

บทที่ 4

การวิเคราะห์โหมดเจาะจงที่นำคลื่นที่บรรจุด้วยตัวกลางไบแอนไอโซทรอปิก

ความนำ

บทนี้เสนอผลการวิเคราะห์โหมดเจาะจงในกรณีตัวอย่างของท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยตัวกลางไบแอนไอโซทรอปิกด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ดังกล่าวมาแล้วในบทที่ 3 ในบทนี้จะแสดงผลการคำนวณในกรณีตัวอย่างของท่อนำคลื่น 3 แบบคือท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยตัวกลางไครสต์ ท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยตัวกลางเฟอร์ไรต์ไครสต์ และท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยไดอิเล็กทริกไครสต์

4.1 ท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยตัวกลางไครสต์ (Chirrowaveguide)

ตัวอย่างนี้เป็นท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยตัวกลางไครสต์และมีภาคตัดขวางเป็นรูปวงกลมรัศมี a และมีผนังท่อนำคลื่นเป็นตัวนำไฟฟ้าสมบูรณ์แบบดังรูป 4.1 ในการคำนวณได้แบ่งภาคตัดขวางออกเป็นอีลิเมนต์สามเหลี่ยมจำนวน 448 อีลิเมนต์และใช้ฟังก์ชันรูปร่างอีลิเมนต์ขอบแบบเวกเตอร์มาประมาณค่า ซึ่งมีจำนวนพารามิเตอร์ไม่ทราบค่าหลังจากกำหนดเงื่อนไขขอบเขตที่ผิวท่อนำคลื่นเท่ากับ 750 ตัว โดยมีพารามิเตอร์ความสัมพัทธ์ปรุ่่งแต่งดังนี้

$$\bar{\epsilon} = \begin{bmatrix} 1.1419 & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & 1.1419 & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & 1.1419 \end{bmatrix} \quad F/m \quad (4.1a)$$

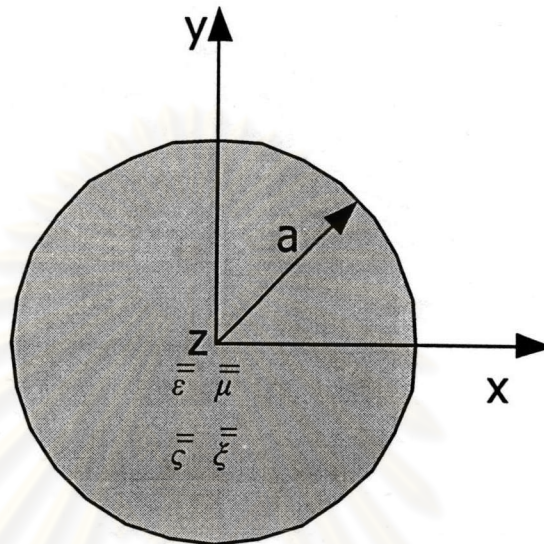
$$\bar{\mu} = \begin{bmatrix} 1.0 & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & 1.0 & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & 1.0 \end{bmatrix} \quad H/m \quad (4.1b)$$

พารามิเตอร์ของการเชื่อมต่อไขว้ระหว่างสนามไฟฟ้ากับสนามแม่เหล็กตั้งความสัมพัทธ์ปรุ่่งแต่งสมการที่ (2.3) เป็น

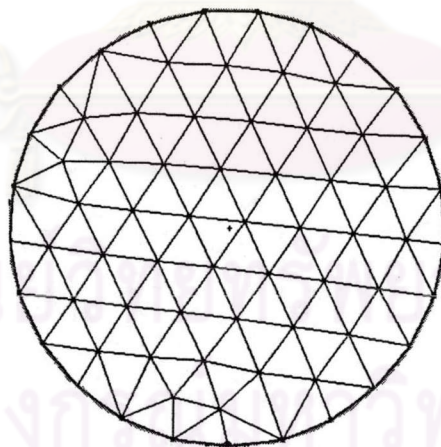
$$\bar{\xi} = \mu_0 \begin{bmatrix} 1.0 & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & 1.0 & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & 1.0 \end{bmatrix} \times 10^{-3} \quad F/(S \cdot m) \quad (4.1c)$$

$$\bar{\bar{\zeta}} = \mu_o \begin{bmatrix} 1.0 & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & 1.0 & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & 1.0 \end{bmatrix} \times 10^{-3} \text{ H} \cdot \text{S} / \text{m} \quad (4.1d)$$

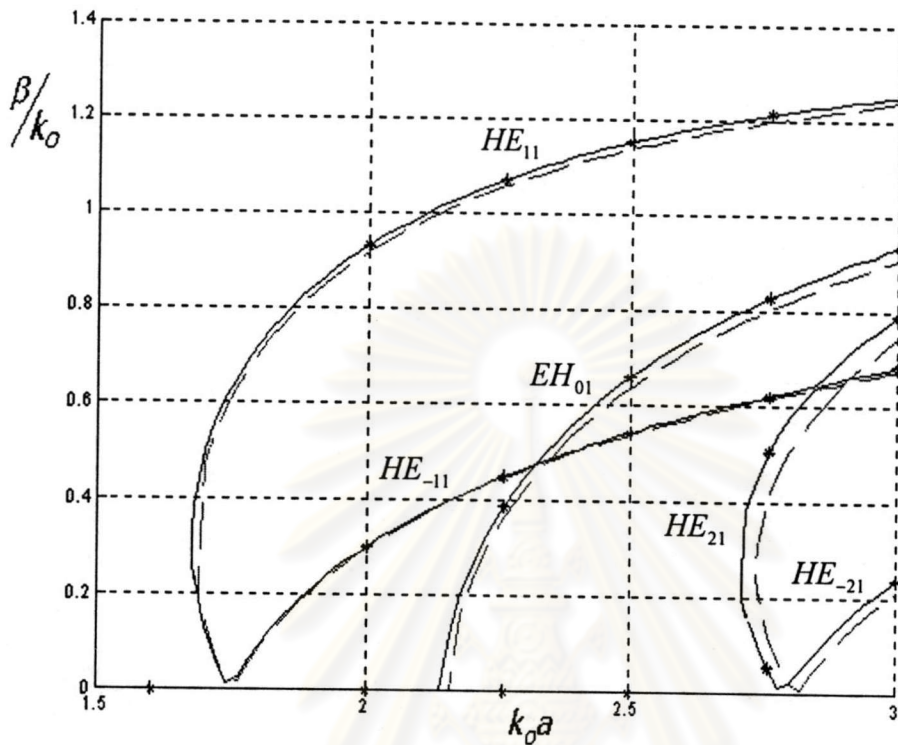
ในที่นี้ได้ให้พารามิเตอร์ไคร์ลิตี $\xi_c = 1 \text{ mS}$



