

บทที่ 3

วิเคราะห์โมดเจจางและการหมุนฟาราเดย์ของท่อนำคลื่นใจโรแมกเนติกด้วยวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์

ความนำ

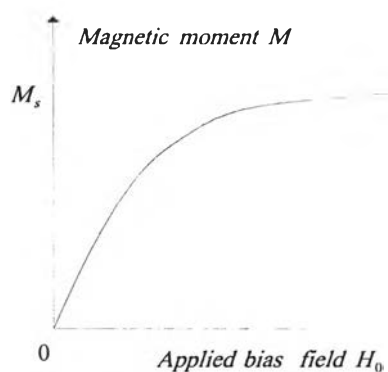
บทนี้แสดงการวิเคราะห์โมดเจจางและการหมุนฟาราเดย์ของท่อนำคลื่นใจโรแมกเนติก ด้วยวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ได้รับการปรับปรุงโดยผู้เสนอวิทยานิพนธ์ดังกล่าวมาแล้วในบทที่ 2 ท่อนำคลื่นใจโรแมกเนติกที่นำมาวิเคราะห์มี 3 แบบ คือ ท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยวัสดุใจโรแมกเนติกมีภาคตัดขวางรูปวงกลม ท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยวัสดุใจโรแมกเนติกมีภาคตัดขวางรูปวงรี และท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยวัสดุใจโรแมกเนติกมีภาคตัดขวางรูปวงกลมไม่เอกพันธ์ ส่วนแรกของบทนี้จะกล่าวถึงการวิเคราะห์โมดเจจางของท่อนำคลื่น ที่เปลี่ยนแปลงตามพารามิเตอร์ของเทนเซอร์ความซาบซิมได้ ขนาดรัศมีท่อนำคลื่น และค่าความถี่ย่านไมโครเวฟ จากนั้นเป็นการเสนอผลการคำนวณเปรียบเทียบที่ได้เสนอโดยผู้วิจัยอื่น และส่วนที่สองที่นำเสนอในบทนี้คือการวิเคราะห์การหมุนฟาราเดย์ของโมดพื้นฐาน โพลาริเซชันของความเข้มสนามไฟฟ้าในท่อนำคลื่น และมุมการหมุนของสนามที่เดินทางในท่อนำคลื่นเมื่อเปลี่ยนแปลงตามความถี่ ค่าอำนาจแม่เหล็กอิ่มตัว (saturation magnetization) และค่าการไปแอสสนามแม่เหล็กสถิต

เทนเซอร์ความซาบซิมได้

วัสดุใจโรแมกเนติกที่นำมาศึกษาในงานวิจัยนี้ คือ เฟอร์ไรต์ ที่มีการไปแอสสนามแม่เหล็กสถิตในแนวแกนการเคลื่อนที่ของคลื่น โดยถือว่าเฟอร์ไรต์มีความสูญเสียน้อยมากที่ความถี่ย่านไมโครเวฟ ถ้ากำหนดว่าแกน z คือแกนของท่อนำคลื่นและไปแอสสนามแม่เหล็กสถิตด้วย $\mathbf{H}_0 = H_0 \mathbf{a}_z$ แล้วความสัมพันธ์ของค่าอำนาจแม่เหล็กกับความเข้มสนามแม่เหล็กในเฟอร์ไรต์สามารถแสดงได้ดังนี้ (Pojar, 1990)

$$\frac{d\mathbf{M}}{dt} = -\mu_0 \eta (\mathbf{M} \times \mathbf{H}) \quad (3.1)$$

ในที่นี้ \mathbf{H} คือ สนามแม่เหล็กสถิตที่ไปแอสให้วัสดุสารแม่เหล็กรวมกับความเข้มสนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา, \mathbf{M} คืออำนาจแม่เหล็ก (magnetization) และ η คืออัตราส่วนใจโรแมกเนติก (gyromagnetic ratio) สำหรับเฟอร์ไรต์จะแทนอัตราส่วนใจโรแมกเนติกด้วยอัตราส่วนของ η / μ_0 เท่ากับ $1.76 \times 10^{11} \text{ rad/sT} (28 \text{ GHz/T})$



รูปที่ 3.1 โมเมนต์แม่เหล็กของวัสดุสารแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงตามการไบแอส H_0

จากสมการความสัมพันธ์ของค่าอำนาจแม่เหล็กกับความเข้มสนามแม่เหล็กตามสมการ (3.1) จะเป็นความสัมพันธ์ระหว่าง \mathbf{H} กับ \mathbf{M} โดยถ้าเราเพิ่มความเข้มสนามแม่เหล็กสถิต H_0 มีค่ามากขึ้น ทำให้โมเมนต์แม่เหล็ก (magnetic moment) มีขนาดเพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้นในช่วงเริ่มต้นและเมื่อ H_0 เพิ่มขึ้นจนถึงที่ค่า ๆ หนึ่ง โมเมนต์แม่เหล็กเพิ่มจนถึงค่าอำนาจแม่เหล็กอิ่มตัวและขนาดจะคงที่ตลอดดังแสดงในรูป 3.1 เฟอร์ไรต์ที่ใช้ในย่านความถี่ไมโครเวฟโดยมากจะกำหนดจุดทำงานที่สภาวะอำนาจแม่เหล็กอิ่มตัว คือ ที่ค่า M_s โดยทั่วไปมีค่าอยู่ในช่วง $4\pi M_s = 300 - 5000 \text{ G}$ จากสมการ (3.1) \mathbf{H} ประกอบด้วยสนามแม่เหล็กสถิตและความเข้มสนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ถ้าเรากำหนดให้ความเข้มสนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาด้วย \mathbf{H}_a ดังนั้นความเข้มสนามแม่เหล็กในเฟอร์ไรต์ทั้งหมดเขียนได้ดังนี้

$$\mathbf{H} = H_0 \mathbf{a}_z + \mathbf{H}_a \quad (3.2)$$

ในทางปฏิบัติค่าสนามแม่เหล็กสถิตจะมีค่ามากกว่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงตามเวลามากหรือถือได้ว่า $|\mathbf{H}_a| \ll H_0$ ความเข้มสนามแม่เหล็กนี้ทำให้เกิดค่าอำนาจแม่เหล็ก ดังนั้นผลรวมของอำนาจแม่เหล็กทั้งหมดในเฟอร์ไรต์เขียนได้ดังนี้

$$\mathbf{M} = M_s \mathbf{a}_z + \mathbf{M}_a \quad (3.3)$$

เมื่อ M_s คือ ค่าอำนาจแม่เหล็กอิ่มตัวและ \mathbf{M}_a คือ ค่าอำนาจแม่เหล็กบนระนาบ $x-y$ ที่เกิดขึ้นจาก \mathbf{H}_a จากนั้นแทนสมการ (3.2) และ สมการ (3.3) ในสมการ (3.1) จะได้สมการ 3 องค์ประกอบของการเคลื่อนที่

$$\frac{dM_x}{dt} = -\mu_0\eta M_y(H_0 + H_z) + \mu_0\eta(M_s + M_z)H_y \quad (3.4a)$$

$$\frac{dM_y}{dt} = \mu_0\eta M_x(H_0 + H_z) - \mu_0\eta(M_s + M_z)H_x \quad (3.4b)$$

$$\frac{dM_z}{dt} = -\mu_0\eta M_x H_y + \mu_0\eta M_y H_x \quad (3.4c)$$

จากความจริงที่ว่า $\frac{dM_s}{dt} = 0$ และ $|\mathbf{H}_a| \ll H_0$ ทำให้เราได้ความสัมพันธ์ คือ $M_a \|\mathbf{H}_a\| \ll M_s |H_0|$ และ $M_a \|\mathbf{H}_a\| \ll M_s |\mathbf{H}_a|$ เป็นจริง ด้วยเหตุนี้พจน์ของผลคูณที่ประกอบด้วย MH จึงสามารถละทิ้งได้ ดังนั้นสมการ (3.4) เขียนใหม่โดยใช้ความสัมพันธ์ดังกล่าวมานี้จึงมีสมการเป็น

$$\frac{dM_x}{dt} = -\omega_0 M_y + \omega_m H_y \quad (3.5a)$$

$$\frac{dM_y}{dt} = \omega_0 M_x - \omega_m H_x \quad (3.5b)$$

$$\frac{dM_z}{dt} = 0 \quad (3.5c)$$

เมื่อ $\omega_0 = \mu_0\eta H_0$ เป็นความถี่เรโซแนนซ์ของเฟอร์ไรต์และ $\omega_m = \mu_0\eta M_s$ จากสมการ (3.5a), สมการ (3.5b) และ สมการ (3.5c) ถ้ากำหนดให้เวกเตอร์ของสนามทุกองค์ประกอบมีส่วนเปลี่ยนแปลงทางเวลาในรูปของ $\exp(j\omega t)$ เพราะฉะนั้นเราสามารถเปลี่ยนสมการ (3.5a) และ สมการ (3.5b) ในรูปของเฟสเซอร์ได้ดังนี้

$$(\omega_0^2 - \omega^2)M_x = \omega_0\omega_m H_x + j\omega\omega_m H_y \quad (3.6a)$$

$$(\omega_0^2 - \omega^2)M_y = -j\omega\omega_m H_x + \omega_0\omega_m H_y \quad (3.6b)$$

จากสมการ (3.6a) และสมการ (3.6b) เป็นระบบสมการที่แสดงความสัมพันธ์ที่เป็นเชิงเส้นระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กและอำนาจแม่เหล็กซึ่งเขียนในรูปของเทนเซอร์ดังนี้

$$\mathbf{M} = [\chi]\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \chi_{xx} & \chi_{xy} & 0 \\ \chi_{yx} & \chi_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \mathbf{H} \quad (3.7)$$

โดยที่สมาชิกในเทนเซอร์ $[\chi]$ จะเปลี่ยนแปลงโดยขึ้นอยู่กับ ความถี่ที่ใช้งาน ω , ค่าสนามแม่เหล็กสถิต H_0 และ ค่าอำนาจแม่เหล็กอิ่มตัว M_s ดังนี้

$$\chi_{xx} = \chi_{yy} = \frac{\omega_0 \omega_m}{\omega_0^2 - \omega^2} \text{ และ } \chi_{xy} = -\chi_{yx} = \frac{j\omega \omega_m}{\omega_0^2 - \omega^2} \quad (3.8)$$

ความสัมพันธ์ของความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กกับความเข้มสนามแม่เหล็กมีรูปแบบโดยทั่วไปเป็น

$$\mathbf{B} = \mu_0 (\mathbf{M} + \mathbf{H}) = [\mu] \mathbf{H} \quad (3.9)$$

ดังนั้นเมื่อแทนสมการ (3.7) ลงในสมการ (3.9) แล้วจึงทำให้เราได้เทนเซอร์ความซาบซึมได้ที่เกิดจากการไบแอสสนามแม่เหล็กสถิตในแนวแกน z ดังนี้

$$[\mu] = \begin{bmatrix} \mu & j\kappa & 0 \\ -j\kappa & \mu & 0 \\ 0 & 0 & \mu_0 \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

โดยที่

$$\mu = \mu_0 \left(1 + \frac{\omega_0 \omega_m}{\omega_0^2 - \omega^2} \right) \text{ และ } \kappa = \mu_0 \left(\frac{\omega \omega_m}{\omega_0^2 - \omega^2} \right) \quad (3.11)$$

