsilon_r] = \begin{bmatrix} 2.20^2 & 0 & 0 \\ 0 & 2.29^2 & 0 \\ 0 & 0 & 2.29^2 \end{bmatrix} \quad (4.17)$$

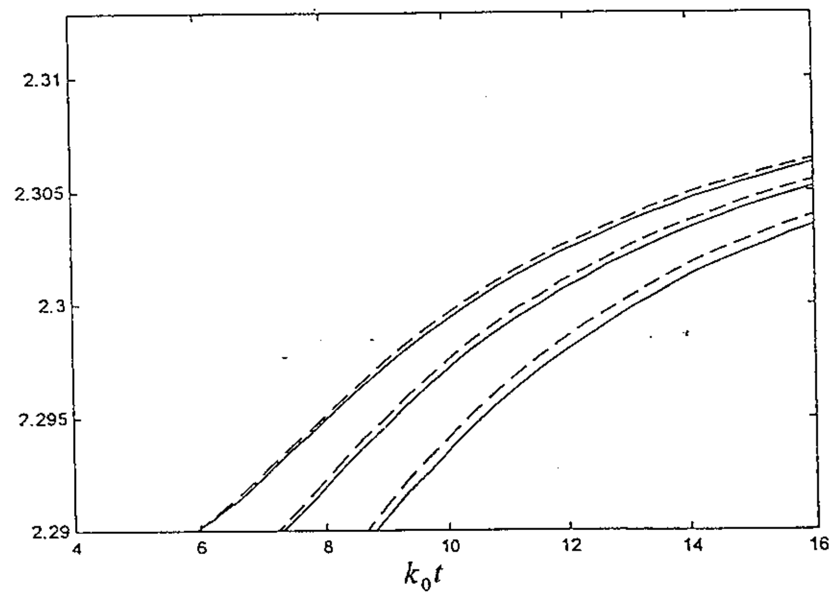
$$\mu_r = 1.0 \quad (4.18)$$

เช่นเดียวกับกรณีแรก ท่อนำแสงกรณีนี้ไม่สามารถหาผลเฉลยแม่นตรงจากวิธีเชิงวิเคราะห์ได้ จึงจำเป็นต้องตรวจสอบความถูกต้องโดยเทียบผลการคำนวณที่ได้จากวิธีอื่น ผลการคำนวณที่นำมาเปรียบเทียบคือ ผลการคำนวณที่ได้จากวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามแม่เหล็กตามขวาง 2 องค์ประกอบ (Hayata,Eguchi และ Koshiba,1986) รูป 4.15-4.21 แสดงกราฟดิสเพอร์ชันที่ได้จากวิธีไฟไนอีลีเมนต์เมื่อใช้การแบ่งอีลีเมนต์แบบที่ 1 ดังแสดงในรูป 4.5 และแบบที่ 2 ดังแสดงในรูป 4.6 ตามลำดับ เส้นทึบแสดงผลการคำนวณที่ได้จากวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามแม่เหล็ก 3 องค์ประกอบ เมื่อสัมประสิทธิ์พีนอลตี เท่ากับ $1/2.289$ ($p = 1/2.289$) เส้นประแสดงผลการคำนวณที่ได้จากวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามแม่เหล็กตามขวาง 2 องค์ประกอบ

จากรูป 4.15 พบว่าโมด 3 อันดับแรกที่เลือกมาแสดงคือโมด E_{11}^y ,E_{21}^y และ E_{31}^y จะเห็นได้ว่าโมด E_{11}^y จากวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามแม่เหล็ก 3 องค์ประกอบ และวิธีที่ใช้สนามแม่เหล็กตามขวาง 2 องค์ประกอบให้ผลเฉลยที่สอดคล้องกัน ส่วนผลการคำนวณในโมด E_{21}^y และ E_{31}^y ยังไม่สอดคล้องกันมากนัก แต่อย่างไรก็ตามโมด E_{21}^y , E_{31}^y ที่ได้จากสองวิธีนี้จะมีค่าสอด



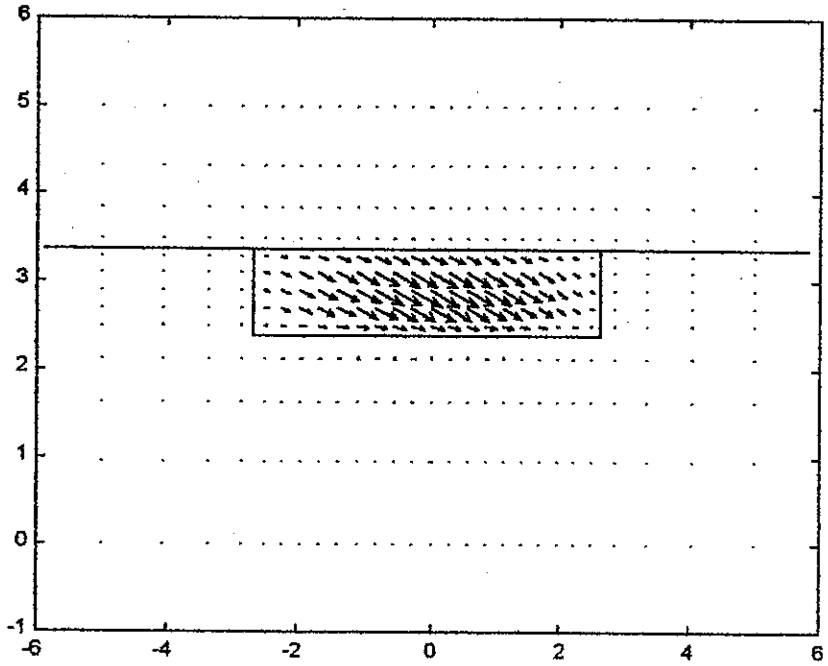
(ก)