รูปที่ 4.1 ท่อนำคลื่นวงกลมที่บรรจุด้วยตัวกลางไคร์ลิต



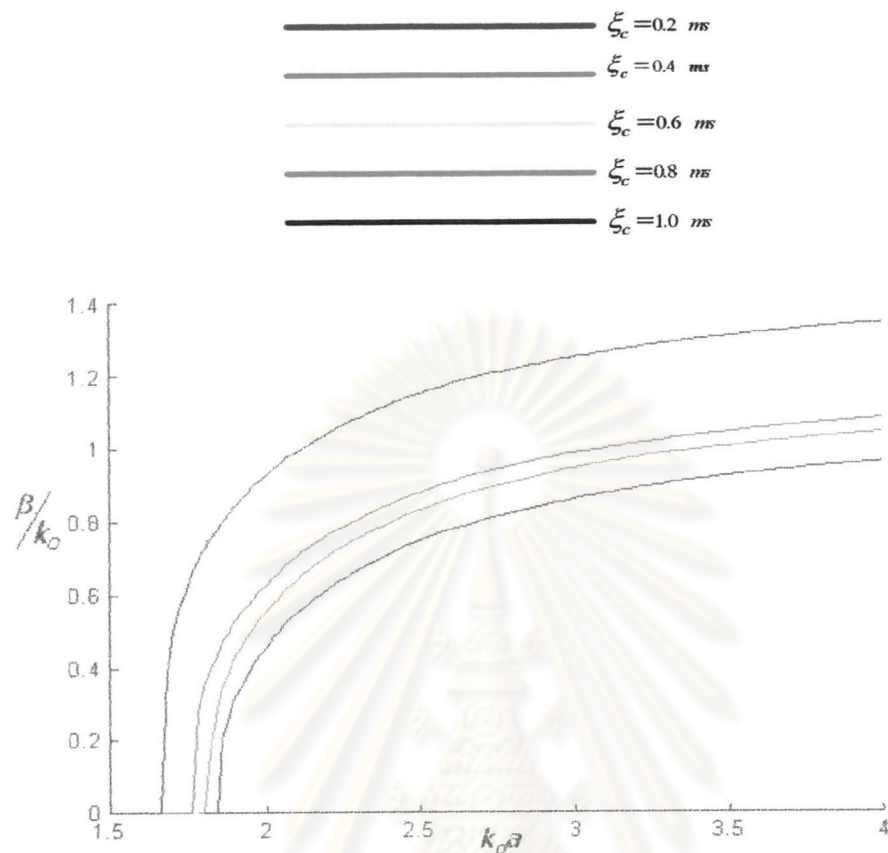
รูปที่ 4.2 การแบ่งอีลีเมนต์ของท่อนำคลื่นวงกลมที่บรรจุด้วยตัวกลางไคร์ลิต



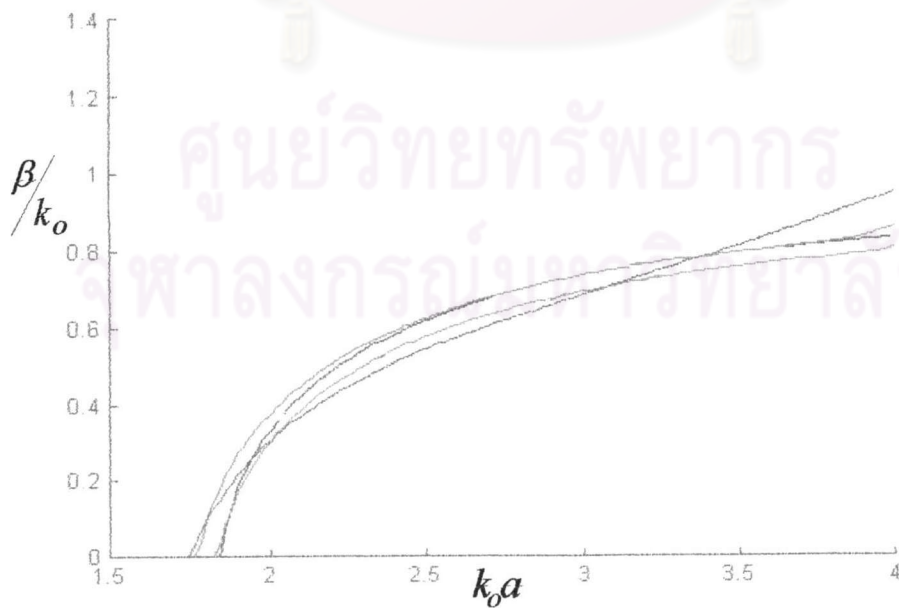
รูปที่ 4.3 กราฟดิสเพอร์ชันของท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยตัวกลางไดอิเล็กตริกค้ำคขวางขวางเป็นรูปวงกลมที่มีผนังท่อนำคลื่นเป็นตัวนำไฟฟ้าสมบูรณ์แบบเมื่อ

- ผลจากวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้ฟังก์ชันรูปร่างอีลีเมนต์ขอบแบบเวกเตอร์
- ผลจากวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้ฟังก์ชันรูปร่างเวกเตอร์เชิงเส้น
- * ผลจากวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ 3 องค์ประกอบสนามแม่เหล็ก [10]

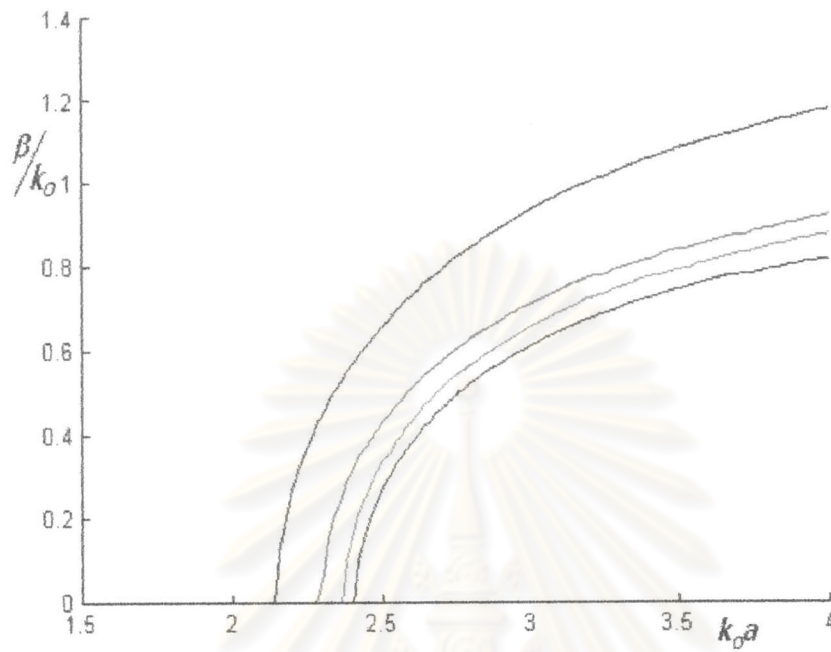
รูปที่ 4.3 แสดงผลการคำนวณในรูปกราฟดิสเพอร์ชันระหว่าง β/k_0 และ $k_0 a$ โดยเส้นที่บดคือผลการคำนวณจากวิธีการไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้ฟังก์ชันรูปร่างเวกเตอร์อีลีเมนต์ขอบแบบเวกเตอร์และสัญลักษณ์รูปดาวคือวิธีการไฟไนต์อีลีเมนต์ 3 องค์ประกอบสนามไฟฟ้าที่เสนอโดย Valor และ Zapata [10] เห็นได้ว่าผลที่ได้จากการคำนวณค่าคงตัวเฟสมีความสอดคล้องกันโดยในโหมดค้ำคอพีมีค่าคงตัวเฟสแยกออกเป็น 2 ค่าคือ HE_{11} และ HE_{-11} โดยแต่ละโหมดจะมีทิศทางของโพลาไรซ์ในทิศทางต่างกัน มีเพียงโหมด EH เท่านั้นจะเกิดค่าคงตัวเฟสค่าเดียว และเมื่อแปรผันค่าไดเรกต์ให้มีค่าเพิ่มขึ้นผลที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะดังนี้