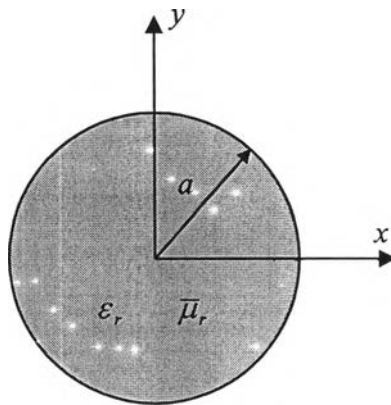
จากเทนเซอร์ในสมการ (3.10) ได้มีการค้นพบเป็นครั้งแรกโดย Polder (1949) ซึ่งในบางครั้งจะเรียกว่า เทนเซอร์โพลเดอร์ (Polder tensor) วัสดุสารแม่เหล็กที่มีเทนเซอร์ความซาบซึมได้ ตามสมการนี้ จะเรียกว่า ไจโรโทรอปิก (gyrotropic) หมายถึงทิศทางการไบแอสสนามแม่เหล็กสถิตมีทิศทางเดียวกับทิศการเคลื่อนที่ของคลื่น ถ้าเราลบบิติศทางการไบแอส (reverse bias) เป็นผลทำให้ค่า ω_0 และ ω_m มีเครื่องหมายที่เปลี่ยนไป ค่า μ ไม่เปลี่ยนแปลงแต่ค่า κ มีเครื่องหมายที่เปลี่ยนไปโดยเป็นหลักการทางงานแบบไว้ภาวะย้อนกลับ กรณีการไบแอสมีการลดค่าสนามแม่เหล็กสถิตอย่างช้าจนทำให้ H_0 เข้าใกล้ศูนย์และจะทำให้ค่า M_s มีค่าเข้าใกล้ศูนย์เช่นกัน โดยจะเรียกการเกิดปรากฏการณ์เช่นนี้ว่า การเลื่อมของอำนาจแม่เหล็ก (demagnetized) คือมีค่า $\omega_0 = \omega_m = 0$ จึงสรุปได้ว่าค่า $\mu = \mu_0$ และ $\kappa = 0$ เปรียบเสมือนว่าตัวกลางทางไฟฟ้าไม่ได้เป็นสารแม่เหล็กอีกต่อไป

วิเคราะห์โมดเฉพาะของท่อนำคลื่นใยโรแมกเนติก

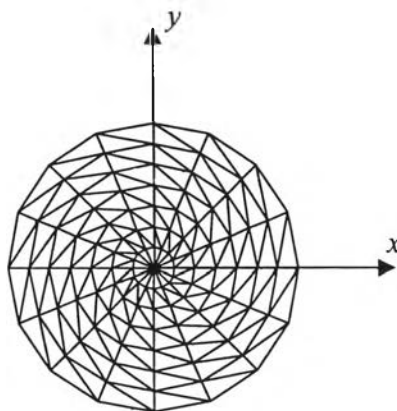
ท่อนำคลื่นใยโรแมกเนติกเป็นท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยวัสดุใยโรแมกเนติก เช่น เฟอร์ไรต์ และมีผนังท่อนำคลื่นเป็นตัวนำไฟฟ้าสมบูรณ์หรือตัวนำแม่เหล็กสมบูรณ์ โดยมีเทนเซอร์ความซบซิมได้ตามสมการ (3.10) ในหัวข้อนี้จะเป็นการศึกษาค่าคงตัวเฟสของคลื่นด้วยวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่เสนอในวิทยานิพนธ์นี้โดยใช้ฟังก์ชันรูปร่างอีลีเมนต์ขอบ ในตัวอย่างของท่อนำคลื่นจำนวน 3 ตัวอย่างด้วยกัน คือ ท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยวัสดุใยโรแมกเนติกมีภาคตัดขวางรูปวงกลม ท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยวัสดุใยโรแมกเนติกมีภาคตัดขวางรูปวงรี และท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยวัสดุใยโรแมกเนติกมีภาคตัดขวางรูปวงกลมไม่เอกพันธ์

1. ท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยวัสดุใยโรแมกเนติกมีภาคตัดขวางรูปวงกลม

ท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยวัสดุใยโรแมกเนติกมีภาคตัดขวางรูปวงกลม รัศมีเท่ากับ a มีผนังท่อนำคลื่นเป็นตัวนำไฟฟ้าสมบูรณ์หรือตัวนำแม่เหล็กสมบูรณ์ ดังรูปที่ 3.2

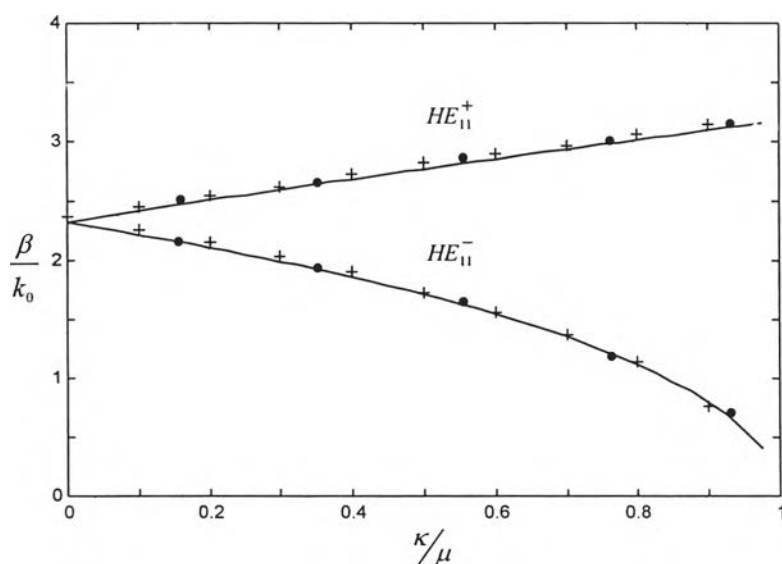


รูปที่ 3.2 ท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยวัสดุใยโรแมกเนติกมีภาคตัดขวางรูปวงกลม



รูปที่ 3.3 การแบ่งอีลีเมนต์ของท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยวัสดุใยโรแมกเนติกมีภาคตัดขวางรูปวงกลม

แบ่งอีลีเมนต์ย่อย ๆ เป็นรูปสามเหลี่ยมดังรูปที่ 3.3 โดยในที่นี้จะกำหนดเป็น 2 กรณีคือ กรณีที่ 1 การแบ่งอีลีเมนต์จำนวน 208 อีลีเมนต์เมื่อใช้ฟังก์ชันรูปร่างอีลีเมนต์ขอบคงที่ มีจำนวนตัวแปรที่ไม่ทราบค่าของสนามก่อนกำหนดเงื่อนไขขอบเขตและหลังกำหนดเงื่อนไขขอบเขตเท่ากับ 320 และ 304 ตามลำดับ กรณีที่ 2 การแบ่งอีลีเมนต์จำนวน 75 อีลีเมนต์เมื่อใช้ฟังก์ชันรูปร่างอีลีเมนต์ขอบเชิงเส้น มีจำนวนตัวแปรที่ไม่ทราบค่าของสนามก่อนกำหนดเงื่อนไขขอบเขตและหลังกำหนดเงื่อนไขขอบเขตเท่ากับ 390 และ 360 ตามลำดับ โดยได้ทำการนอร์มาไลซ์สมาชิกของเทนเซอร์ความขบซึ่มได้ด้วยค่า κ/μ เพื่อความสะดวกในการคำนวณกรณีที่ ไม่จำเป็นต้องพิจารณาถึงค่าความถี่ ค่าอำนาจแม่เหล็กอิมิตัวและค่าการไบแอสสนามแม่เหล็กสถิตและนอร์มาไลซ์ค่าคงตัวเฟสด้วย k_0 โดยที่ $k_0^2 = \omega^2 \mu_0 \epsilon_0$



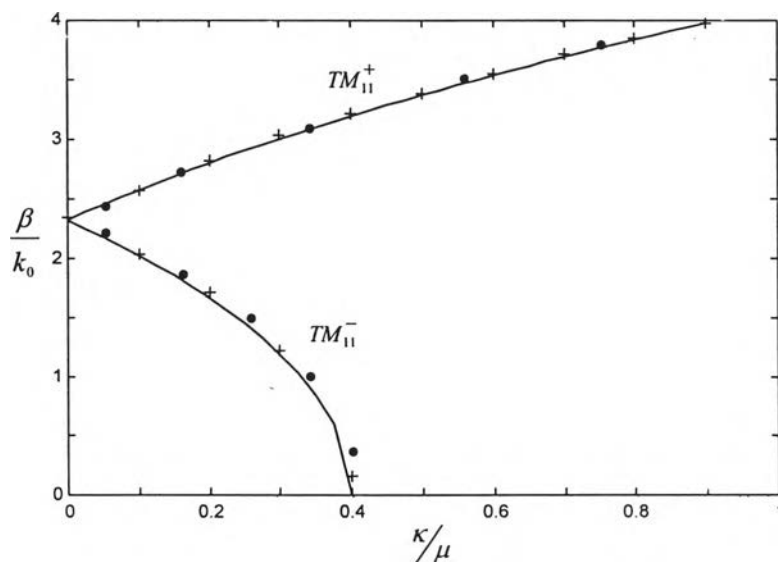
รูปที่ 3.4 กราฟดิสเพอร์ชันของท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยวัสดุโรแมกเนติกมีภาคตัดขวางรูปวงกลม ผนังท่อนำคลื่นเป็นตัวนำไฟฟ้าสมบูรณ์ เมื่อ - แทนวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้ฟังก์ชันรูปร่างอีลีเมนต์ขอบคงที่

- แทนวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้ฟังก์ชันรูปร่างอีลีเมนต์ขอบเชิงเส้น + แทน Gibson (1989)

รูปที่ 3.4 แสดงผลการวิเคราะห์กราฟดิสเพอร์ชันของท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยวัสดุโรแมกเนติกมีภาคตัดขวางรูปวงกลม ผนังท่อนำคลื่นเป็นตัวนำไฟฟ้าสมบูรณ์ ตัวกลางโรแมกเนติกมีค่า $\mu=1.0$ และ $\epsilon_r=15.0$ กำหนด $k_0 a=0.6$ โดยเส้นทึบแทนวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้ฟังก์ชันรูปร่างอีลีเมนต์ขอบคงที่และสัญลักษณ์จุดแทนวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้ฟังก์ชันรูปร่างอีลีเมนต์ขอบเชิงเส้น สอดคล้องกับงานวิจัย Gibson (1989) และไม่เกิดผลเฉลยปลอมเทียม โหมดพื้นฐาน HE_{11} ที่เกิดขึ้นจะไม่ใช่โหมด TE หรือโหมด TM

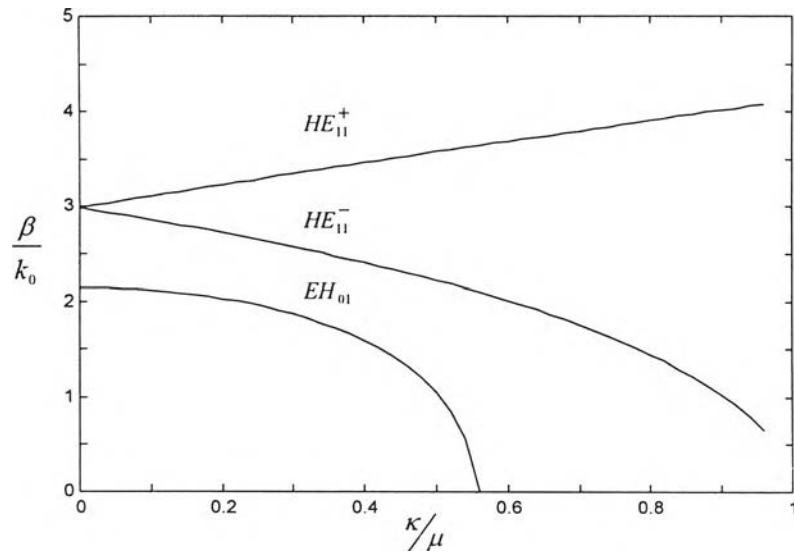
เหมือนกับท่อนำคลื่นกลวงมีภาคตัดขวางรูปวงกลม เนื่องจากโหมดนี้ความเข้มสนามไฟฟ้าและความเข้มสนามแม่เหล็กแนวแกน z ไม่เป็นศูนย์และจะเรียกว่าโหมดไฮบริด (hybrid mode) โหมดพื้นฐานของท่อนำคลื่นชนิดนี้ จะเกิดค่าคงตัวเฟส 2 ค่าหรือกล่าวได้ว่ามีโหมดพื้นฐานเกิดขึ้น 2 โหมด คือ HE_{11}^+ และ HE_{11}^- โดยเครื่องหมายบวกและลบแสดงถึงโพลาริเซชันแบบวงกลมที่หมุนขวาและหมุนซ้ายตามลำดับ จากกราฟจะพบว่าโหมด HE_{11}^+ และ HE_{11}^- จะเกิดขึ้นตลอดค่าของ k/μ ตั้งแต่ช่วงค่าเข้าใกล้ 0 ถึงค่าเข้าใกล้ 1 และผลต่างของค่าคงตัวเฟสมีค่ามากขึ้นเมื่อค่า k/μ มีค่ามากขึ้น และที่ค่า k/μ เท่ากับศูนย์จะเกิดค่าคงตัวเฟสเพียงค่าเดียว เพราะว่าค่าของ k มีค่าเท่ากับศูนย์ ทำให้ค่าความซับซ้อนได้สัมพันธ์เท่ากับ 1 ซึ่งเปรียบเสมือนเป็นท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยวัสดุไดอิเล็กทริกที่มีค่าสภาพยอมสัมพันธ์เท่ากับค่าสภาพยอมสัมพันธ์ของวัสดุโพลีโพรพิลีน