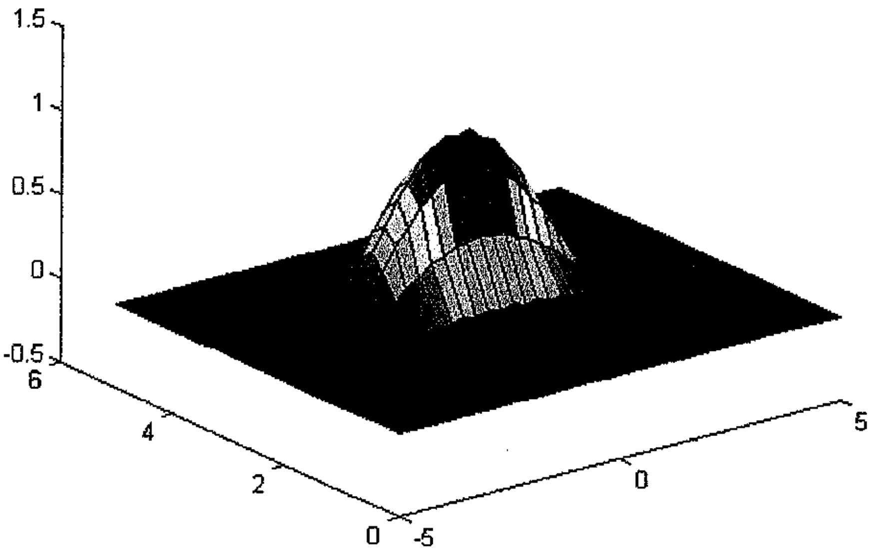
(ข)

รูป 4.15กราฟดิสเพอร์ชันที่ได้จากวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามแม่เหล็ก 3 องค์ประกอบ เมื่อ $p = 1/2.289$ และที่ได้จากวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามแม่เหล็กตามขวาง 2 องค์ประกอบ ของท่อนำแสงแบบฝังในซับสเตรทที่มีแกนแอนไอโซทรอปิกตามขวาง เมื่อใช้

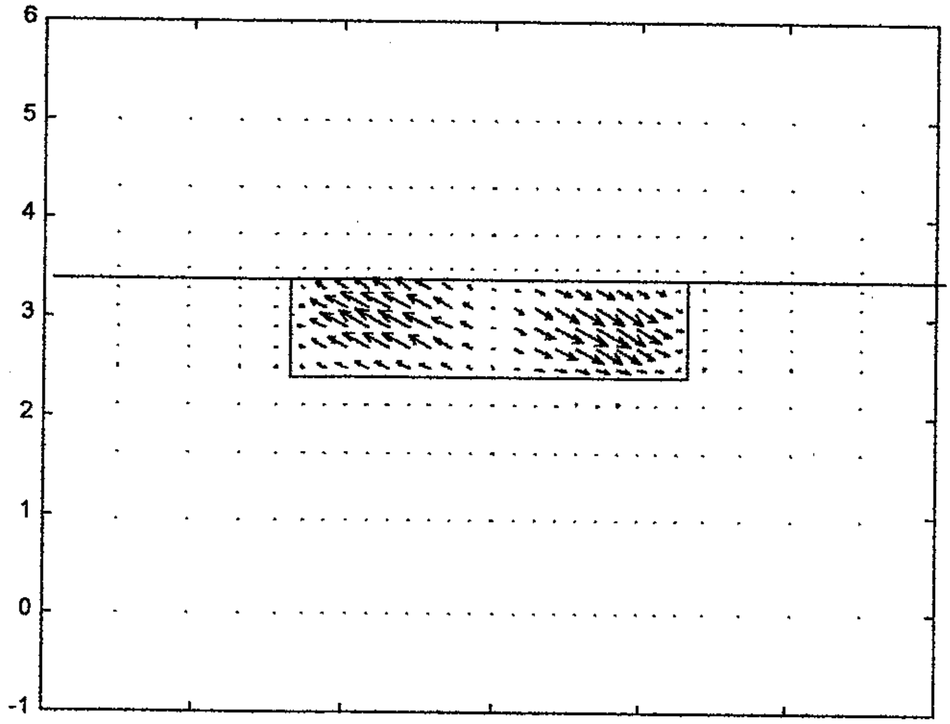
(ก) การแบ่งอีลีเมนต์แบบที่ 1 (ข) การแบ่งอีลีเมนต์แบบที่ 2