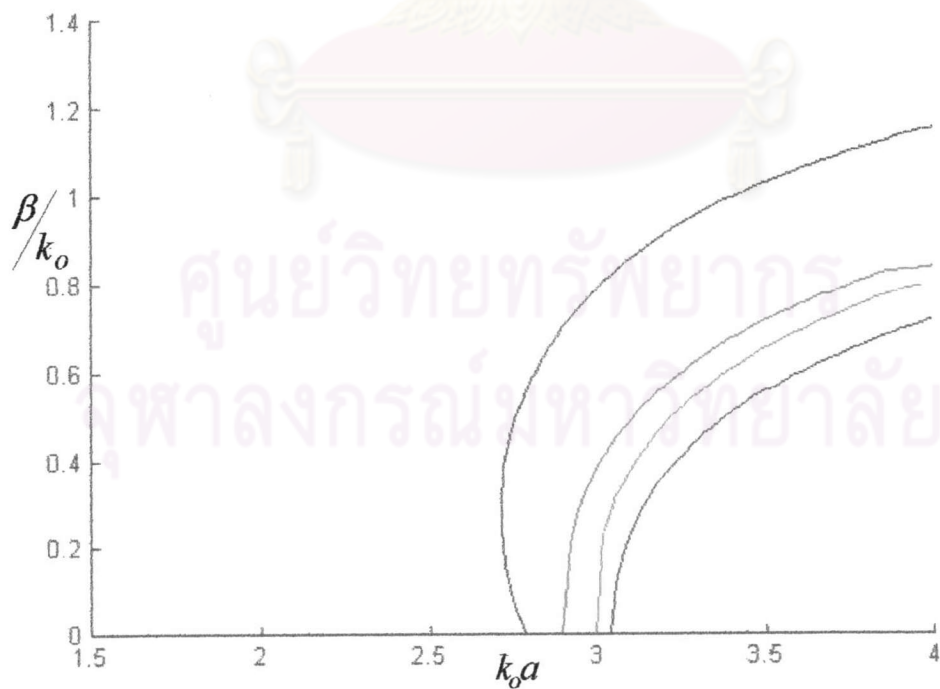
รูปที่ 4.4 (ก) ลักษณะกราฟค่าคงตัวเฟสของโหมด HE_{11} เมื่อมีการผันแปรค่าไคร์ลิตี



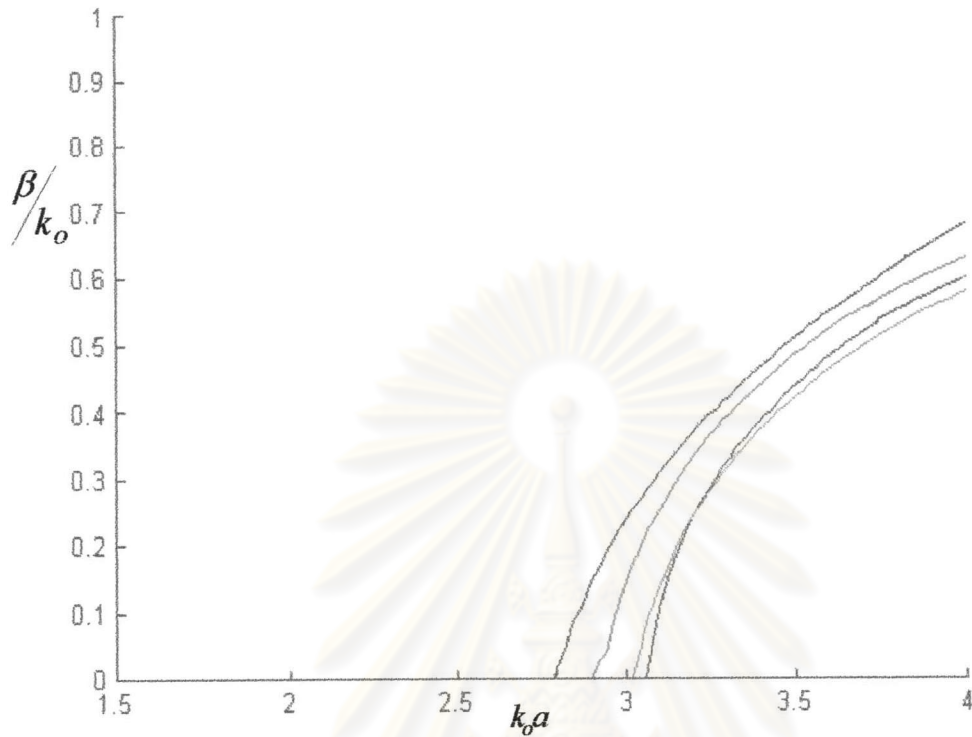
รูปที่ 4.4 (ข) ลักษณะกราฟค่าคงตัวเฟสของโหมด HE_{-11} เมื่อมีการผันแปรค่าไคร์ลิตี



รูปที่ 4.4 (ค) ลักษณะกราฟค่าคงตัวเฟสของโหมด EH_{01} เมื่อมีการผันแปรค่าไคร์ค



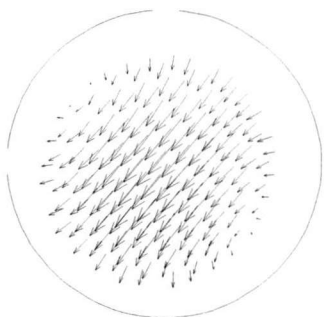
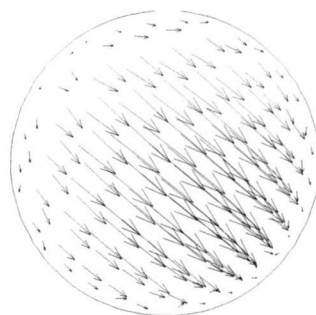
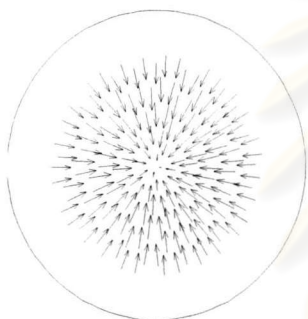
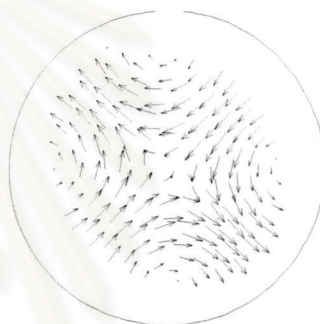
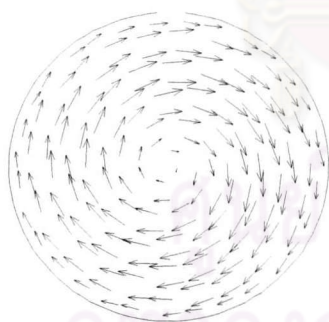
รูปที่ 4.4 (ง) ลักษณะกราฟค่าคงตัวเฟสของโหมด HE_{21} เมื่อมีการผันแปรค่าไคร์ค

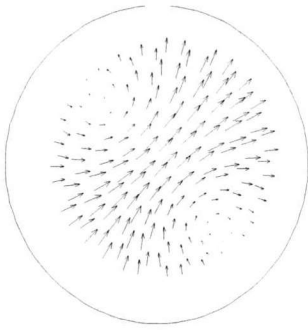
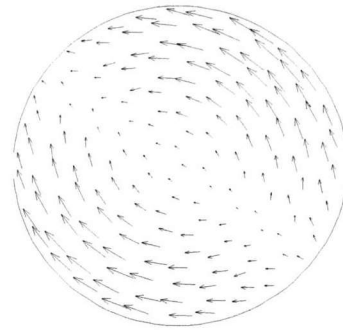
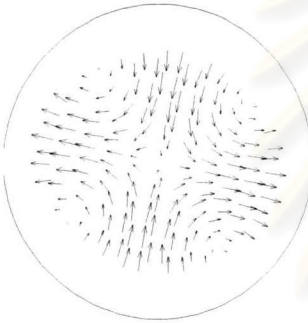
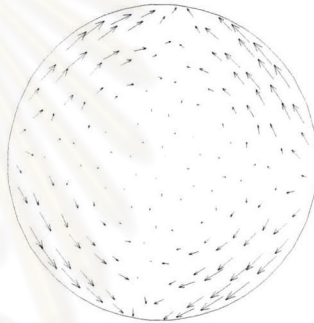