รูปที่ 3.5 แสดงผลการวิเคราะห์กราฟดิสเปอร์ชันของท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยวัสดุโพลีโพรพิลีนมีภาคตัดขวางรูปวงกลม ผนังท่อนำคลื่นเป็นตัวนำแม่เหล็กสมบูรณ์ โดยเส้นทึบแทนวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้ฟังก์ชันรูปร่างอีลีเมนต์ขอบคงที่และสัญลักษณ์จุดแทนวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้ฟังก์ชันรูปร่างอีลีเมนต์ขอบเชิงเส้น สอดคล้องกับงานวิจัย Gibson (1989) และไม่เกิดผลเฉลยปลอมเทียม เมื่อผนังท่อนำคลื่นเป็นตัวนำแม่เหล็กสมบูรณ์ มีลักษณะแตกต่างเมื่อผนังท่อนำคลื่นเป็นตัวนำไฟฟ้าสมบูรณ์ คือ โหมดพื้นฐานที่เกิดขึ้น 2 โหมดหรือค่าคงตัวเฟสเกิด 2 ค่าในช่วงหนึ่งของค่า k/μ คือที่ค่า k/μ ต่ำกว่า 0.4 จะมีโหมดพื้นฐานเกิดขึ้น 2 โหมด แต่ถ้าค่า k/μ สูงกว่า 0.4 โหมดที่เกิดขึ้นจะมีเพียงค่าเดียว

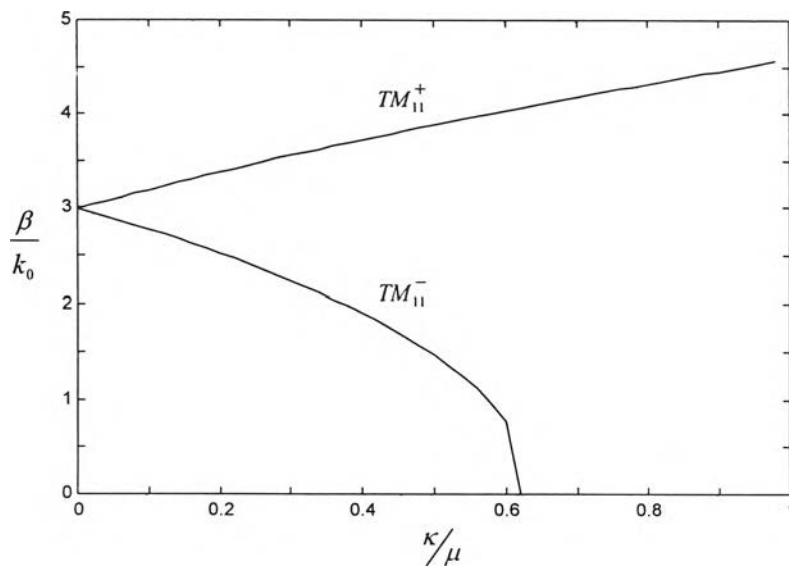


รูปที่ 3.5 กราฟดิสเปอร์ชันของท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยวัสดุโพลีโพรพิลีนมีภาคตัดขวางรูปวงกลม ผนังท่อนำคลื่นเป็นตัวนำแม่เหล็กสมบูรณ์ เมื่อ - แทนวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้ฟังก์ชันรูปร่างอีลีเมนต์ขอบคงที่

• แทนวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้ฟังก์ชันรูปร่างอีลีเมนต์ขอบเชิงเส้น + แทน Gibson (1989)

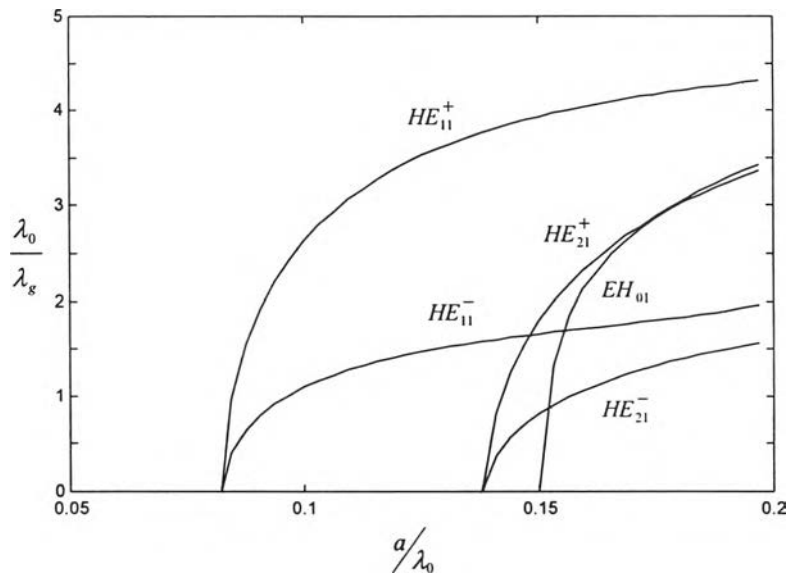


รูปที่ 3.6 กราฟดิสเพอร์ชันของท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยวัสดุไอโรแมกเนติก มีภาคตัดขวางรูปร่างกลม ผนังท่อนำคลื่นเป็นตัวนำไฟฟ้าสมบูรณ์ กำหนด $k_0 a = 0.75$



รูปที่ 3.7 กราฟดิสเพอร์ชันของท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยวัสดุไอโรแมกเนติก มีภาคตัดขวางรูปร่างกลม ผนังท่อนำคลื่นเป็นตัวนำแม่เหล็กสมบูรณ์ กำหนด $k_0 a = 0.75$

รูปที่ 3.6 แสดงกราฟดิสเพอร์ชันของท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยวัสดุไอโรแมกเนติกมีภาคตัดขวางรูปวงกลม ผนังท่อนำคลื่นเป็นตัวนำไฟฟ้าสมบูรณ์ โดยการเพิ่มค่า $k_0 a = 0.75$ เมื่อผนังท่อนำคลื่นเป็นตัวนำไฟฟ้าสมบูรณ์ โดยการเพิ่มค่า $k_0 a$ มี 2 ลักษณะ คือเพิ่มค่ารัศมีท่อนำคลื่นและกำหนดให้ค่าความถี่ที่หรือการกำหนดให้ค่ารัศมีท่อนำคลื่นคงที่และเพิ่มค่าความถี่ จากกราฟที่แสดงโมดที่เกิดขึ้นในท่อนำคลื่นจะมีโมดเพิ่มขึ้นคือโมด EH_{01} ที่มีค่าคงตัวเฟสเกิดขึ้นเพียงค่าเดียวตลอดช่วงค่า κ/μ ตั้งแต่ 0 ถึง 1 และในกรณีเมื่อผนังท่อนำคลื่นเป็นตัวนำแม่เหล็กสมบูรณ์ โมดที่เกิดขึ้นมีเฉพาะโมดพื้นฐานเท่านั้น ดังในรูปที่ 3.7



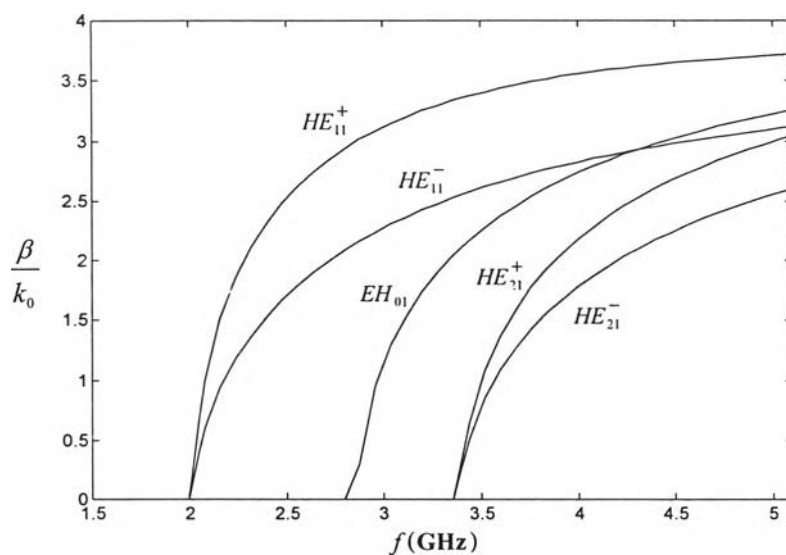
รูปที่ 3.8 กราฟดิสเพอร์ชันของท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยวัสดุไอโรแมกเนติก

มีภาคตัดขวางรูปวงกลม ผนังท่อนำคลื่นเป็นตัวนำไฟฟ้าสมบูรณ์ $\kappa = 0.750$, $\mu = 1.0$, $\epsilon_r = 13.0$

รูปที่ 3.8 แสดงกราฟดิสเพอร์ชันของท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยวัสดุไอโรแมกเนติกมีภาคตัดขวางรูปวงกลม ผนังท่อนำคลื่นเป็นตัวนำไฟฟ้าสมบูรณ์ โดยแสดงถึงผลของรัศมีท่อนำคลื่นที่มีต่อโมดที่เกิดขึ้นในท่อนำคลื่น ซึ่งนอร์มาไลซ์รัศมีท่อนำคลื่นด้วยค่า λ_0 ที่กำหนดจาก $k_0 = 2\pi/\lambda_0$ และนอร์มาไลซ์ค่าคงตัวเฟสด้วย k_0 เมื่อ $\beta = 2\pi/\lambda_g$ และตัวกลางไอโรแมกเนติกมีคุณสมบัติค่า $\kappa = 0.750$, $\mu = 1.0$ และ $\epsilon_r = 13.0$ ผลการวิเคราะห์ได้แสดง 3 โมดแรก ในทุกโมดของ HE นี้จะมีค่าคงตัวเฟสแยกออกเป็น 2 ค่าและในโมด EH จะเกิดค่าคงตัวเฟสเพียงค่าเดียว โดยถ้ารัศมีท่อนำคลื่นมีขนาดมากขึ้น (ค่า a/λ_0 มีขนาดมากขึ้น) จะมีจำนวนโมดเพิ่มมากขึ้น

รูปที่ 3.9 แสดงกราฟดิสเพอร์ชันของท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยวัสดุไอโรแมกเนติกมีภาคตัดขวางรูปวงกลม ผนังท่อนำคลื่นเป็นตัวนำไฟฟ้าสมบูรณ์ โดยแสดงถึงผลของความถี่ที่มีต่อโมดที่เกิดขึ้นในท่อนำคลื่นเมื่อกำหนดขนาดรัศมีท่อนำคลื่นคงที่ ซึ่งนอร์มาไลซ์ค่าคงตัวเฟสด้วย k_0 ค่าสมาชิกของเทนเซอร์ความขบซิมได้เปลี่ยนแปลงขึ้นกับค่าความถี่ ค่าอำนาจแม่เหล็กอิมิตัวและค่าการไปแอสสมามแม่เหล็กสถิต กำหนดรัศมีท่อนำ