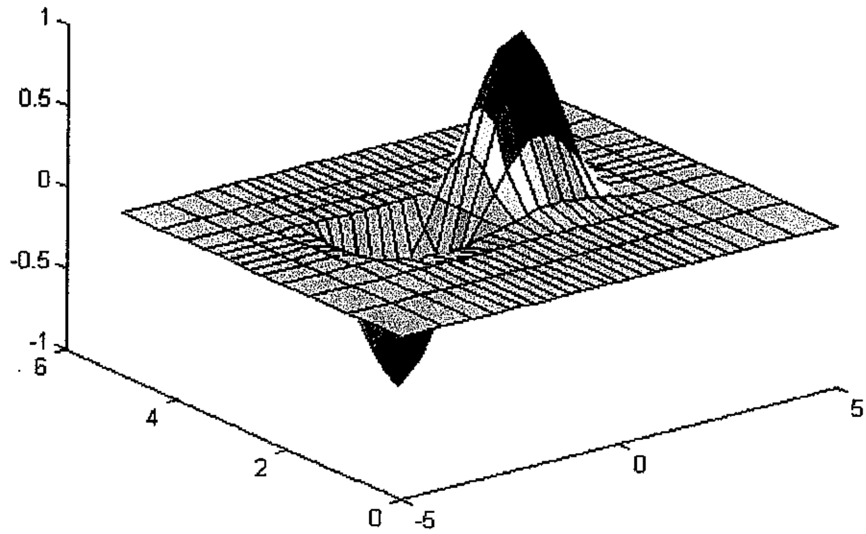
รูป 4.16 แบบรูปของสนามแม่เหล็กที่ $k_0t = 16.0$ ใน โมด E_{11}^{y} ที่ คำนวณจากวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามแม่เหล็ก 3 องค์ประกอบ เมื่อ $p = 1/2.289$ ของท่อนำแสงแบบฝังในซับสเตรทที่มีแกนเป็นแอนไอโซทรอปิกตามขวาง และซับสเตรทเป็นเนกาทิฟยูนิแอกเชียล โดยใช้การแบ่งอีลีเมนต์แบบที่ 2



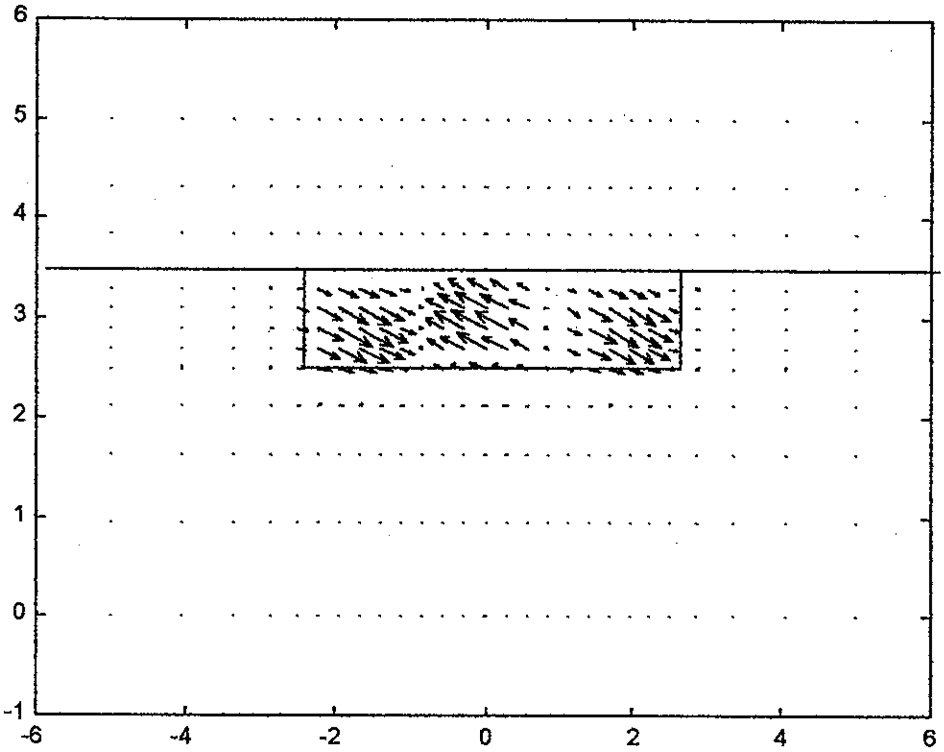
รูป 4.17 แบบรูป 3 มิติของสนามแม่เหล็กที่ $k_0t = 16.0$ ในโมด E_{11}^{y} ที่ คำนวณจากวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามแม่เหล็ก 3 องค์ประกอบ เมื่อ $p = 1/2.289$ ของท่อนำแสงแบบฝังในซับสเตรทที่มีแกนเป็นแอนไอโซทรอปิกตามขวาง และซับสเตรทเป็นเนกาทิฟยูนิแอกเซียล โดยใช้การแบ่งอีลี เมนต์แบบที่ 2



รูป 4.18 แบบรูป ของสนามแม่เหล็กที่ $k_0t = 16.0$ ใน โมด E_{21}^{y} ที่ คำนวณจากวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามแม่เหล็ก 3 องค์ประกอบ เมื่อ $p = 1/2.289$ ของท่อนำแสงแบบฝังในซับสเตรทที่มีแกนเป็นแอนไอโซทรอปิกตามขวาง และซับสเตรทเป็นเนกาทิฟยูนิแอกเซียล โดยใช้การแบ่งอีลีเมนต์แบบที่ 2