รูปที่ 4.4 (จ) ลักษณะกราฟค่าคงตัวเฟสของโหมด HE_{21} เมื่อมีการผันแปรค่าไคร์ลิตี

ผลการคำนวณเมื่อแปรค่าไคร์ลิตีจาก 0.2-1.0 mS แสดงได้ดังรูป 4.4 จะเห็นได้ว่าโหมดที่มีค่าไคร์ลิตีสูงจะมีความถี่คัตออฟต่ำกว่าตัวกลางไคร์ลิตีที่มีค่าไคร์ลิตีต่ำกว่าดังแสดงในรูป 4.4 (ก) 4.4 (ค) และรูปที่ 4.4 (ง) ลักษณะของรูปแบบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยตัวกลางไคร์ลิตีจะมีลักษณะแสดงดังในรูป 4.5 (ก) - (ญ)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

(ก) แบบรูปความเข้มสนามไฟฟ้าในโหมด HE_{11} (ข) แบบรูปความเข้มสนามแม่เหล็กในโหมด HE_{11} (ค) แบบรูปความเข้มสนามไฟฟ้าในโหมด HE_{-11} (ง) แบบรูปความเข้มสนามแม่เหล็กในโหมด HE_{-11} (จ) แบบรูปความเข้มสนามไฟฟ้าในโหมด EH_{01} (ฉ) แบบรูปความเข้มสนามแม่เหล็กในโหมด EH_{01}

(ข) แบบรูปความเข้มสนามไฟฟ้าในโหมด HE_{21} (ช) แบบรูปความเข้มสนามแม่เหล็กในโหมด HE_{21} (ฉ) แบบรูปความเข้มสนามไฟฟ้าในโหมด HE_{-21} (ญ) แบบรูปความเข้มสนามแม่เหล็กในโหมด HE_{-21}

รูปที่ 4.5 (ก) - (ญ) แบบรูปความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้า
ของท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยตัวกลางไครรัลที่ $k_0 a = 3.0$

4.2 ท่อนำคลื่นไดอิเล็กทริกไครรัล (Dielectric Chirowaveguide)

ตัวอย่างที่สองคือท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยตัวกลางไครรัลที่มีภาคตัดขวางเป็นรูปวงกลมมีรัศมี a และมีผนังท่อนำคลื่นเป็นตัวนำไฟฟ้าสมบูรณ์แบบดังรูป 4.1 และมีการแบ่งอติเมนต์จำนวน 448 อติเมนต์ความสัมพันธ์ปรุงแต่งของตัวกลางไดอิเล็กทริกไครรัลลักษณะดังนี้

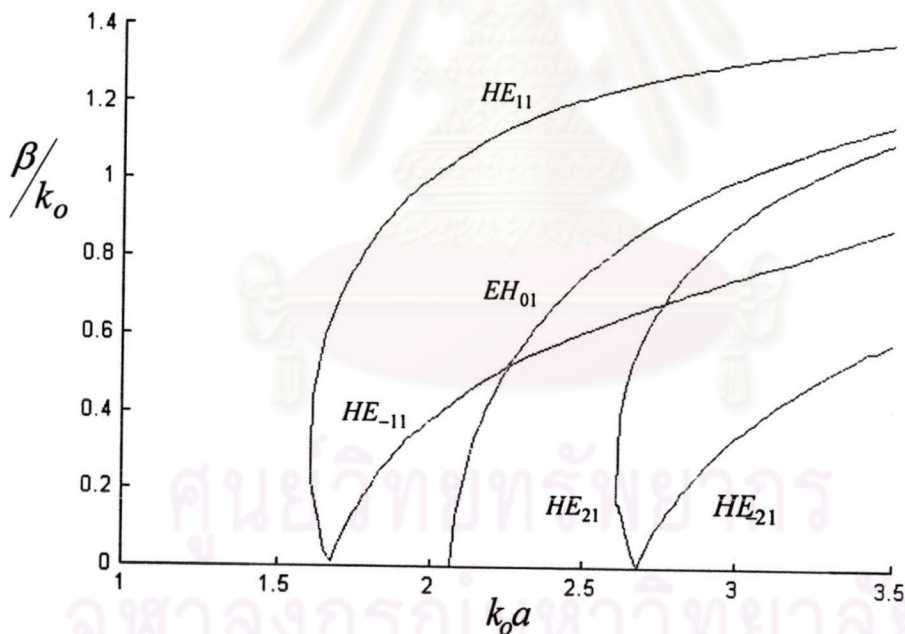
$$\bar{\bar{\epsilon}} = \begin{bmatrix} 1.2419 & 0.0 & 0 \\ 0.0 & 1.2419 & 0 \\ 0 & 0 & 1.2419 \end{bmatrix} \quad F/m \quad (4.2a)$$

$$\bar{\mu} = \begin{bmatrix} 1.0 & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & 1.0 & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & 1.0 \end{bmatrix} \quad H/m \quad (4.2b)$$

โดยมีค่าไครลิตี $\xi_c = 1 \text{ mS}$ ดังนั้นพารามิเตอร์ของการเชื่อมต่อไขว้ระหว่างสนามไฟฟ้ากับสนามแม่เหล็กดังกล่าวสัมพันธ์ปรุ่่งแต่งสมการที่ (2.3)

$$\bar{\xi} = \mu_0 \begin{bmatrix} 1.0 & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & 1.0 & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & 1.0 \end{bmatrix} \times 10^{-3} \quad F/(S \cdot m) \quad (4.2c)$$

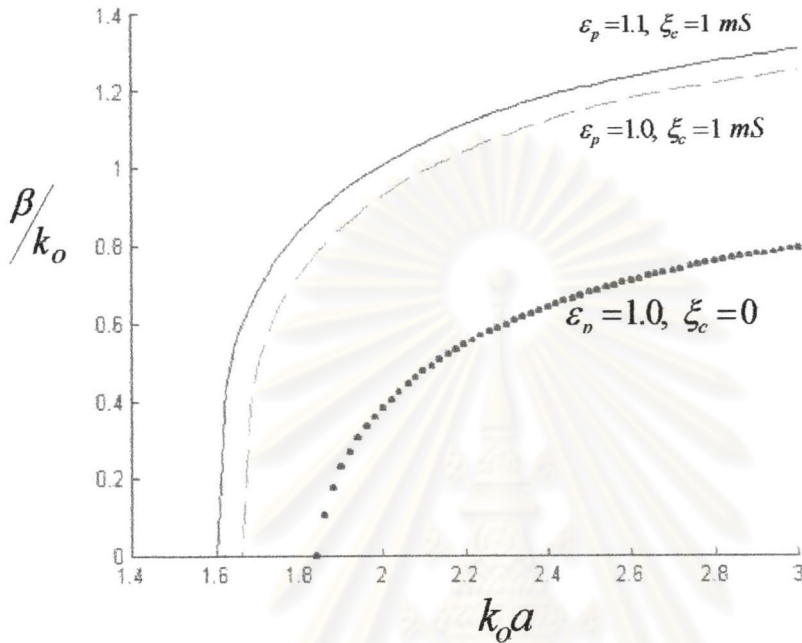
$$\bar{\xi} = \mu_0 \begin{bmatrix} 1.0 & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & 1.0 & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & 1.0 \end{bmatrix} \times 10^{-3} \quad H \cdot S/m \quad (4.2d)$$