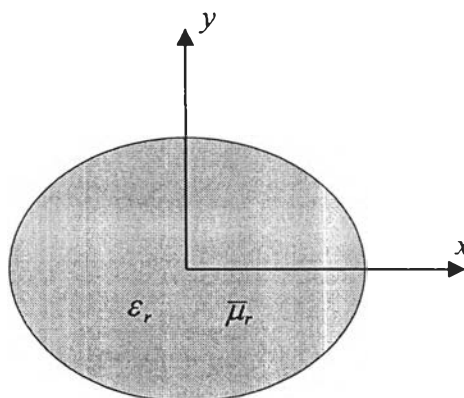
คลื่น $a = 11.944 \text{ mm}$, $M_s = 2300 \text{ G}$, $H_0 = 384 \text{ Oe}$ และ $\epsilon_r = 13.6$ เมื่อพิจารณาโหมดพื้นฐานที่เกิดขึ้นจากการกำหนดพารามิเตอร์ดังที่กล่าวมานี้ จะพบว่ามีค่าความถี่ตัดประมาณ 2.0 GHz และจะเกิดขึ้นเพียงโหมดเดียวได้เมื่อมีช่วงความถี่ตั้งแต่ $2.0 - 2.75 \text{ GHz}$ และถ้ามีความถี่เพิ่มขึ้นจำนวนโหมดที่เกิดขึ้นในท่อนำคลื่นก็จะเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วยเช่นโหมด EH_{01} , HE_{21}^+ และ HE_{21}^- ซึ่งในทางปฏิบัติแล้วเป็นสิ่งที่ไม่ต้องการและพยายามที่จะลดการเกิดโหมดในท่อนำคลื่นให้ลดน้อยลง



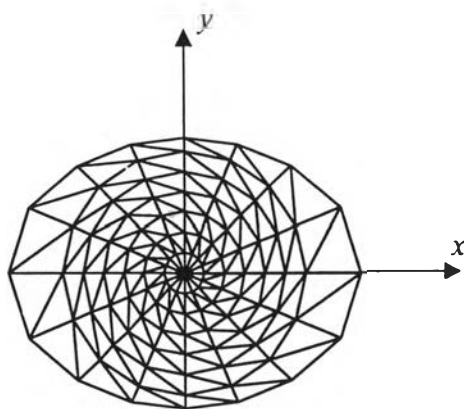
รูปที่ 3.9 กราฟดิสเพอร์ชันของท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกมีภาคตัดขวางรูปวงกลม ผนังท่อนำคลื่นเป็นตัวนำไฟฟ้าสมบูรณ์ $a = 11.944 \text{ mm}$, $M_s = 2300 \text{ G}$, $H_0 = 384 \text{ Oe}$, $\epsilon_r = 13.6$

2. ท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกมีภาคตัดขวางรูปวงรี

ท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกมีภาคตัดขวางรูปวงรี ผนังท่อนำคลื่นเป็นตัวนำไฟฟ้าสมบูรณ์หรือตัวนำแม่เหล็กสมบูรณ์ดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 ท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกมีภาคตัดขวางรูปวงรี



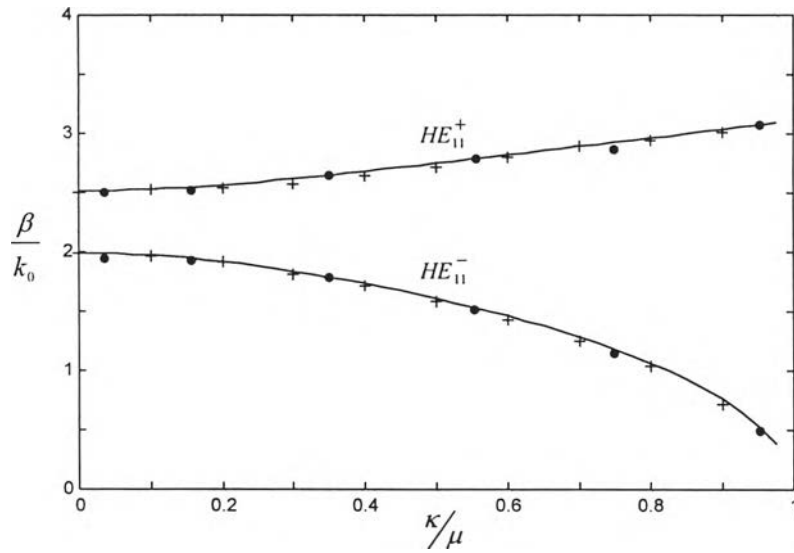
รูปที่ 3.11 การแบ่งอิลีเมนต์ของท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยวัสดุโพลีเมอร์ที่มีภาคตัดขวางรูปวงรี

แบ่งอิลีเมนต์ย่อย ๆ เป็นรูปสามเหลี่ยมดังรูปที่ 3.11 โดยในที่นี้จะกำหนดเป็น 2 กรณีคือ กรณีที่ 1 การแบ่งอิลีเมนต์จำนวน 208 อิลีเมนต์เมื่อใช้ฟังก์ชันรูปร่างอิลีเมนต์ขอบคกงที่ มีจำนวนตัวแปรที่ไม่ทราบค่าของสนามก่อนกำหนดเงื่อนไขขอบเขตและหลังกำหนดเงื่อนไขขอบเขตเท่ากับ 320 และ 304 ตามลำดับ กรณีที่ 2 การแบ่งอิลีเมนต์จำนวน 75 อิลีเมนต์เมื่อใช้ฟังก์ชันรูปร่างอิลีเมนต์ขอบเชิงเส้น มีจำนวนตัวแปรที่ไม่ทราบค่าของสนามก่อนกำหนดเงื่อนไขขอบเขตและหลังกำหนดเงื่อนไขขอบเขตเท่ากับ 390 และ 360 ตามลำดับ

รูปที่ 3.12 แสดงกราฟดิสเพอร์ชันของท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยวัสดุโพลีเมอร์ที่มีภาคตัดขวางรูปวงรี ผนังท่อนำคลื่นเป็นตัวนำไฟฟ้าสมบูรณ์ ตัวกลางโพลีเมอร์มีค่า $\mu = 1.0$ และ $\epsilon_r = 10.0$ กำหนด $k_0 a = 0.9696$ วงรีมีค่าความเยื้องศูนย์กลาง (eccentricity) เท่ากับ 0.648 โดยเส้นที่บแทนวิธีไฟไนต์อิลีเมนต์ที่ใช้ฟังก์ชันรูปร่างอิลีเมนต์ขอบคกงที่และสัญลักษณ์จุดแทนวิธีไฟไนต์อิลีเมนต์ที่ใช้ฟังก์ชันรูปร่างอิลีเมนต์ขอบเชิงเส้น สอดคล้องกับงานวิจัย Gibson (1989) และไม่เกิดผลเฉลยปลอมเทียม

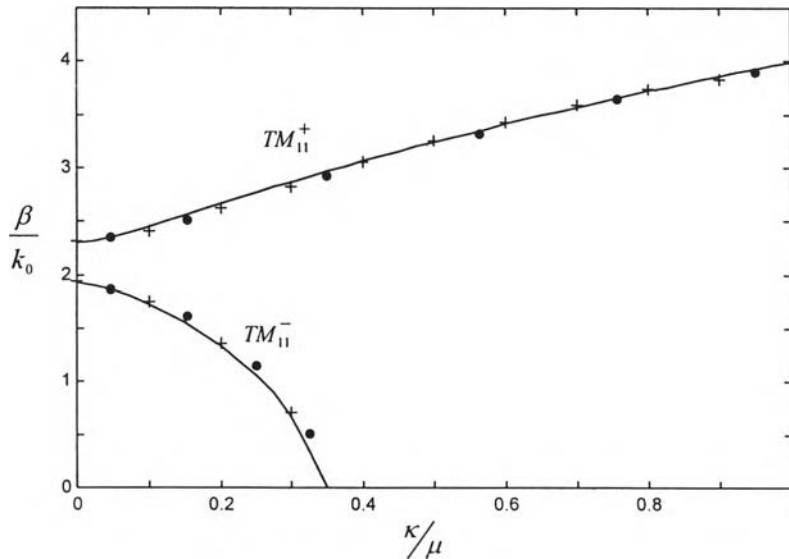
รูปที่ 3.13 แสดงกราฟดิสเพอร์ชันของท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยวัสดุโพลีเมอร์ที่มีภาคตัดขวางรูปวงรี ผนังท่อนำคลื่นเป็นตัวนำแม่เหล็กสมบูรณ์ ตัวกลางโพลีเมอร์มีค่า $\mu = 1.0$ และ $\epsilon_r = 15.0$ กำหนด $k_0 a = 0.60$ วงรีมีค่าความเยื้องศูนย์กลางเท่ากับ 0.4 โดยเส้นที่บแทนวิธีไฟไนต์อิลีเมนต์ที่ใช้ฟังก์ชันรูปร่างอิลีเมนต์ขอบคกงที่และสัญลักษณ์จุดแทนวิธีไฟไนต์อิลีเมนต์ที่ใช้ฟังก์ชันรูปร่างอิลีเมนต์ขอบเชิงเส้น สอดคล้องกับงานวิจัย Gibson (1989) และไม่เกิดผลเฉลยปลอมเทียม

รูปที่ 3.14 แสดงกราฟดิสเพอร์ชันของท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยวัสดุโพลีเมอร์ที่มีภาคตัดขวางรูปวงรี ผนังท่อนำคลื่นเป็นตัวนำไฟฟ้าสมบูรณ์ ตัวกลางโพลีเมอร์มีค่าพารามิเตอร์ตามรูปที่ 3.13 กำหนดค่าความเยื้องศูนย์กลางเท่ากับ 0.2, 0.4, 0.6 และ 0.72 จากกราฟมีโหมดเกิดขึ้น 3 โหมด คือโหมด HE_{11}^+ , HE_{11}^- และ EH_{01} เมื่อเราพิจารณาค่า k/μ เท่ากับศูนย์ซึ่งหมายถึงไม่มีการไปแอสสมานแม่เหล็กสถิต ผลของการเพิ่มขึ้นของค่าความเยื้องศูนย์กลางของวงรี มีผลทำให้ที่ค่าความแตกต่างของค่าคงตัวเฟสมีค่ามากขึ้นและค่าคงตัวเฟสของโหมด EH_{01} มีค่าลดลง และถ้ามีค่าความเยื้องศูนย์กลางเพิ่มมากขึ้นที่ค่า ๆ หนึ่งโหมด EH_{01} จะหายไป



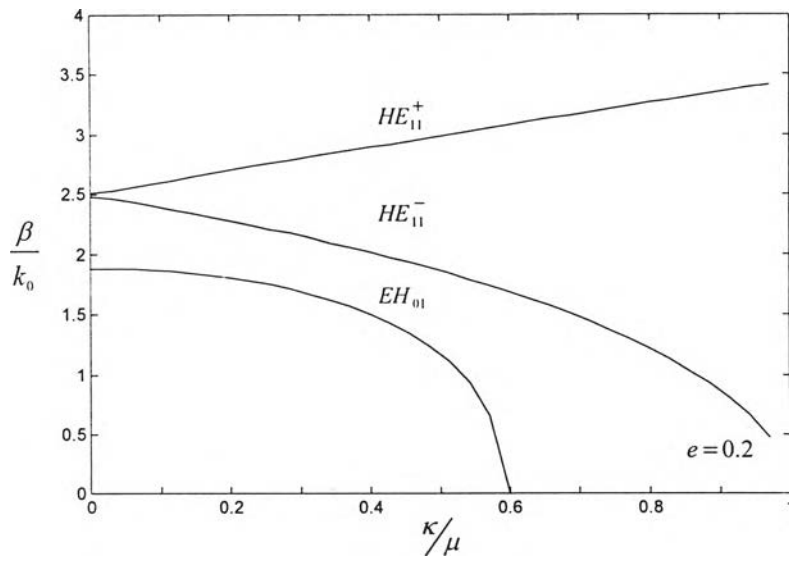
รูปที่ 3.12 กราฟดิสเพอร์ชันของท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยวัสดุไดอิเล็กตริกมีภาคตัดขวางรูปวงรี ผนังท่อนำคลื่นเป็นตัวนำไฟฟ้าสมบูรณ์ เมื่อ - แทนวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้ฟังก์ชันรูปร่างอีลีเมนต์ขอบคงที่

- แทนวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้ฟังก์ชันรูปร่างอีลีเมนต์ขอบเชิงเส้น + แทน Gibson (1989)

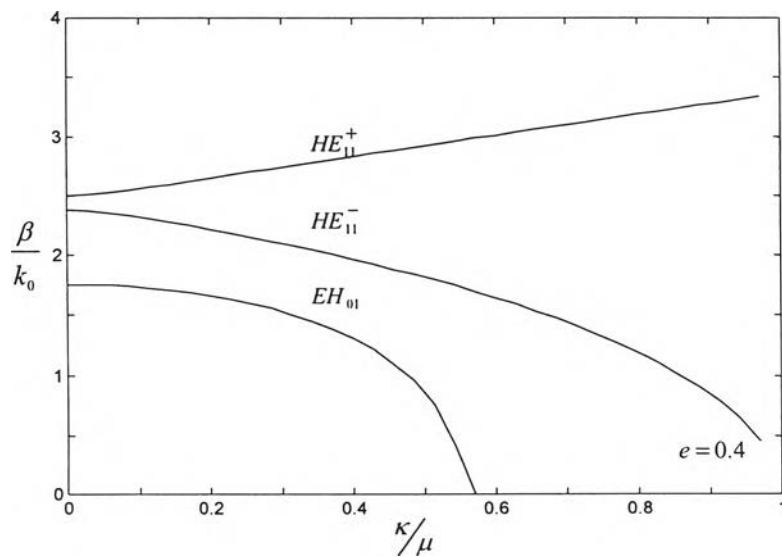


รูปที่ 3.13 กราฟดิสเพอร์ชันของท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยวัสดุไดอิเล็กตริกมีภาคตัดขวางรูปวงรี ผนังท่อนำคลื่นเป็นตัวนำแม่เหล็กสมบูรณ์ เมื่อ - แทนวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้ฟังก์ชันรูปร่างอีลีเมนต์ขอบคงที่

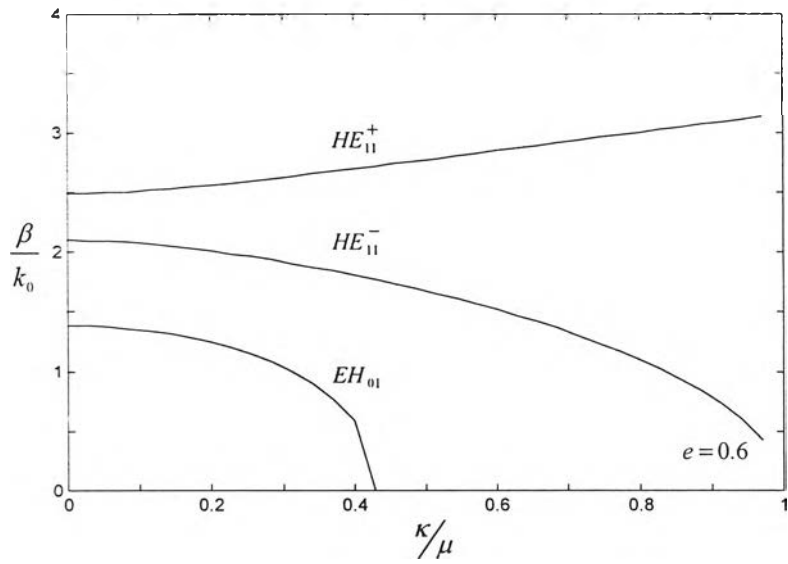
- แทนวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้ฟังก์ชันรูปร่างอีลีเมนต์ขอบเชิงเส้น + แทน Gibson (1989)



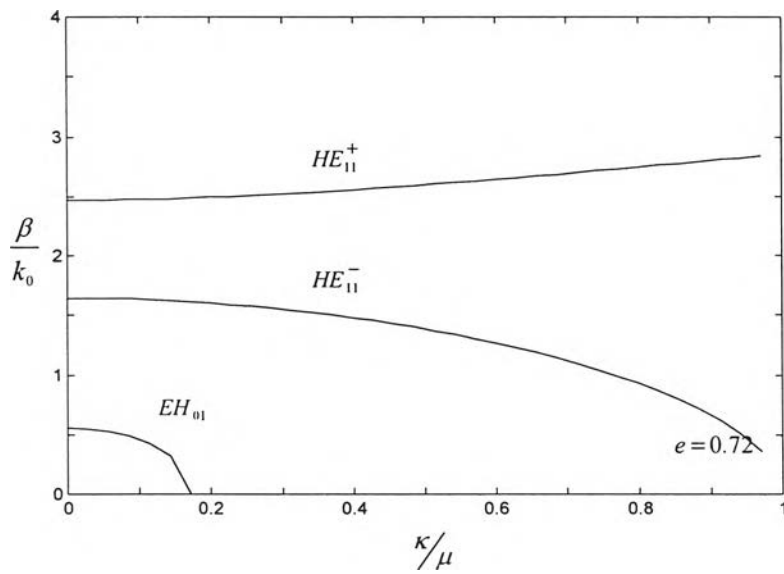
(ก) กราฟดิสเพอร์ชันของท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยวัสดุโพลีเมกเนติก
มีภาคตัดขวางรูปวงรี ค่าความเยื้องศูนย์กลาง 0.2



(ข) กราฟดิสเพอร์ชันของท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยวัสดุโพลีเมกเนติก
มีภาคตัดขวางรูปวงรี ค่าความเยื้องศูนย์กลาง 0.4



(ค) กราฟดิสเพอร์ชันของท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยวัสดุโพลีเมกเนติก
มีภาคตัดขวางรูปวงรี ค่าความเยื้องศูนย์กลาง 0.6

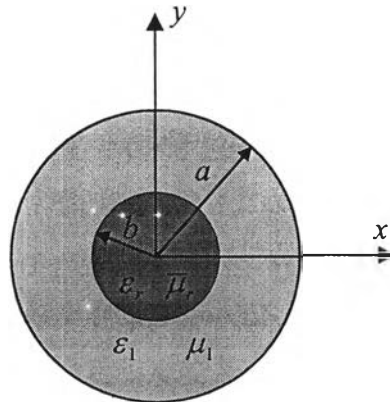


(ง) กราฟดิสเพอร์ชันของท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยวัสดุโพลีเมกเนติก
มีภาคตัดขวางรูปวงรี ค่าความเยื้องศูนย์กลาง 0.72

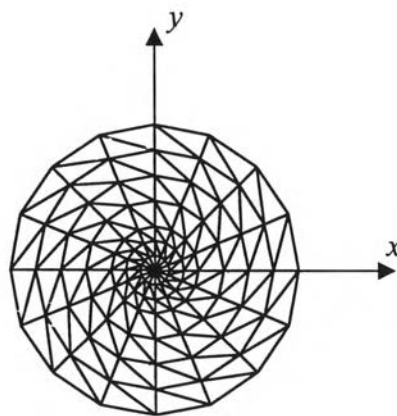
รูปที่ 3.14 กราฟดิสเพอร์ชันของท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยวัสดุโพลีเมกเนติก
มีภาคตัดขวางรูปวงรี มีค่าความเยื้องศูนย์กลางต่างกัน

3. ท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยวัสดุโพลีเมอร์เนติกมีภาคตัดขวางรูปวงกลมไม่เอกพันธ์

ท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยวัสดุโพลีเมอร์เนติกมีภาคตัดขวางรูปวงกลมไม่เอกพันธ์ มีรัศมีภายในเป็นตัวกลางโพลีเมอร์เนติกและล้อมรอบด้วยวัสดุไดอิเล็กทริกมีผนังท่อนำคลื่นเป็นตัวนำไฟฟ้าสมบูรณ์ ดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 ท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยวัสดุโพลีเมอร์เนติกมีภาคตัดขวางรูปวงกลมไม่เอกพันธ์

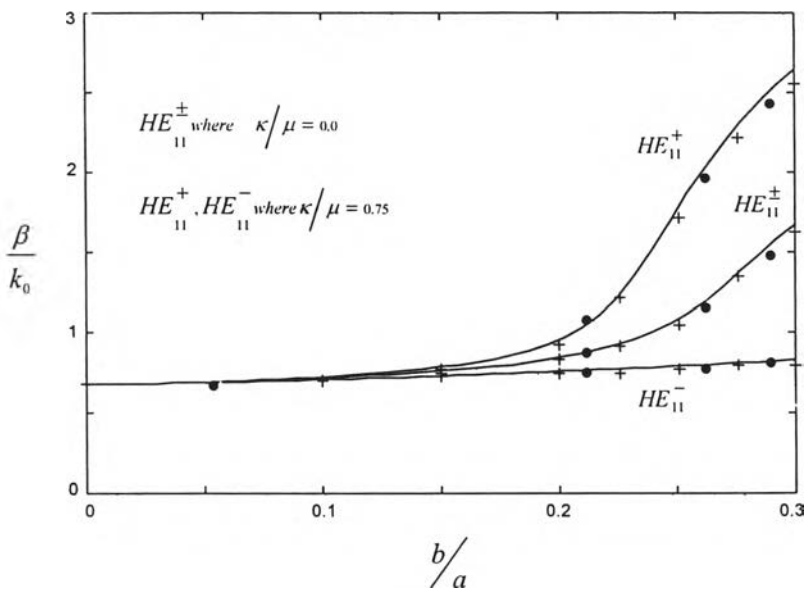


รูปที่ 3.16 การแบ่งอีลีเมนต์ของท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยวัสดุโพลีเมอร์เนติก
มีภาคตัดขวางรูปวงกลมไม่เอกพันธ์

แบ่งอีลีเมนต์ย่อย ๆ เป็นรูปสามเหลี่ยมดังรูปที่ 3.16 โดยในที่นี้จะกำหนดเป็น 2 กรณีคือ กรณีที่ 1 การแบ่งอีลีเมนต์จำนวน 208 อีลีเมนต์เมื่อใช้ฟังก์ชันรูปร่างอีลีเมนต์ขอบคงที่มีจำนวนตัวแปรที่ไม่ทราบค่าของสนามก่อนกำหนดเงื่อนไขขอบเขตและหลังกำหนดเงื่อนไขขอบเขตเท่ากับ 320 และ 304 ตามลำดับ กรณีที่ 2 การแบ่งอีลีเมนต์จำนวน 75 อีลีเมนต์เมื่อใช้ฟังก์ชันรูปร่างอีลีเมนต์ขอบเชิงเส้น มีจำนวนตัวแปรที่ไม่ทราบค่าของสนามก่อนกำหนดเงื่อนไขขอบเขตและหลังกำหนดเงื่อนไขขอบเขตเท่ากับ 390 และ 360 ตามลำดับ

รูปที่ 3.17 แสดงกราฟดิสเพอร์ชันของท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยวัสดุไอโรแมกเนติกมีภาคตัดขวางรูปวงกลมไม่เอกพันธ์ ผนังท่อนำคลื่นเป็นตัวนำไฟฟ้าสมบูรณ์ ตัวกลางไอโรแมกเนติกมีค่า $\epsilon_1 = 1.0$, $\epsilon_2 = 10.0$ และ $\mu = 1.0$ กำหนด $k_0 a = 2.5133$ โดยเส้นทึบแทนวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้ฟังก์ชันรูปร่างอีลีเมนต์ขอบคองที่และสัญลักษณ์จุดแทนวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้ฟังก์ชันรูปร่างอีลีเมนต์ขอบเชิงเส้น สอดคล้องกับงานวิจัย Dillon (1993) และไม่เกิดผลเฉลยปลอมเทียม