รูป 4.19 แบบรูป 3 มิติของสนามแม่เหล็กที่ $k_0 t = 16.0$ ใน โมด E_{21}^{y} ที่ คำนวณจากวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามแม่เหล็ก 3 องค์ประกอบ เมื่อ $p = 1/2.289$ ของท่อนำแสงแบบฝังในซับสเตรทที่มีแกนเป็นแอนไอโซทรอปิกตามขวาง และซับสเตรทเป็นเนกาทิฟยูนิแอกเซียล โดยใช้การแบ่งอีลีเมนต์แบบที่ 2



รูป 4.20 แบบรูปของสนามแม่เหล็กที่ $k_0 t = 16.0$ ใน โมด E^y_{31} ที่ คำนวณจากวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามแม่เหล็ก 3 องค์ประกอบ เมื่อ $p = 1/2.289$ ของท่อนำแสงแบบฝังในซับสเตรทที่มีแกนเป็นแอนไอโซทรอปิกตามขวาง และซับสเตรทเป็นเนกาทิฟยูนิแอกเชียล โดยใช้การแบ่งอีลีเมนต์แบบที่ 2

ภาคผนวก ข

1.การได้มาซึ่ง ∇ ในรูปเมตริกซ์เราพิจารณาจากผลคูณคาร์ทีเซียน

$$\nabla \times \mathrm{H} = \left(\frac{\partial \mathrm{H}_z}{\partial y} - \frac{\partial \mathrm{H}_y}{\partial z}\right)a_x + \left(\frac{\partial \mathrm{H}_x}{\partial z} - \frac{\partial \mathrm{H}_z}{\partial x}\right)a_y + \left(\frac{\partial \mathrm{H}_y}{\partial x} - \frac{\partial \mathrm{H}_x}{\partial y}\right)a_z \qquad (ข.1)$$

เมื่อพิจารณาทำให้ทราบว่า

$$\nabla \times \mathrm{H} = [\nabla]\{\mathrm{H}\} = \begin{bmatrix} 0 & -\partial/\partial z & \partial/\partial y \\ \partial/\partial z & 0 & -\partial/\partial x \\ -\partial/\partial y & \partial/\partial x & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathrm{H}_x \\ \mathrm{H}_y \\ \mathrm{H}_z \end{Bmatrix} \qquad (ข.2)$$

$$[\nabla] = \begin{bmatrix} 0 & -\partial/\partial z & \partial/\partial y \\ \partial/\partial z & 0 & -\partial/\partial x \\ -\partial/\partial y & \partial/\partial x & 0 \end{bmatrix} \qquad (ข.3)$$

2.คุณสมบัติของเวกเตอร์

$$a \cdot (b \times c) = b \cdot (c \times a) = c \cdot (a \times b) \qquad (ข.4)$$

$$a \times (b \times c) = (a \cdot c)b - (a \cdot b)c \qquad (ข.5)$$

$$\nabla(ab) = a\nabla b + b\nabla a \qquad (ข.6)$$

$$\nabla \cdot (ab) = a\nabla \cdot b + b \cdot \nabla a \qquad (ข.7)$$

$$\nabla \times (ab) = a\nabla \times b - b \times \nabla a \qquad (ข.8)$$

$$\nabla(a \cdot b) = a \times \nabla \times b + b \times \nabla \times a + (a \cdot \nabla)b + (b \cdot \nabla)a \qquad (ข.9)$$

$$\nabla \cdot (a \times b) = b \cdot \nabla \times a - a \cdot \nabla \times b \qquad (ข.10)$$

$$\nabla \times (a \times b) = a \cdot \nabla \cdot b - b\nabla \cdot a - (a \cdot \nabla)b + (b \cdot \nabla)a \qquad (ข.11)$$

$$\nabla \cdot (\nabla a) = \nabla^2 a \qquad (ข.12)$$

$$\nabla \times (\nabla \times a) = \nabla(\nabla \cdot a) - \nabla^2 a \qquad (ข.13)$$

$$\nabla \times (\nabla a) = 0 \qquad (ข.14)$$

$$\nabla \cdot (\nabla \times a) = 0 \qquad (ข.15)$$

หลักการอินทิกรัล

กฎของเกร์เดียน(Gradient theorem)

$$\iiint_V \nabla f dV = \oiint_S \hat{n} f dS \qquad (ข.16)$$

กฎของไดเวอร์เจนซ์(Divergence theorem)

$$\iiint_V \nabla \cdot f dV = \oiint_S \hat{n} \cdot f dS \qquad (ข.17)$$

กฎของเคอร์(Curl theorem)

$$\iiint_V \nabla \times f dV = \oiint_S \hat{n} \times f dS \qquad (ข.18)$$

กฎของเกร์เดียน-คอส(Cross-Gradient theorem)

$$\iint_S \hat{n} \times \nabla f dS = \oint_C \hat{l} f dl \qquad (ข.19)$$

กฎของสโตกส์(Stokes theorem)

$$\iint_S \hat{n} \cdot \nabla \times f dS = \oint_C \hat{l} \cdot f dl \qquad (ข.20)$$

กฎของคอส-เดล-คอส (Cross –del-cross theorem)

$$\iint_S (\hat{n} \times \nabla) \times f dS = \oint_S \hat{l} \times f dl \qquad (ข.21)$$