รูปที่ 4.6 กราฟคิสเพอร์ชันของท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยตัวกลางไดอิเล็กทริกไครลิตีภาคตัดขวางขวางเป็นรูปวงกลมที่มีผนังท่อนำคลื่นเป็นตัวนำไฟฟ้าสมบูรณ์แบบ

ผลการวิเคราะห์การกระจายความถี่ที่บรรจุด้วยตัวกลางไดอิเล็กทริกไครลิตีที่มีความสัมพันธ์ปรุ่่งแต่งดังสมการที่ 4.2 โดยผลที่คำนวณได้จากระเบียบวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์โดยซัพพอร์ตจันรูปร่างเวกเตอร์อีลีเมนต์ขอบจะไม่เกิดผลเฉลยปลอมเทียมและ โมดที่เกิดขึ้นจะมีเพียงเฉพาะไฮบริดโหมดเท่านั้นและในแต่ละโหมดก็จะมีค่าคงตัวเฟสแยกออกเป็น 2 ค่าและมีเพียงโหมด EH เท่านั้นจะเกิดค่า

คงตัวเฟสเดียว ลักษณะเดียวกันกับท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยตัวกลางไคร์ลคือที่ความถี่คutoffมีโหมดเกิดขึ้นพร้อมกัน 2 โหมดและในแต่ละ โหมดก็จะมีทิศทางการโพลาไรซ์ต่างกัน เมื่อความถี่สูงค่า β ที่เกิดขึ้นก็จะมีค่าต่างกันมาก



รูปที่ 4.7 กราฟเปรียบเทียบคิสเซอร์ชันเมื่อมีค่าสภาพยอมเพิ่มขึ้นของท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยตัวกลางไดอิเล็กทริกไคร์ลมีภาคตัดขวางขวางเป็นรูปร่างกลมที่มีผนังท่อนำคลื่นเป็นตัวนำไฟฟ้าสมบูรณ์แบบ

ผลการเปรียบเทียบ โหมดที่เกิดขึ้นภายในท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยตัวกลางไดอิเล็กทริกไคร์ล เมื่อมีการเพิ่มค่าคงตัว ไดอิเล็กทริกและเปรียบเทียบกับกรณีที่ท่อนำคลื่นกลวง เมื่อเพิ่มค่าคงตัว ไดอิเล็กทริกในตัวกลางตัวกลางที่มีค่า ไดอิเล็กทริกมากจะมีความสามารถในการส่งพลังงานออกไปได้ก่อนนั้นก็คือจะเกิด โหมดพื้นฐานก่อน (fundamental mode) และเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีท่อนำคลื่นกลวงตัวกลางที่มีคุณสมบัติไคร์ลิตีจะมีความสามารถ ในการส่งพลังงานออกไปได้ก่อนเช่นกัน

4.3 ท่อนำคลื่นไคร์ลในตัวกลางไม่เอกพันธ์

ท่อนำคลื่นจะมีลักษณะดังรูปที่ 4.10 จะมีแกนกลางบรรจุด้วยตัวกลางที่มีคุณสมบัติไคร์ลที่มีค่าชายเข้มได้ ค่าสภาพยอม และค่าการคับปลิงระหว่างสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กเป็นค่าสเกลาร์ดังนี้

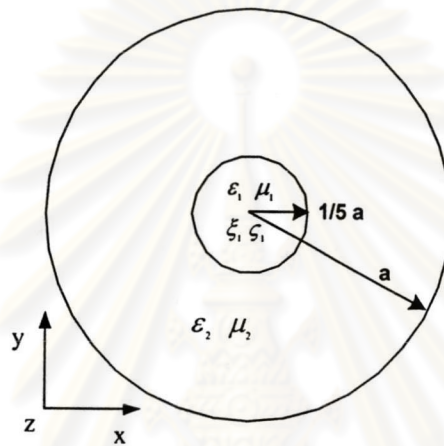
$$\epsilon_1 = 1.2419 \quad F/S \cdot m$$

$$\mu_1 = 1.0 \quad HS/m$$

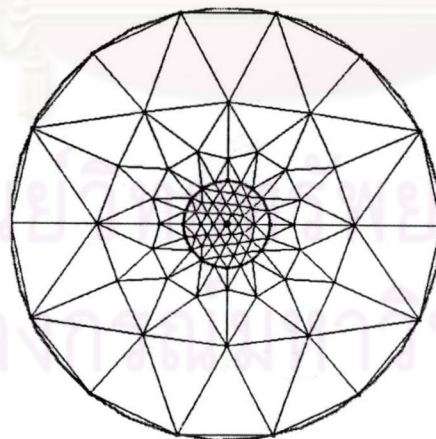
$$\zeta_1 = -\xi_1 = j\mu 1.0 \quad mS$$

ส่วนบริเวณรอบนอกจะเป็นตัวกลางที่ไม่มีคุณสมบัติไครต์

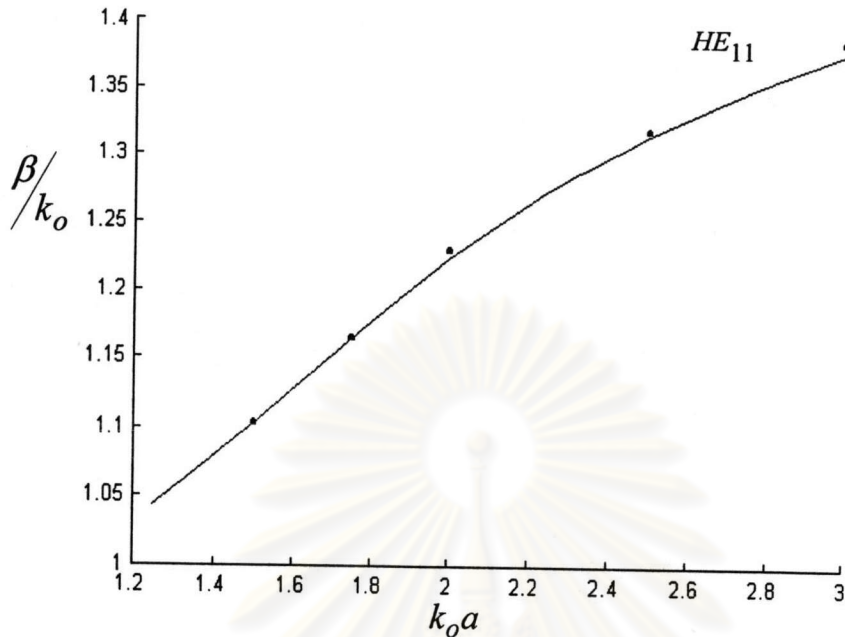
$$\epsilon_2 = 1.0, \mu_2 = 1.0$$



รูปที่ 4.8 (ก) ท่อนำคลื่นไดอิเล็กทริกไครต์



รูปที่ 4.8 (ข) ลักษณะการแบ่งอีลิเมนต์ท่อนำคลื่นไดอิเล็กทริกไครต์



รูปที่ 4.9 กราฟดิสเพอร์ชันของท่อนำคลื่นในโหมด HE_{11} ที่บรรจุด้วยตัวกลางไดอิเล็กทริกไครัล
 มีภาคตัดขวางเป็นรูวงกลมที่มีผนังท่อนำคลื่นเป็นตัวนำไฟฟ้าสมบูรณ์แบบ
 — แทนวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้ฟังก์ชันรูปร่างอีลีเมนต์ขอบเวกเตอร์
 ● แทนวิธีโหมดคัปปลิง นำเสนอโดย Xu (1995)