ถ้า $\kappa/\mu = 0.0$ จะเป็นกรณีที่ไม่มีการไบแอสสนามแม่เหล็กสถิต โหมดที่เกิดขึ้นคือ HE_{11}^\pm เพียงโหมดเดียวที่มีค่าทำให้ค่าความซาบซึมได้เป็นสเกลาร์และมีค่าความซาบซึมได้สัมพันธ์เท่ากับ 1 ซึ่งเปรียบเสมือนเป็นท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยวัสดุไดอิเล็กทริกที่มีค่าสภาพยอมสัมพันธ์เท่ากับค่าสภาพยอมสัมพันธ์ของตัวกลางไอโรแมกเนติก ถ้า $\kappa/\mu = 0.75$ จะเป็นกรณีที่มีการไบแอสสนามแม่เหล็กสถิต โหมดที่เกิดขึ้นคือ HE_{11}^+ และ HE_{11}^- โดยแต่ละโหมดมีโพลาริเซชันแบบวงกลมหมุนขวาและซ้ายตามลำดับ จากกราฟจะพบว่าอัตราส่วนรัศมีท่อนำคลื่นจะมีผลต่อโหมดที่เกิดขึ้น เพราะว่าที่อัตราส่วนรัศมีท่อนำคลื่นน้อยกว่า 0.1 โหมดที่เกิดขึ้นจะมีเพียงโหมดเดียวและเมื่ออัตราส่วนรัศมีท่อนำคลื่นเพิ่มขึ้นก็จะเกิดโหมด HE_{11}^+ และ HE_{11}^-



รูปที่ 3.17 กราฟดิสเพอร์ชันของท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยวัสดุไอโรแมกเนติก มีภาคตัดขวางรูปวงกลมไม่เอกพันธ์

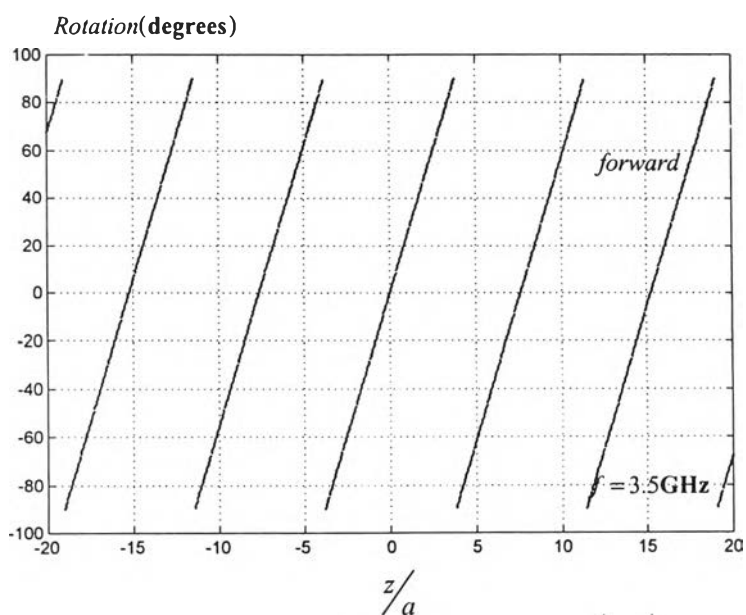
- เมื่อ - แทนวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้ฟังก์ชันรูปร่างอีลีเมนต์ขอบคองที่
- แทนวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้ฟังก์ชันรูปร่างอีลีเมนต์ขอบเชิงเส้น + แทน Dillon (1993)

ผลการคำนวณการหมุนพาราเดย์ของท่อนำคลื่นไอโรแมกเนติก

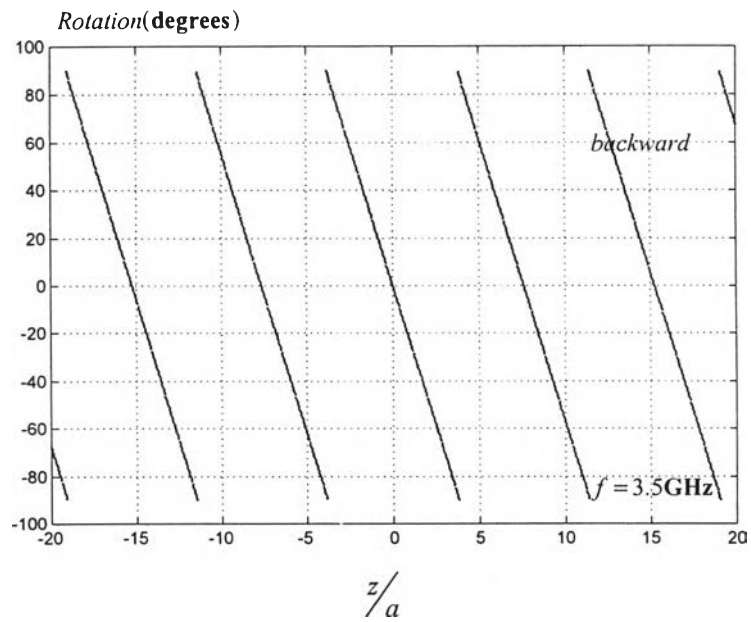
การคำนวณการหมุนพาราเดย์ของท่อนำคลื่นไอโรแมกเนติกแสดงในภาคผนวก ก. และภาคผนวก ข. โดยกำหนดพารามิเตอร์ต่าง ๆ มีดังนี้ รัศมีท่อนำคลื่น (a) เท่ากับ 11.94 มิลลิเมตร, อัตราส่วนรัศมีระหว่างชั้นของวัสดุไดอิเล็กทริกและวัสดุไอโรแมกเนติก (b/a) เท่ากับ 0.27, ขนาดความยาวท่อนำคลื่น (z/a) เท่ากับ 4.25, $\epsilon_r = 13.6$, $\epsilon_i = 2.56$, ค่าการไบแอสสนามแม่เหล็กสถิต (H_0) เท่ากับ 384 Oe และค่าอำนาจแม่เหล็กอิมิตัว (M_s) เท่ากับ 2300 G

รูปที่ 3.18 (ก) และรูปที่ 3.19 (ก) แสดงมุมการหมุนความเข้มสนามไฟฟ้าที่มีโพลาไรเซชันแบบเชิงเส้นของโหมดพื้นฐานโดยเปลี่ยนแปลงตามระยะทาง ของท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยวัสดุไอโรแมกเนติกมีภาคตัดขวางรูปวงกลมที่มีความถี่ 3.5 GHz และท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยวัสดุไอโรแมกเนติกมีภาคตัดขวางรูปวงกลมไม่เอกพันธ์มีความถี่ 8.6 GHz ตามลำดับ การไบแอสสนามแม่เหล็กสถิตในทิศทางเดียวกับการเคลื่อนที่ของสนาม การหมุนของความเข้มสนามไฟฟ้าจะหมุนตามแนวแกนบวกที่มีมุมการหมุนเพิ่มขึ้นตามระยะทางของท่อนำคลื่น มีช่วงจาก +90 ถึง -90 องศาและการหมุนจะเป็นรายคาบ

รูปที่ 3.18 (ข) และรูปที่ 3.19 (ข) แสดงมุมการหมุนความเข้มสนามไฟฟ้าที่มีโพลาไรเซชันแบบเชิงเส้นของโหมดพื้นฐานโดยเปลี่ยนแปลงตามระยะทาง แต่มีการไบแอสสนามแม่เหล็กสถิตในทิศทางตรงข้ามกับการเคลื่อนที่ของสนาม ทำให้มุมการหมุนของความเข้มสนามไฟฟ้าจะหมุนตามแนวแกนลบที่มีมุมการหมุนลดลงตามระยะทางของท่อนำคลื่น จากกราฟที่แสดงจะพบว่าที่ขนาดความยาวของท่อนำคลื่นช่วงหนึ่ง มุมการหมุนของสนามที่เกิดจากการไบแอสในทิศทางเดียวและทิศทางตรงข้ามกับการเคลื่อนที่ของสนาม จะมีมุมเท่ากันแต่มีเครื่องหมายต่างกันคือเป็นบวกและลบ ซึ่งแสดงถึงคุณสมบัติการเกิดไโรภาวะย้อนกลับ

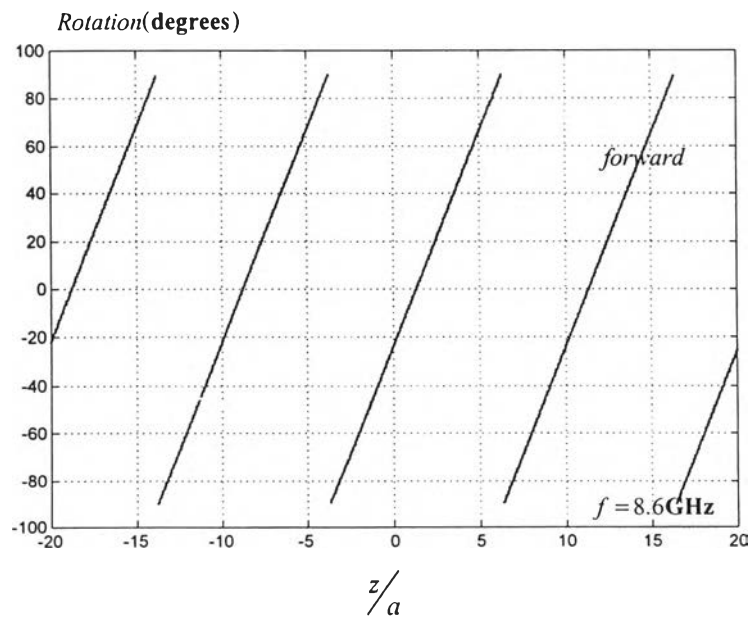


(ก) การไบแอสสนามแม่เหล็กสถิตในทิศทางเดียวกับการเคลื่อนที่ของสนาม

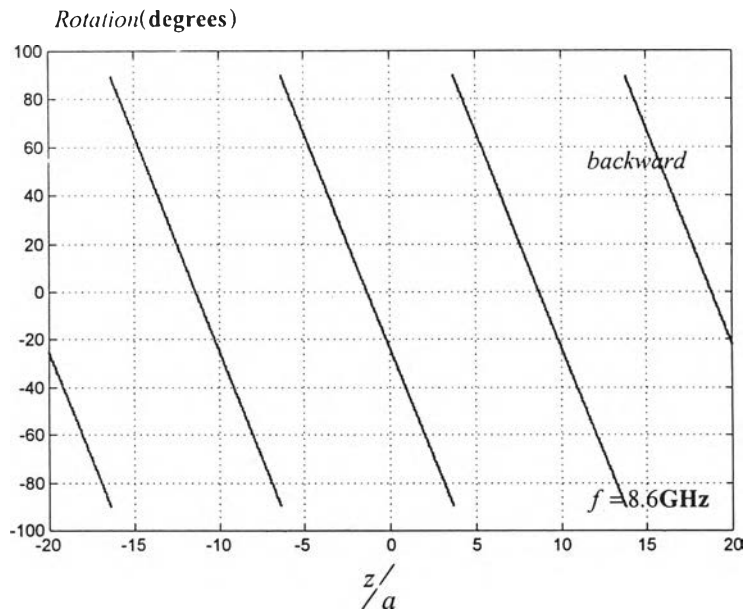


(ข) การไปแอสสนามแม่เหล็กสถิตในทิศทางตรงข้ามกับการเคลื่อนที่ของสนาม

รูปที่ 3.18 การหมุนของความเข้มสนามไฟฟ้าในท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยวัสดุไดอิเล็กตริก
มีภาคตัดขวางรูปวงกลม มีความถี่ 3.5 GHz