กฎข้อที่ 1 สำหรับสเกลาร์ของ กรีนส์(First scalar Green's theorem)

$$\iiint_V [a\nabla \cdot (u\nabla b) + u(\nabla a) \cdot (\nabla b)] dV = \oiint_S au \frac{\partial}{\partial n} dS \qquad (ข.22)$$

กฎข้อที่ 2 สำหรับสเกลาร์ของ กรีนส์(Second scalar Green's theorem)

$$\iiint_V [a\nabla \cdot (u\nabla b) - b\nabla \cdot (u\nabla a)] dV = \oiint_S u\left(a\frac{\partial b}{\partial n} - b\frac{\partial a}{\partial n}\right) dS \qquad (ข.23)$$

กฎข้อที่ 1 สำหรับเวกเตอร์ของ กรีนส์(First vector Green's theorem)

$$\iiint_V [u(\nabla \times a) \cdot (\nabla \times b) - a \cdot (\nabla \times u\nabla \times b)] dV = \oiint_S u(a \times \nabla \times b) \cdot \hat{n} dS \qquad (ข.24)$$

กฎข้อที่ 2 สำหรับเวกเตอร์ของ กรีนส์(Second vector Green's theorem)

$$\iiint_V [b \cdot (\nabla \times u\nabla \times a) - a \cdot (\nabla \times u\nabla \times b)] dV = \oiint_S u(a \times \nabla \times b - b \times \nabla \times a) \cdot \hat{n} dS$$

(ข.25)

....

ภาคผนวก ค

ปัญหาค่าขอบเขตที่ปรากฏในสมการทางคณิตศาสตร์รูปแบบของค่าขอบเขตสามารถกำหนดได้โดยการบังคับสมการดิฟเฟอร์เรนเชียลในโดเมนโอเมกา (Ω)

$$L\phi = f \qquad (ค.1)$$

วิธีของริตซ์ (The Ritz Method)

เป็นที่ทราบกันว่าวิธีของ เรเลย์ริตซ์ คือวิธีที่แปรผันตามปัญหาค่าขอบเขตจะได้รับการจัดรูปเป็นนิพจน์แปรผันโดยอ้างถึงฟังก์ชันนอล ซึ่งมีผลตอบสนองต่ำสุดโดยการบังคับสมการดิฟเฟอร์เรนเชียลภายใต้การให้เงื่อนไขขอบเขตโดยดำเนินการให้เรากำหนดผลคูณภายใน (inner product) โดยแสดงเป็นรูปปีกกาเหลี่ยม $\left(\langle\ \rangle\right)$ โดย

$$\langle \phi,\psi \rangle = \int_{\Omega} \phi\varphi^{*} d\Omega \qquad (ค.2)$$

โดย

$$\langle L\phi,\varphi \rangle = \langle \phi, L\varphi \rangle \qquad (ค.3)$$

เครื่องหมายได้รับการกำหนดโดย

$$\langle L\phi,\varphi \rangle \quad \begin{cases} >0 & \phi \neq 0 \\ =0 & \phi = 0 \end{cases} \qquad (ค.4)$$

ฟังก์ชันของปัญหาที่มีการตอบสนองต่ำสุดเขียนได้เป็น

$$F(\tilde{\phi}) = \frac{1}{2}\langle L\tilde{\phi},\tilde{\phi} \rangle - \frac{1}{2}\langle \tilde{\phi}, f \rangle - \frac{1}{2}\langle f,\tilde{\phi} \rangle \qquad (ค.5)$$

$\tilde{\phi}$ คือฟังก์ชันของคำตอบทดลอง

$$\tilde{\phi} = \sum_{j=1}^{N} C_j V_j = \{C\}^{\mathrm{T}}\{V\} = \{V\}^{\mathrm{T}}\{C\} \qquad (ค.6)$$

T แสดงถึงการทรานสโพสท์เมตริกซ์

C_j คือสัมประสิทธิ์ค่าคงที่ที่กำหนดขึ้น

φ_j คือฟังก์ชันที่ได้รับการเลือกมาในข้างต้นทั้งโดเมนต์ Ω

เมื่อแทนสมการ (ค.5)ใน (ค.6) ได้ว่า

$$F = \frac{1}{2}\{C\}^{\mathrm{T}} \int_{\Omega} \{V\} L \{V\}^{\mathrm{T}} d\Omega \{C\} - \{C\}^{\mathrm{T}} \int_{\Omega} \{V\} f d\Omega \qquad (ค.7)$$

ทำการ dif สมการ(ค.7)ได้ว่า

$$\frac{\partial F}{\partial C_i} = \frac{1}{2}\int_{\Omega} v_i L \{v\}^{\mathrm{T}} d\Omega \{C\} + \frac{1}{2}\{C\}^{\mathrm{T}} \int_{\Omega} \{v\} L v_i d\Omega - \int_{\Omega} v_i f d\Omega$$

$$= \frac{1}{2}\sum_{j=1}^{N} C_j \int_{\Omega} \left(v_i L v_j + v_j L v_j\right) d\Omega - \int_{\Omega} v_i f d\Omega$$

$$= 0 \qquad , \qquad i=1,2,3,4,5,6,\ldots,N \qquad (ค.8)$$

ซึ่งสามรถเขียนในรูปเมตริกซ์ได้ดังนี้

$$[S]\{C\} = \{b\} \qquad (ค.9)$$

โดยในแต่ละอีลีเมนต์ $[S]$ สามารถแสดงได้โดย

$$S_{ij} = \frac{1}{2}\int_{\Omega} \left(v_i L v_j + v_j L v_i\right) d\Omega \qquad (ค.10)$$