รูปที่ 4.9 แสดงดิสเพอร์ชันของท่อนำคลื่นในโหมด HE_{11} ภายในท่อนำคลื่นโดยแกนใน (core) ที่บรรจุด้วยตัวกลางไบแอนไอโซทรอปิกส่วนแกนนอก (clad) ที่บรรจุด้วยตัวกลางไดอิเล็กทริก โดยมีผนังท่อนำคลื่นเป็นตัวนำไฟฟ้าสมบูรณ์โดยจะสังเกตค่า $\beta/k_0 > 1$ เปรียบเทียบเห็นได้ว่ามีความสอดคล้องกับ Xu [20]

4.4 ท่อนำคลื่นเฟอร์ไรต์ไครัล (Ferrite-Chiral waveguide)

เฟอร์ไรต์ไครัลจัดเป็นตัวกลางไบแอนไอโซทรอปิกอีกชนิดหนึ่ง ชนิดนี้จะใช้ลักษณะอันโดดเด่นของคุณสมบัติไครัลและคุณสมบัติเฟอร์ไรต์ร่วมกันซึ่งจะวิเคราะห์ในกรณีท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยตัวกลางเฟอร์ไรต์ไครัลที่ไม่มีการสูญเสีย โดยในกรณีนี้มีเทนเซอร์เมทริกซ์ความซาบซึมได้สนามแม่เหล็กอยู่ไม่อยู่ในรูปในแนวทแยงดังนี้

$$\bar{\mu} = \mu_o(\bar{a}_x\bar{a}_x + \bar{a}_y\bar{a}_y + \bar{a}_z\bar{a}_z) - j\mu_o\mu_a(\bar{a}_x\bar{a}_y - \bar{a}_y\bar{a}_x) \quad (4.3)$$

4.4.1 ท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยตัวกลางเฟอร์ไรต์ไคร์ลในกรณี $\mu_a = \pm 0.25$

ส่วนเมทริกซ์เทนเซอร์สภาพยอมนั้นจะอยู่ในแนวทแยง โดยในกรณีนี้พิจารณาค่า μ_a ดังสมการ (4.3) $\mu_a = 0.25$ และ $\mu_a = -0.25$ ซึ่งจะมีพารามิเตอร์ความสัมพันธ์ปรุ่่งแต่งดังนี้

$$\bar{\bar{\epsilon}} = \begin{bmatrix} 1.1419 & -0.0355j & 0 \\ 0.0355j & 1.1419 & 0 \\ 0 & 0 & 1.1419 \end{bmatrix} \quad F/m \quad (4.4a)$$

$$\bar{\bar{\mu}} = \begin{bmatrix} 1.0 & -0.25j & 0 \\ 0.25j & 1.0 & 0 \\ 0 & 0 & 1.0 \end{bmatrix} \quad H/m \quad (4.4b)$$

โดยมีค่าไคร์ลิตี $\xi_c = 1 \text{ mS}$ ดังนั้นพารามิเตอร์ของการเชื่อมต่อไขว้ระหว่างสนามไฟฟ้ากับสนามแม่เหล็กดังความสัมพันธ์ปรุ่่งแต่งสมการที่ (2.3)

$$\bar{\bar{\xi}} = \mu_o \begin{bmatrix} j & 0.25 & 0 \\ -0.25 & j & 0 \\ 0 & 0 & j \end{bmatrix} \times 10^{-3} \quad F/S \cdot m \quad (4.4c)$$

$$\bar{\bar{\zeta}} = \mu_o \begin{bmatrix} -j & -0.25 & 0 \\ 0.25 & -j & 0 \\ 0 & 0 & -j \end{bmatrix} \times 10^{-3} \quad H \cdot S/m \quad (4.4d)$$

และกรณี $\mu_a = -0.25$

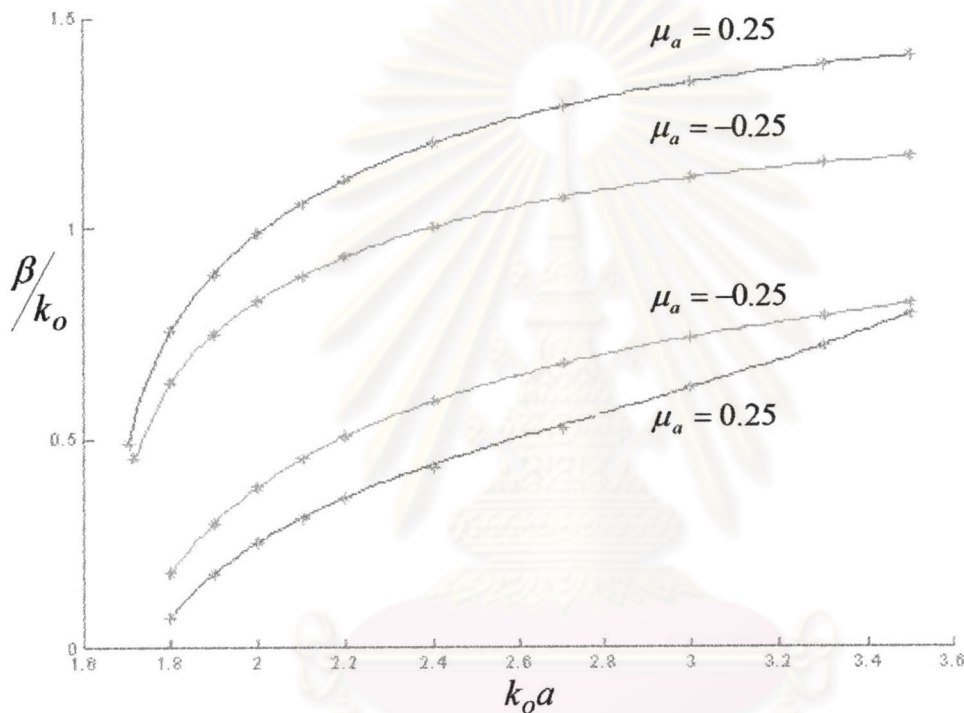
$$\bar{\bar{\epsilon}} = \begin{bmatrix} 1.1419 & 0.0355j & 0 \\ -0.0355j & 1.1419 & 0 \\ 0 & 0 & 1.2419 \end{bmatrix} \quad F/m \quad (4.5a)$$

$$\bar{\bar{\mu}} = \begin{bmatrix} 1.0 & 0.25j & 0 \\ -0.25j & 1.0 & 0 \\ 0 & 0 & 1.0 \end{bmatrix} \quad H/m \quad (4.5b)$$

ลักษณะเดียวกันเมื่อมีค่าไคร์ลิตี $\xi_c = 1 \text{ mS}$ พารามิเตอร์ของการเชื่อมต่อไขว้ระหว่างสนามไฟฟ้ากับสนามแม่เหล็กจะมีค่าดังนี้

$$\underline{\underline{\xi}} = \mu_o \begin{bmatrix} j & -0.25 & 0 \\ 0.25 & j & 0 \\ 0 & 0 & j \end{bmatrix} \times 10^{-3} \quad F/S \cdot m \quad (4.5c)$$

$$\underline{\underline{\xi}} = \mu_o \begin{bmatrix} -j & 0.25 & 0 \\ -0.25 & -j & 0 \\ 0 & 0 & -j \end{bmatrix} \times 10^{-3} \quad H \cdot S / m \quad (4.5d)$$



รูปที่ 4.10 กราฟคิสเพอร์ชันของท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยตัวกลางเฟอร์ไรต์โคริตที่มี