(ก) การไปแอสสนามแม่เหล็กสถิตในทิศทางเดียวกับการเคลื่อนที่ของสนาม

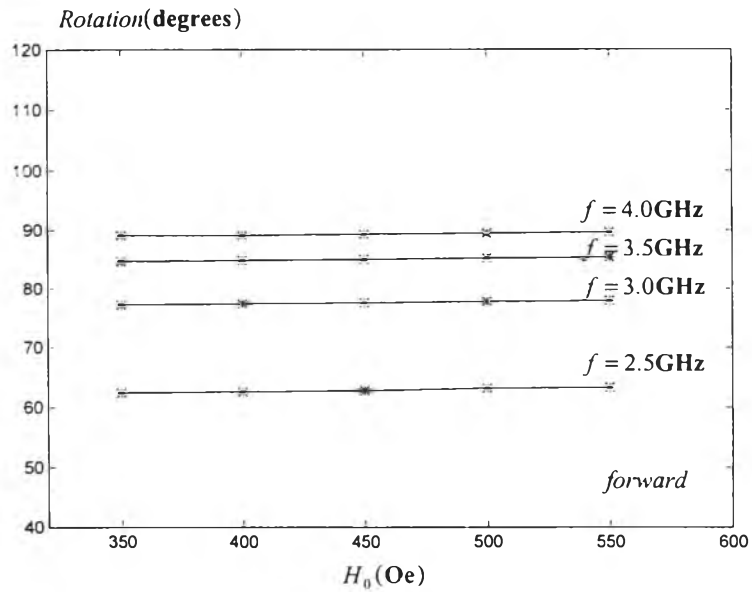


(ข) การไปแอสสมานแม่เหล็กสถิตในทิศทางตรงข้ามกับการเคลื่อนที่ของสนาม

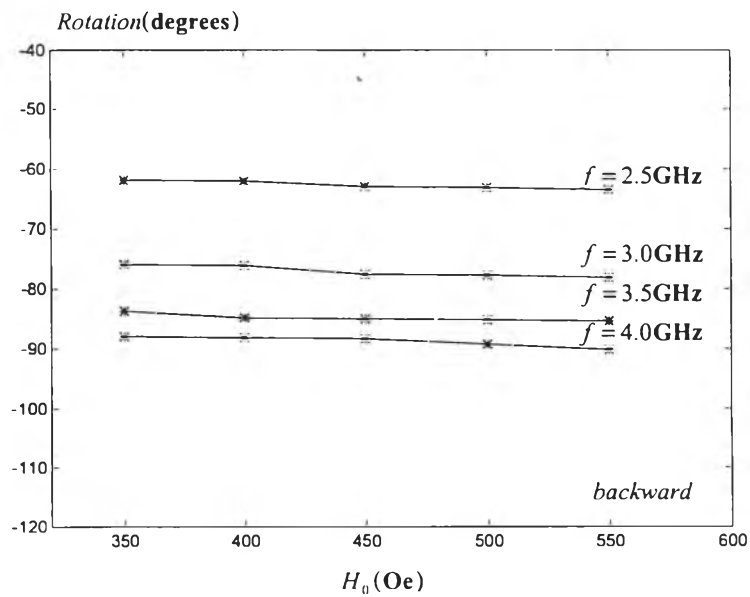
รูปที่ 3.19 การหมุนของความเข้มสนามไฟฟ้าในท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยวัสดุโรแมกเนติก
มีภาคตัดขวางรูปร่างกลมไม่เอกพันธ์ ที่ความถี่ 8.6 GHz

รูปที่ 3.20 (ก) และรูปที่ 3.21 (ก) แสดงมุมการหมุนของความเข้มสนามไฟฟ้าที่มีโพลาไรเซชันแบบเชิงเส้นของโหมดพื้นฐานในท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยวัสดุโรแมกเนติกมีภาคตัดขวางรูปร่างกลมและท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยวัสดุโรแมกเนติกมีภาคตัดขวางรูปร่างกลมไม่เอกพันธ์ตามลำดับ โดยเปลี่ยนแปลงตามค่าการไปแอสสมานแม่เหล็กสถิตและมีการไปแอสสมานแม่เหล็กสถิตในทิศทางเดียวกับการเคลื่อนที่ของสนาม จากกราฟที่แสดงถ้าค่าความถี่ไมโครเวฟมีความถี่สูงมุมการหมุนของสนามจะเพิ่มขึ้นจากค่าความถี่ไมโครเวฟที่ต่ำกว่า ค่าการไปแอสสมานแม่เหล็กสถิตที่ 350 Oe คือค่าต่ำสุดที่ทำให้ตัวกลางโรแมกเนติกเกิดค่าอำนาจแม่เหล็กอิ่มตัวเพื่อสอดคล้องตามสมการ (3.10) และสมการ (3.11) การเพิ่มขึ้นของสนามแม่เหล็กสถิตไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงมุมการหมุนของความเข้มสนามไฟฟ้าคือจะมีมุมการหมุนคงที่ตลอดในความถี่หนึ่งๆและมีค่าเป็นบวก ที่เป็นเช่นนี้เพราะว่า จากกราฟดังรูปที่ 3.1 แสดงถึงค่าการไปแอสสมานแม่เหล็กสถิตที่ทำให้เกิดอำนาจแม่เหล็กอิ่มตัว การเพิ่มขึ้นของการไปแอสจะมีค่าอำนาจแม่เหล็กอิ่มตัวคงที่ตลอด

รูปที่ 3.20 (ข) และรูปที่ 3.21 (ข) แสดงมุมการหมุนของความเข้มสนามไฟฟ้าที่มีโพลาไรเซชันแบบเชิงเส้นของโหมดพื้นฐานในท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยวัสดุโรแมกเนติกมีภาคตัดขวางรูปร่างกลมและท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยวัสดุโรแมกเนติกมีภาคตัดขวางรูปร่างกลมไม่เอกพันธ์ตามลำดับ เมื่อกำหนดการไปแอสสมานแม่เหล็กสถิตในทิศทางตรงข้ามกับการเคลื่อนที่ของสนาม ผลการคำนวณที่แสดงจะมีมุมการหมุนของสนามมีขนาดเท่ากับการไปแอสสมานแม่เหล็กสถิตในทิศทางเดียวกับการเคลื่อนที่ของสนามแต่มีเครื่องหมายเป็นลบ

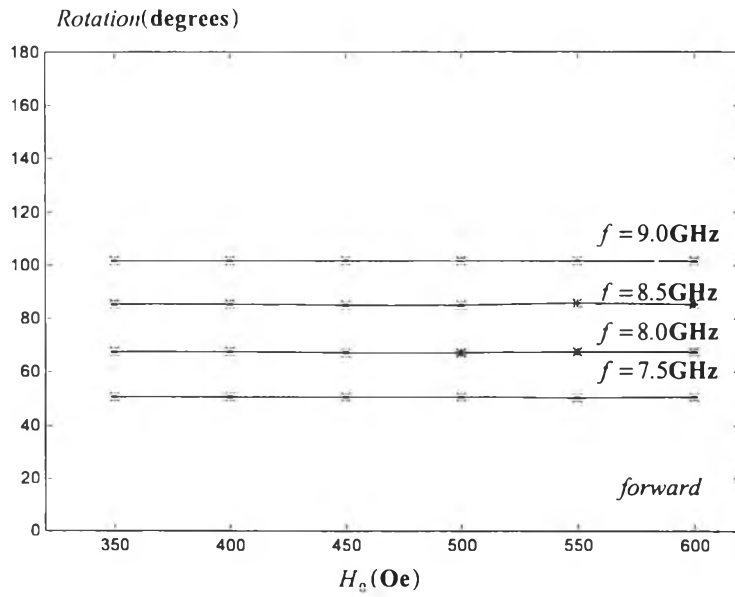


(ก) การไปแอสสมมาตรแม่เหล็กสถิตในทิศทางเดียวกับการเคลื่อนที่ของสนาม

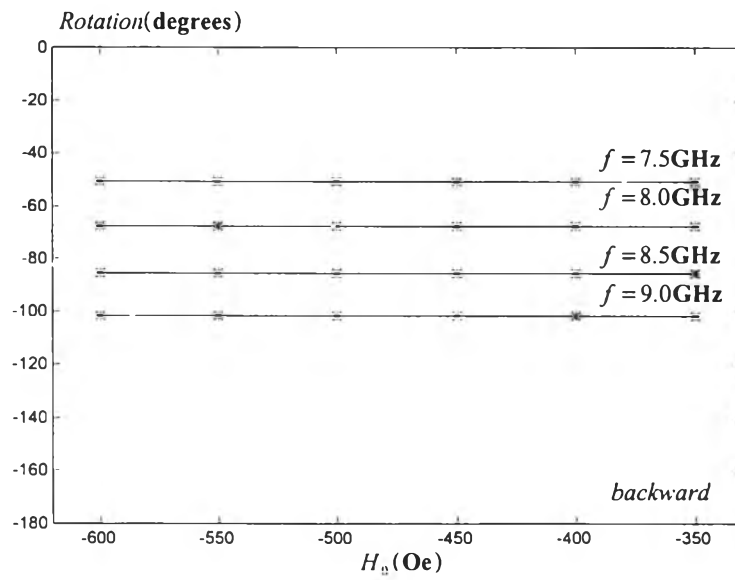


(ข) การไปแอสสมมาตรแม่เหล็กสถิตในทิศทางตรงข้ามกับการเคลื่อนที่ของสนาม

รูปที่ 3.20 การหมุนของความเข้มสนามไฟฟ้าในท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยวัสดุโรแมกเนติก
 มีภาคตัดขวางรูปวงกลม ที่ความถี่ 2.5 GHz , 3.0 GHz , 3.5 GHz และ 4.0 GHz