โดยในแต่ละอีลีเมนต์ของ $\{b\}$ สามารถแสดงได้โดย

$$b_i = \int_{\Omega} v_i f d\Omega \qquad (ค.11)$$

โดย $[S]$ เป็นเมตริกซ์สามาตร โดยนำมาซึ่งคุณสมบัติเซลแอทจอยต์(self adjiont)ของตัวโอเปอเรเตอร์ L , S_{ij} สามารถเขียนได้เป็น

$$S_{ij} = \int_{\Omega} v_i L v_j d\Omega \qquad (ค.12)$$

ผลเฉลยโดยประมาณของสมการ (ค.1) ได้รับเมื่อแก้สมการเมตริกซ์(ค.9)นั้นเอง

....

ภาคผนวก ง

อินทิกรัลของฟังก์ชันรูปร่าง

อินทิกรัลของฟังก์ชันรูปร่างในอีลีเมนต์สามเหลี่ยมสามารถหาได้จากสมการต่อไปนี้ (Kardestuncer , 1988 , Sivester และ ferrari , 1990)

$$I^{e}(l,m,n) = \iint_{e} (L_1)^{l} (L_2)^{m} (L_3)^{n}\, dxdy \qquad (ง.1a)$$

$$= \frac{l!m!n!}{(l+m+n)!} 2A \qquad (ง.1b)$$

เมื่อ (L_1, L_2, L_3) คือฟังก์ชันเชิงเส้นที่สามารถหาได้จากสมการ

$$\begin{bmatrix} L_1 \\ L_2 \\ L_3 \end{bmatrix} = \frac{1}{2A} \begin{bmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ x \\ y \end{bmatrix} \qquad (ง.2)$$

เมื่อ

$$a_k = x_l y_m - x_m y_l \qquad (ง.3)$$

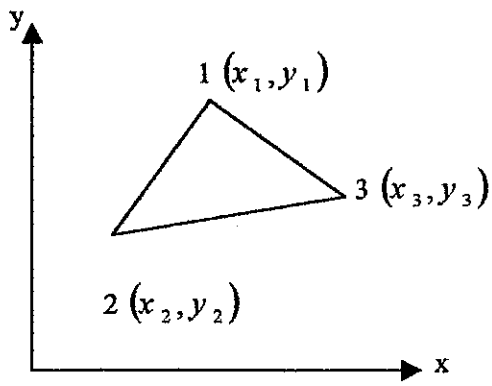
$$b_k = y_l - y_m \qquad (ง.4)$$

$$c_k = x_m - x_l \qquad (ง.5)$$

โดยที่ (k, l, m) เรียงในลักษณะมอดุโล 3 , (x_1, y_1), (x_2, y_2) และ (x_3, y_3) คือพิกัดของมุม 1, 2 และ 3 ของอีลีเมนต์สามเหลี่ยม ตามลำดับ ดังแสดงในรูป ฉ.1 , A คือพื้นที่ของอีลีเมนต์รูปสามเหลี่ยมซึ่งหาได้จากสมการ

$$A = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{bmatrix} \qquad (ง.6)$$

โดยที่ [ ] คือตัวกำหนด



รูป ฉ.1 อีลีเมนต์รูปสามเหลี่ยม และพิกัดโนด

สำหรับอีลีเมนต์อันดับที่หนึ่ง ดังแสดงในรูป ฉ.1 ฟังก์ชันรูปร่าง $\{N\}$ คือ

$$\{N\} = [L_1 \quad L_2 \quad L_3]^T \qquad (ง.7)$$

ผลอินทิกรัลของฟังก์ชันรูปร่างสำหรับแต่ละอีลีเมนต์ในวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามแม่เหล็ก 3 องค์ประกอบ วิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามไฟฟ้า 3 องค์ประกอบ วิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้แม่เหล็กสนามตามขวาง 2 องค์ประกอบ และวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามไฟฟ้าตามขวาง 2 องค์ประกอบ และวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามไฟฟ้าในแนวสัมผัสและในแนวแกน มีดังนี้

$$\left[\iint_e \{N\}\{N\}^T dxdy\right]_{ij} = \left\{\begin{matrix} \frac{A}{6}, i = j \\ \frac{A}{12}, i \neq j \end{matrix}\right\} \qquad (ง.8)$$

$$\left[\iint_e \{N\}_x \{N\}_x^T dxdy\right]_{ij} = \frac{1}{4A} b_i b_j \qquad (ง.9)$$

$$\left[\iint_e \{N\}_x \{N\}_y^T dxdy\right]_{ij} = \frac{1}{4A} b_i c_j \qquad (ง.10)$$

$$\left[\iint_e \{N\}_y \{N\}_y^T dxdy\right]_{ij} = \frac{1}{4A} c_i c_j \qquad (ง.11)$$

$$\left[\iint_e \{N\}\{N\}_x^T dxdy\right]_{ij} = \frac{b_j}{6} \qquad (ง.12)$$

$$\left[\iint_e \{N\}\{N\}_y^T dxdy\right]_{ij} = \frac{c_j}{6} \qquad (ง.13)$$

$$\iint_e \{N\}_y \{N\}_x^T dxdy = \left[\iint_e \{N\}_y \{N\}_y dxdy\right]^T \qquad (ง.14)$$

$$\iint_e \{N\}_x \{N\}^T dxdy = \left[\iint_e \{N\}\{N\}_x^T dxdy\right]^T \qquad (ง.15)$$

$$\iint_e \{N\}_y \{N\}^T dxdy = \left[\iint_e \{N\}\{N\}_y^T dxdy\right]^T \qquad (ง.16)$$