ภาคตัดขวางเป็นรูปวงกลมและมีผนังท่อนำคลื่นเป็นตัวนำไฟฟ้าสมบูรณ์แบบ

โดยที่ — แทนวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ที่ใช้ฟังก์ชันรูปร่างเวกเตอร์อีลิเมนต์ขอบ

* แทนวิธีคัปปลิงโมดที่นำเสนอโดย Xu [20]

จากรูปที่ 4.10 แสดงผลการวิเคราะห์กราฟคิสเพอร์ชันของท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยตัวกลางเฟอร์ไรต์โคริตโดยแสดงการเปรียบเทียบค่าคงตัวเฟสโมดเจาะจง HE_{11} และ HE_{-11} ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์แบ่งภาคตัดขวางท่อนำคลื่น 281 อีลิเมนต์โดยมีจำนวนตัวแปรไม่ทราบค่า 501 ตัวแปร ที่มีค่าซ้ำซึ่งดังสมการที่ (4.10) และ (4.11) ผลลัพธ์ที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัย Xu [20] และไม่เกิดผลเฉลยปลอมเทียมและเห็นได้ว่าเมทริกซ์เทนเซอร์ความซ้ำซึ่งสนามแม่เหล็กที่ไม่อยู่ในแนวทแยง (diagonal) ซึ่งมีค่า $\mu_a = \pm 0.25$ ทำให้ค่าคงตัวเฟสในโมด HE_{11} มีค่าค่อนข้างสูงและ

แนวทแยง (diagonal) ซึ่งมีค่า $\mu_a = \pm 0.25$ ทำให้ค่าคงตัวเฟสในโหมด HE_{11} มีค่าค่อนข้างสูงและในทางตรงกันข้ามค่าคงตัวในโหมด HE_{-11} มีค่าค่อนข้างต่ำหากลดค่า μ_a และ ξ_c ให้มีค่าน้อยมากจนเข้าใกล้ศูนย์โหมดที่เกิดขึ้นขึ้นภายในท่อนำคลื่นซึ่งมีเฉพาะไฮบริด โหมดนั้นจะเปลี่ยนเป็นเฉพาะโหมดสนามแม่เหล็กหรือ TE เท่านั้น

4.4.2 ท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยตัวกลางเฟอร์ไรต์ไดรัลในกรณี $\mu_a = \pm 0.5$

เมื่อเพิ่มค่าความซาบซึมได้ μ_a

กรณี $\mu_a = 0.5$

$$\bar{\bar{\epsilon}} = \begin{bmatrix} 1.1419 & 0.00710j & 0 \\ -0.0710j & 1.1419 & 0 \\ 0 & 0 & 1.1419 \end{bmatrix} \quad F/m \quad (4.6a)$$

$$\bar{\bar{\mu}} = \begin{bmatrix} 1.0 & -0.5j & 0 \\ 0.5j & 1.0 & 0 \\ 0 & 0 & 1.0 \end{bmatrix} \quad H/m \quad (4.6b)$$

โดยมีค่าไดรัลลิตี $\xi_c = 1 \text{ mS}$ ดังนั้นพารามิเตอร์ของการเชื่อมต่อไขว้ระหว่างสนามไฟฟ้ากับสนามแม่เหล็กจึงความสัมพันธ์ปรุ่่งแต่งสมการที่ (2.3)

$$\bar{\bar{\xi}} = \mu_o \begin{bmatrix} j & 0.5 & 0 \\ -0.5 & j & 0 \\ 0 & 0 & j \end{bmatrix} \times 10^{-3} \quad F/S \cdot m \quad (4.6c)$$

$$\bar{\bar{\zeta}} = \mu_o \begin{bmatrix} -j & -0.5 & 0 \\ 0.5 & -j & 0 \\ 0 & 0 & -j \end{bmatrix} \times 10^{-3} \quad H \cdot S/m \quad (4.6d)$$

กรณี $\mu_a = -0.5$

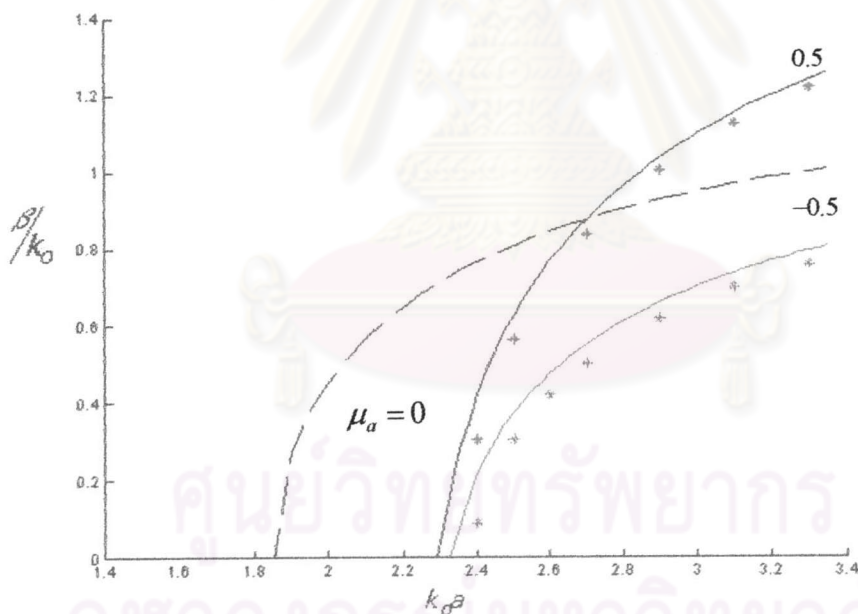
$$\bar{\bar{\epsilon}} = \begin{bmatrix} 1.1419 & 0.00710j & 0 \\ -0.0710j & 1.1419 & 0 \\ 0 & 0 & 1.1419 \end{bmatrix} \quad F/m \quad (4.7a)$$

$$\bar{\mu} = \begin{bmatrix} 1.0 & 0.5j & 0 \\ -0.5j & 1.0 & 0 \\ 0 & 0 & 1.0 \end{bmatrix} \quad H/m \quad (4.7b)$$

โดยมีค่าไคร์ลิตี $\xi_c = 1 \text{ mS}$ ดังนั้นพารามิเตอร์ของการเชื่อมต่อไขว้ระหว่างสนามไฟฟ้ากับสนามแม่เหล็กดังกล่าวสัมพันธ์ปรุ่่งแต่งสมการที่ (2.3)

$$\bar{\xi} = \mu_o \begin{bmatrix} j & -0.5 & 0 \\ 0.5 & j & 0 \\ 0 & 0 & j \end{bmatrix} \times 10^{-3} \quad F/S \cdot m \quad (4.7c)$$