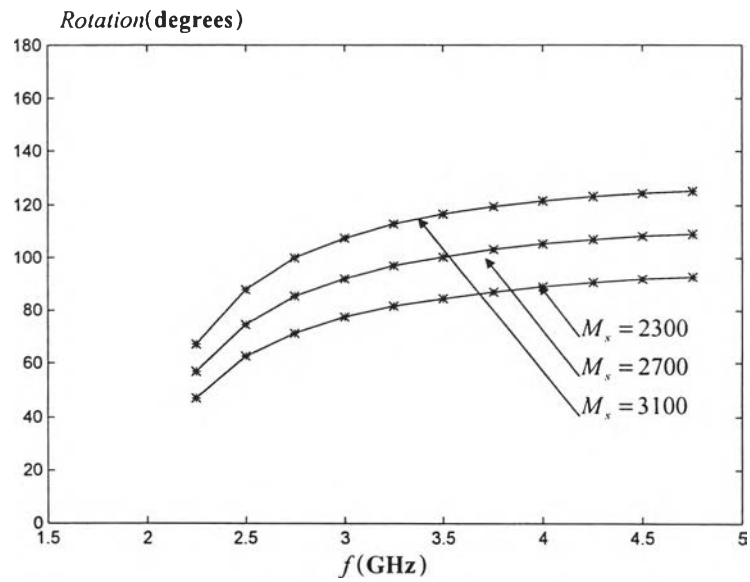


(ก) การไปแอสสนามแม่เหล็กสถิตในทิศทางเดียวกับการเคลื่อนที่ของสนาม

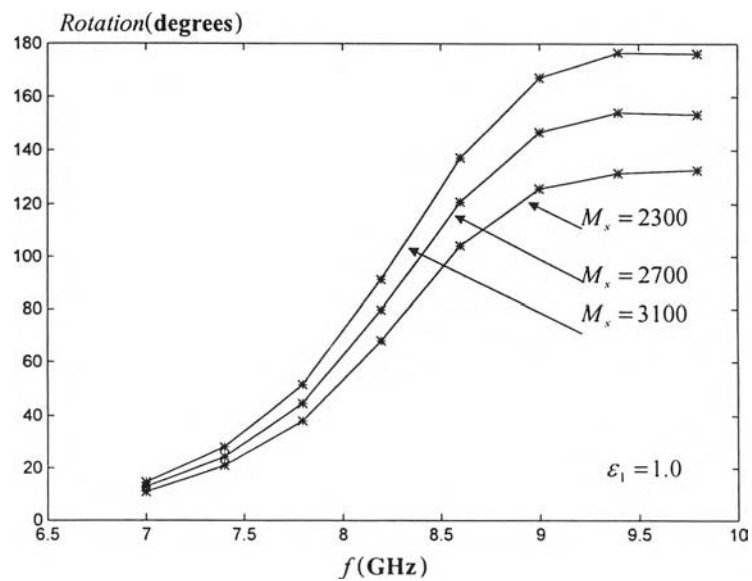


(ข) การไปแอสสนามแม่เหล็กสถิตในทิศทางตรงข้ามกับการเคลื่อนที่ของสนาม

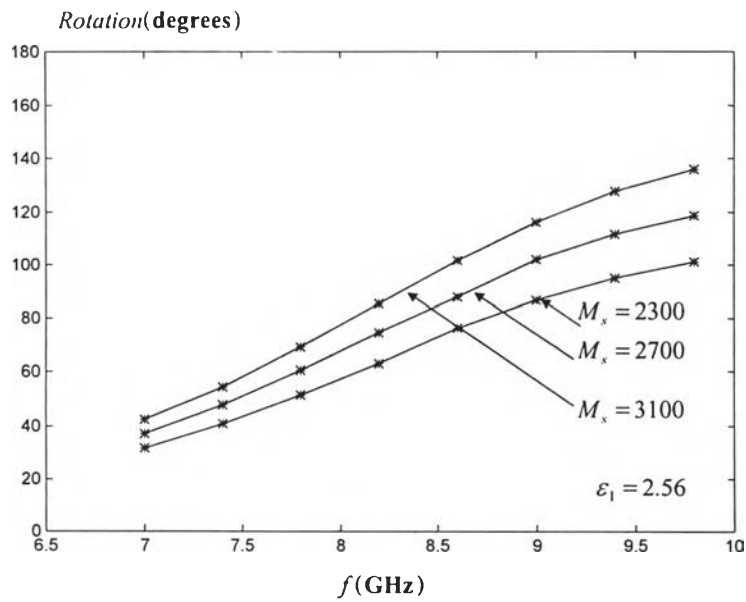
รูปที่ 3.21 การหมุนของความเข้มสนามไฟฟ้าในท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยวัสดุโรแมกเนติก
มีภาคตัดขวางรูปวงกลมไม่เอกพันธ์ ที่ความถี่ 7.5 GHz , 8.0 GHz , 8.5 GHz และ 9.0 GHz



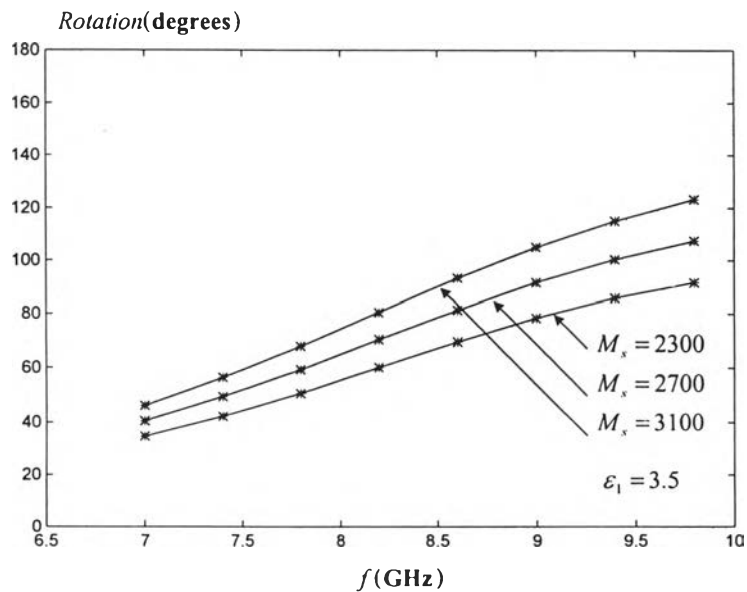
รูปที่ 3.22 การหมุนของระนาบความเข้มสนามไฟฟ้าในท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยวัสดุไอโรแมกเนติก มีภาคตัดขวางรูปวงกลม ที่อำนาจแม่เหล็กอิมิตัว 2300 G , 2700 G และ 3100 G



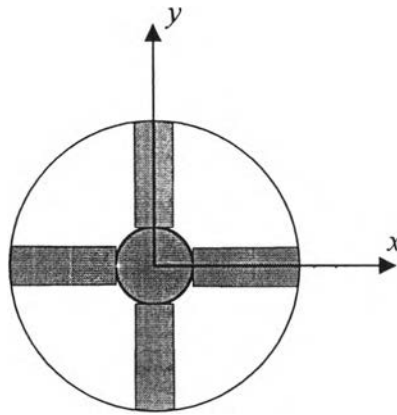
รูปที่ 3.23 การหมุนของระนาบความเข้มสนามไฟฟ้าในท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยวัสดุไอโรแมกเนติก มีภาคตัดขวางรูปวงกลมไม่เอกพันธ์ มีค่า $\epsilon_1 = 1.0$ ที่อำนาจแม่เหล็กอิมิตัว 2300 G , 2700 G และ 3100 G



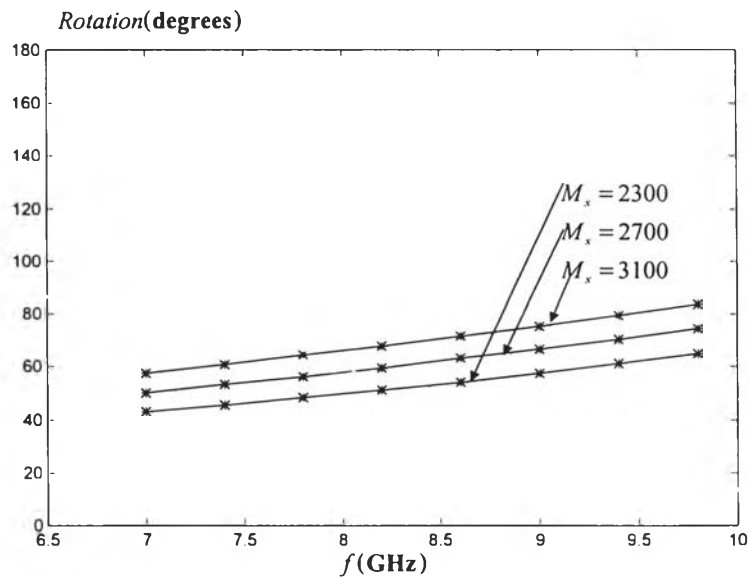
รูปที่ 3.24 การหมุนของความเข้มสนามไฟฟ้าในท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยวัสดุโพลีเอทิลีนที่มีภาคตัดขวางรูปวงกลมไม่เอกพันธ์ มีค่า $\epsilon_1 = 2.56$ ที่อำนาจแม่เหล็กอิมิตัว 2300 G , 2700 G และ 3100 G



รูปที่ 3.25 การหมุนของความเข้มสนามไฟฟ้าในท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยวัสดุโพลีเอทิลีนที่มีภาคตัดขวางรูปวงกลมไม่เอกพันธ์ มีค่า $\epsilon_1 = 3.5$ ที่อำนาจแม่เหล็กอิมิตัว 2300 G , 2700 G และ 3100 G



รูปที่ 3.26 ท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยวัสดุโรแมกเนติกไม่เอกพันธ์แบบที่สอง



รูปที่ 3.27 การหมุนของความเข้มสนามไฟฟ้าในท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยวัสดุโรแมกเนติกไม่เอกพันธ์แบบที่สอง ที่อำนาจแม่เหล็กอิมิตัว 2300 G, 2700 G และ 3100 G

รูปที่ 3.22 แสดงมุมการหมุนของความเข้มสนามไฟฟ้าในท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยวัสดุโรแมกเนติกมีภาคตัดขวางรูปวงกลม โดยเปลี่ยนแปลงตามค่าความถี่ตั้งแต่ 2-5 GHz เมื่อการไบแอสสนามแม่เหล็กสถิตมีทิศเดียวกับการเคลื่อนที่ของสนาม จากกราฟจะพบว่ามุมการหมุนของสนามจะเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นตามค่าความถี่ที่เพิ่มขึ้น และผลของการเปลี่ยนแปลงค่าอำนาจแม่เหล็กอิมิตัว 2300 G, 2700 G และ 3100 G ซึ่งจะหมายถึงการเปลี่ยนแปลงตัวกลางโรแมกเนติกในท่อนำคลื่น โดยถ้ามีค่าเพิ่มขึ้นมีผลทำให้มุมการหมุนของสนามเพิ่มขึ้นจากค่าอำนาจแม่เหล็กอิมิตัวที่ต่ำกว่าและมีช่วงการเพิ่มขึ้นเท่ากันตลอด

รูปที่ 3.23 ถึง รูปที่ 3.25 แสดงมุมการหมุนของความเข้มสนามไฟฟ้าในท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยวัสดุไอโรแมกเนติกมีภาคตัดขวางรูปวงกลมไม่เอกพันธ์มีค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ของตัวกลางไดอิเล็กทริกเท่ากับ $\epsilon_1 = 1.0$, $\epsilon_1 = 2.56$ และ $\epsilon_1 = 3.50$ ตามลำดับ มีค่าอำนาจแม่เหล็กอิ่มตัว 2300 G , 2700 G และ 3100 G ช่วงความถี่ตั้งแต่ 7-9.8 GHz ในรูปที่ 3.23 มีค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ $\epsilon_1 = 1.0$ คือเป็นตัวกลางของอวกาศว่าง ซึ่งอัตราการเปลี่ยนแปลงมุมการหมุนของสนามต่อความถี่เพิ่มขึ้นอย่างมากตั้งแต่ช่วงความถี่ 7.6-8.6 GHz คือประมาณ 30 องศาต่อความถี่ 400 MHz และเมื่อความถี่สูงกว่าช่วงนี้ไปอัตราการเปลี่ยนแปลงมุมการหมุนของสนามต่อความถี่มีการเปลี่ยนแปลงน้อยลงและมีแนวโน้มจะลดลงต่ำลงมา การเพิ่มค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ของตัวกลางไดอิเล็กทริกมี $\epsilon_1 = 2.56$ มุมการหมุนของความเข้มสนามไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงตามความถี่ดังรูปที่ 3.24 ซึ่งจะสังเกตเห็นได้ว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงมุมการหมุนของสนามต่อความถี่มีอัตราการเปลี่ยนแปลงลดลงประมาณ 10 องศาต่อความถี่ 400 MHz และถ้าการเพิ่มค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ของตัวกลางไดอิเล็กทริกมี $\epsilon_1 = 3.50$ มุมการหมุนของความเข้มสนามไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงตามความถี่ดังรูปที่ 3.25 จะมีอัตราการเปลี่ยนแปลงมุมการหมุนของสนามต่อความถี่ประมาณ 8 องศาต่อความถี่ 400 MHz จึงสรุปได้ว่าการเพิ่มค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ของตัวกลางไดอิเล็กทริกที่ล้อมรอบตัวกลางไอโรแมกเนติกมีผลทำให้อัตราการเปลี่ยนแปลงมุมการหมุนของสนามต่อความถี่ลดลง

รูปที่ 3.27 แสดงมุมการหมุนของความเข้มสนามไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงตามความถี่โดยวิเคราะห์จากท่อนำคลื่นดังรูปที่ 3.26 ซึ่งจะพบว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงมุมการหมุนของสนามต่อความถี่ประมาณ 3 องศาต่อความถี่ 400 MHz โดยเป็นค่าที่ต่ำกว่าท่อนำคลื่นไอโรแมกเนติกมีภาคตัดขวางรูปวงกลมที่ล้อมรอบด้วยตัวกลางไดอิเล็กทริก จึงกล่าวได้ว่าท่อนำคลื่นชนิดนี้สามารถปรับปรุงอัตราการเปลี่ยนแปลงมุมการหมุนของสนามต่อความถี่ลดลง โดยถือว่าเป็นข้อดีที่ทำให้มีช่วงความถี่ที่ใช้งานกว้างขึ้น