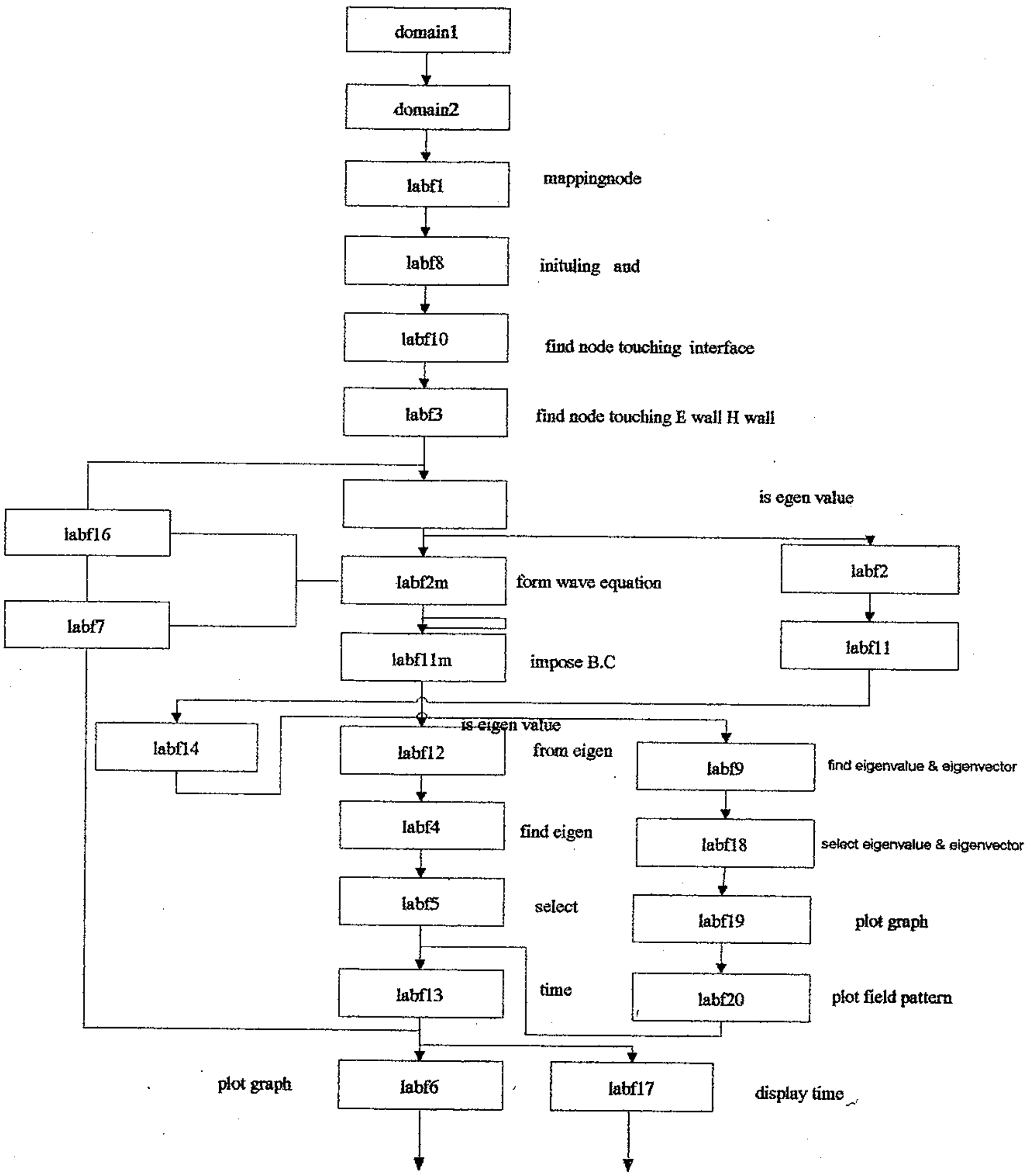
เมื่อ $i = 1,2,3$ และ $j = 1,2,3$

ภาคผนวก จ

แผนผังการทำงานของโปรแกรมวิเคราะห์ท่อนำคลื่น

การทำงานของโปรแกรมที่ผู้ดำเนินโครงงานวิจัยได้ใช้เป็นโปรแกรมหลักในการวิเคราะห์ท่อนำคลื่นสามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