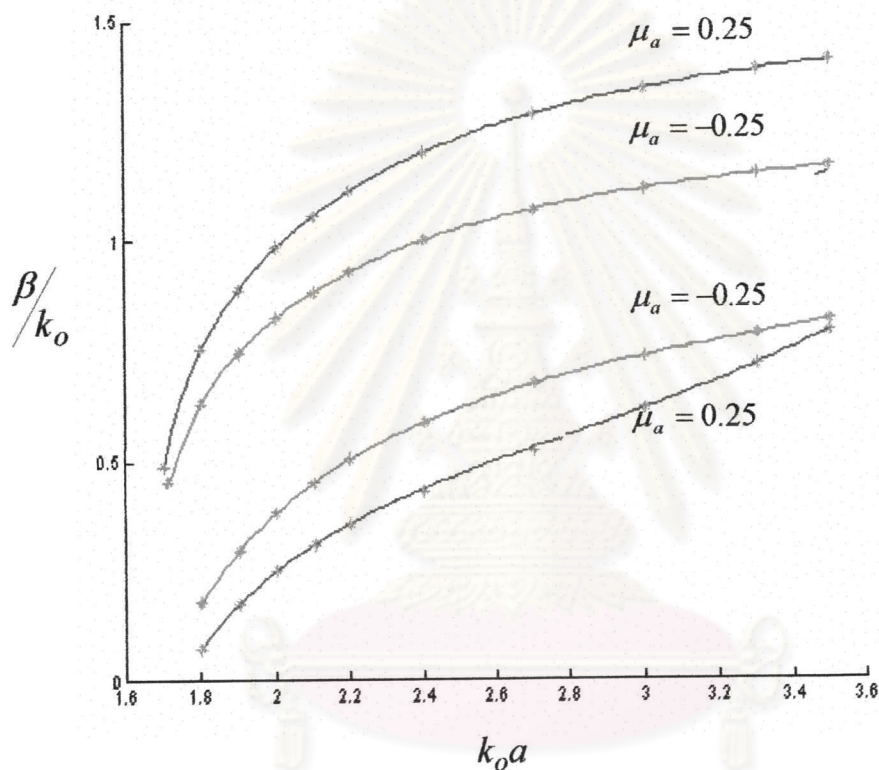
$$\bar{\zeta} = \mu_o \begin{bmatrix} -j & 0.5 & 0 \\ -0.5 & -j & 0 \\ 0 & 0 & -j \end{bmatrix} \times 10^{-3} \quad H \cdot S/m \quad (4.7d)$$



รูปที่ 4.11 กราฟดิสเพอร์ชันของท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยตัวกลางเฟอร์ไรต์ไคร์ลิตีที่มีภาคตัดขวางเป็นรูปร่างกลมและมีผนังท่อนำคลื่นเป็นตัวนำไฟฟ้าสมบูรณ์แบบในโหมด EH_{01}
 — แทนวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ที่ใช้ฟังก์ชันรูปร่างเวกเตอร์อีลิเมนต์ขอบ
 * แทนวิธีคัปปลิง โมดที่นำเสนอ โดย Xu, (1995)

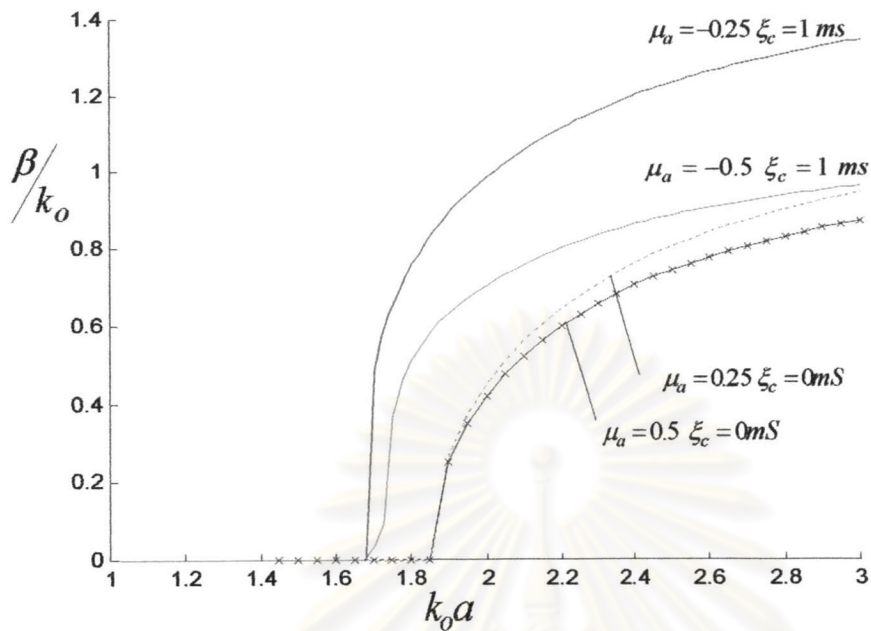
$$\bar{\xi} = \mu_o \begin{bmatrix} j & -0.25 & 0 \\ 0.25 & j & 0 \\ 0 & 0 & j \end{bmatrix} \times 10^{-3} \quad F/S \cdot m \quad (4.5c)$$

$$\bar{\xi} = \mu_o \begin{bmatrix} -j & 0.25 & 0 \\ -0.25 & -j & 0 \\ 0 & 0 & -j \end{bmatrix} \times 10^{-3} \quad H \cdot S/m \quad (4.5d)$$



รูปที่ 4.10 กราฟดิสเพอร์ชันของท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยตัวกลางเฟอร์ไรต์ไคร์ดที่มี
ภาคตัดขวางเป็นรูปวงกลมและมีผนังท่อนำคลื่นเป็นตัวนำไฟฟ้าสมบูรณ์แบบ
โดยที่ — แทนวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ที่ใช้ฟังก์ชันรูปร่างเวกเตอร์อีลิเมนต์ขอบ
* แทนวิธีคัปปลิง โมดที่นำเสนอโดย Xu [20]

จากรูปที่ 4.10 แสดงผลการวิเคราะห์กราฟดิสเพอร์ชันของท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยตัวกลาง
เฟอร์ไรต์ไคร์ด โดยแสดงการเปรียบเทียบค่าคงตัวเฟส โมดเจาะจง HE_{11} และ HE_{-11} ด้วยระเบียบวิธี
ไฟไนต์อีลิเมนต์แบ่งภาคตัดขวางท่อนำคลื่น 281 อีลิเมนต์ โดยมีจำนวนตัวแปรไม่ทราบค่า 501 ตัว
แปร ที่มีค่าขอบเข้ดังสมการที่ (4.10) และ (4.11) ผลลัพธ์ที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัย Xu [20] และ
ไม่เกิดผลเฉลยปลอมเทียมและเห็นได้ว่าเมทริกซ์เทนเซอร์ความซับซ้อนสนามแม่เหล็กที่ไม่อยู่ใน



รูปที่ 4.12 (ข) กราฟเปรียบเทียบคิสเพอร์ชันของท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยตัวกลางเฟอร์ไรต์ไคร์ด
แปรผัน μ_a มีค่าที่มีค่าลดลงในโหมด HE_{11}

จากรูปที่ 4.12 (ก) และ (ข) จะเป็นการยืนยันว่าเมื่อมีการลดค่า μ_a และค่าไคร์ดลิตีลงน้อย
มากจนเข้าสู่ศูนย์นั้น โหมด ไฮบริดที่เกิดเฉพาะในท่อนำคลื่นนั้นจะแปรเปลี่ยนเป็นโหมดสนามแม่เหล็ก
หรือ TE โหมดนั้นเป็นจริงดังผลการวิจัยอีกตัวกลางไบแอนไอโซทรอปิกมีแม่นยำมากขึ้น

4.5 สรุป

การวิเคราะห์การกระจายความถี่ที่เกิดขึ้นภายในท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยตัวกลางไบแอนไอโซ
ทรอปิกดังเช่น ตัวกลางไคร์ด ตัวกลางไดอิเล็กทริกไคร์ดและเฟอร์ไรต์ไคร์ด ผลที่ปรากฏแสดง
ให้เห็นถึงตัวกลางมีผลกระทบต่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เคลื่อนที่เข้าไปในท่อนำคลื่น โดยโหมดที่
เกิดขึ้นภายในท่อนำคลื่นมีเพียงเฉพาะ โหมดไฮบริดและหากผันแปรค่าไคร์ดจาก 0.2-1.0 mS เห็นได้
ว่าตัวกลางที่มีค่าไคร์ดสูงจะเกิด โหมดคัตออฟต่ำกว่าตัวกลางที่มีค่าไคร์ดต่ำ