Flowchart of 3-H component for rectangular waveguide



```
%************
%main program
%************
runmod  %call for runmode

if rmfg==1
 clc
 fprintf('\n\n')
 disp(' ***********************************************************')
 disp(' *                                           *')
 disp(' *    Vectorial Finite-element Method Without          *')
 disp(' *    Any Spurious Solutions for Electrically          *')
 disp(' *    and Magnetically Anisotropic Waveguiding Problems  *')
 disp(' *    Using three Magnetic-Fields Component by          *')
 disp(' *    modified penalty method.                  *')
 disp(' *                                           *')
 disp(' ***********************************************************')
end

if rmfg==1
 while 1
  fprintf('\n\n')
  disp(' Do you wish to run program')
  disp('  1. yes')
  disp('  2. no')
  temp=input(' input your selection >> ');
  if (temp==2)|(temp==1),break,end
 end
else
 temp=1;  %data for background mode
```

```
end

if temp==2,break,end

clear all
save dhdf.mat
save infor.mat

format short

runmod
tic
domain1
timed1=toc;

if (ehtnfg==1),break,end

if disfg==2  %non-dispersive media
 tic
 domain2  %call for permeability and permittivity
 timed2=toc;
end

if disfg==2
 if rmfg==1
  while 1
   fprintf('\n\n')
   disp(' select your eigen value')
   disp('  1. k0 is eigen value')
   disp('  2. beta is eigen value')
```

```
   k0fg=input(' input your selection >> ');
   if (k0fg==1)|(k0fg==2),break,end
  end
 else
  k0fg=1;  %data for background mode
 end
else
 k0fg=2;  %media is dispersive
end

if rmfg==1
 while 1
  fprintf('\n\n')
  k0mn=input(' input the minimum value for k0 axis >> ');
  k0mx=input(' input the maximum value for k0 axis >> ');
  if (k0mn>=0)&(k0mn<k0mx),break,end
 end
else
 k0mn=4;
 k0mx=16;
end

if (mhtnfg~=1)
 if rmfg==1
  while 1
   fprintf('\n\n')
   disp(' select your range for beta/k0 axis')
   disp('  1. automatic adapt range')
   disp('  2. custom adapt range')
   lifg=input('input your selection >> ');
```

```
 if fufg==1
  labf48
 else
  labf28  %initualize permeability and epsilon
 end

end

 if fufg==1
  labf43
 else
  labf23  %find node touching E wall and H wall
 end

end

for loop98=1:inl
 loop99=1;

 while (loop99<=temp99(loop98))
  temp98=(loop99-1)*istep(loop98)+min(loop98);
  acomp=(temp95(loop98)+loop99)*100/temp96;

  if cwfg==2  %rectangular waveguide

   if (span==1)
    if disfg==1  %dispersive
     tic
     domain2
```

```
 timed2=toc;
 labf8 %initualize permeability and permittivity to each element
 labf10 %find node touching interface
 end
 if k0fg==1
 labf2m %form wave and divergence matrix
 else
 labf2
 end
else
 if disfg==1 %dispersive
 tic
 domain2
 timed2=toc;
 labf8 %initualize permeability and permittivity to each element
 labfa10 %find node touching interface
 end
 labfa2 %second order
end

else %circular cross-section waveguide

if disfg==1
 tic
 domain2
 timed2=toc

if fufg==1
 labf48
else
```

```
  labf28
 end

end
if k0fg==1

 if fufg==1
  labf42m
 else
  labf22m
 end

else
 labf22
end

end %cwfg==2

if k0fg==1
 labf11m %impose boundary condition
 labf12 %form eigen matrix where k0 is eigenvalue
else
 labf11
 labf14
end

if ptnfg==1 %plot field pattern
 labf9
 labf18
 labf19
```

```
  labf20
 else
  labf4
  labf5
 end

 if flag99==0  %record time
  labf13
  flag99=1;
 end

 loop99=loop99+1;
end

end

clear
save finish.mat
load infor.mat

if (qfg==1)
 quit
end
```

ประวัติผู้ทำโครงงาน

1. **Mr.Salakpetch Keatkeaw ID. 40362584**

นาย สลักเพชร เกตุแก้ว

เกิดวันที่ 9 กันยายน 2519

117 ถนนคลองคะเชนทร์ ต.ในเมือง อ.เมือง จ. พิจิตร 66000

จบการศึกษาระดับประถมศึกษาจากโรงเรียนอนุบาลพิจิตร

จบการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนพิจิตรพิทยาคม

ปัจจุบันกำลังศึกษาอยู่ในชั้นปีที่ 4 คณะวิศวกรรมศาสตร์ เอก ไฟฟ้า

มหาวิทยาลัยนเรศวร

2. **Mr.Wichian Promtanod ID. 40362501**

นาย วิเชียร พร้อมโตนด

เกิดวันที่ 16 พฤษภาคม 2521

104 หมู่ 8 ต.ชัยนาม อ. วังทอง จ.พิษณุโลก 65130

จบการศึกษาระดับประถมศึกษาจากโรงเรียนบ้านบึงพร้าว อ.วังทอง จ.พิษณุโลก

จบการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนต้นจากโรงเรียนวังทองพิทยาคม จ.พิษณุโลก

จบการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนพิษณุโลกพิทยาคม จ.พิษณุโลก

ปัจจุบันกำลังศึกษาอยู่ในชั้นปีที่ 4 คณะวิศวกรรมศาสตร์ เอก ไฟฟ้า

มหาวิทยาลัยนเรศวร

....