

รายการอ้างอิง

- Anderson, B. C., and Cendez, Z. J., Solution of Ferrite Loaded Waveguide using Vector Finite Elements. *IEEE Trans. Magnetics* 31 (May 1995): 1578-1581.
- Baden Fuller, A. J., Ferrites at microwave frequencies. London: Short Run Press, 1987.
- Balanis, C. A., Advanced engineering electromagnetics. United States of American: John Wiley & Sons, 1989.
- Bossavit, A., Whitney Forms: A Class of Finite Elements for Three-Dimensional Computations in Electromagnetism. *IEE Proceedings Pt. A* 135 (November 1988): 493-500.
- Cendes, Z. J., Vector Finite Elements for Electromagnetic Field Computation. *IEEE Trans. Magnetics* 27 (September 1991): 3958-3966.
- Collin, R. E., Foundations for microwave engineering. 2nd ed. Singapore: McGraw-Hill, 1996.
- Dillon, B. M., Gibson, A. A. P. and Webb, J. P., Cut-off and phase constants of partially filled, axially magnetized, gyromagnetic waveguides using finite elements. *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques* 41 (May 1993): 803-808.
- Fache, N., Olyslager, F. and De Zutter, D., Electromagnetic and circuit modelling of multiconductor transmission lines. New York: Oxford University Press, 1993.
- Fernandez, F. A., and Lu, Y., A Variational Finite Element Formulation for Dielectric Waveguides in Terms of Transverse Magnetic Fields. *IEEE Trans. Magnetics* 27 (September 1991): 3864-3867.
- Gibson, A. A. P., and Hellszajn, J., Finite Element Solution of Longitudinally Magnetized Elliptical Gyromagnetic Waveguides. *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques* 37 (June 1989): 999-1005.
- Harrington, R. F., Field computation by moment method. United States of America: IEEE PRESS, 1993.
- Hellszajn, J., Ferrite phase shifters and control devices. UK: McGraw-Hill, 1989.
- Hellszajn, J., Green's function, finite elements and microwave planar circuits. Chichester: John Wiley & Sons, 1996.

- Helszajn, J., and Gibson, A. A. P., Mode nomenclature of circular gyromagnetic and anisotropic waveguides with magnetic and open walls. *IEE Proceedings Pt. H* 134 (December 1987): 488-496.
- Ishimaru, A., *Electromagnetic wave propagation, radiation, and scattering*. United States of America: Prentice-Hall, 1991.
- Itoh, T., ed., *Numerical techniques for microwave and millimeter-wave passive structures*. Singapore: John Wiley & Sons, 1989.
- Jin, J., *Finite element method in electromagnetics*. Singapore: John Wiley & Sons, 1993.
- Kong, J. A., *Electromagnetic wave theory*. Singapore: John Wiley & Sons, 1986.
- Koshiba, M., and Inoue, K., Simple and Efficient Finite-Element Analysis of Microwave and Optical Waveguides. *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques* 40 (February 1992): 371-377.
- Koshiba, M., Maruyama, S., and Hirayama, K., A Vector Finite Element Method With the High-Order Mixed-Interpolation-Type Triangular Elements for Optical Waveguiding Problems. *IEEE Trans. Lightwave Technology* 12 (March 1994): 495-502.
- Lee, J., Finite Element Analysis of Lossy Dielectric Waveguides. *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques* 42 (June 1994): 1025-1031.
- Lee, J., Sun, D., and Cendes, Z. J., Full-wave Analysis of Dielectric Waveguides Using Tangential Vector Finite Elements. *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques* 39 (August 1991): 1262-1271.
- Lee, J., Sun, D., and Cendes, Z. J., Tangential Vector Finite Elements for Electromagnetic Field Computation. *IEEE Trans. Magnetics* 27 (September 1991): 4032-4035.
- Nedelec, J. C., Mixed Finite Element in R^3 . *Num. Math.* 35(1980): 315-341.
- Savage, J. S., and Peterson, A. F., Higher-Order Vector Finite Elements for Tetrahedral Cells. *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques* 44 (June 1996): 874-879.
- Silvester, P. P., and Ferrari, R. I., *Finite element for electrical engineer*. 2nd ed. Malta: Cambridge University Press, 1991.
- Steele, C. W., *Numerical computation of electric and magnetic fields*. United States of American: Van Nostrand Reinhold, 1987.

- Svedin, J. A. M., A Numerically Efficient Finite-Element Formulation for the General Waveguide Problem Without Spurious Modes. *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques* 37 (November 1989): 1708-1715.
- Tuptim, A., Numerical Analysis of Electromagnetic Fields by the Finite Element and Finite Difference Methods. Doctoral dissertation, Graduate School of Engineering, Osaka University, 1989.
- Tuptim, A., Matsuhara, M., and Kumagai, N., Finite-Element Analysis of Waveguide Modes: A Novel Approach That Eliminates Spurious Modes. *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques* 35 (February 1987): 117-123.
- Valor, L., and Zapata, J., Efficiency Finite Element Analysis of Waveguides with Lossy Inhomogenous Anisotropic Materials Characterized by Arbitrary Permittivity and Permeability Tensors. *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques* 43 (October 1995): 2452-2459.
- Webb, J. P., Edge Element and What They can do for You. *IEEE Trans. Magnetics* 29 (March 1993): 1460-1465.
- Wang, J. S., and Ida, N., Eigenvalue Analysis in Anisotropically Loaded Electromagnetic Cavities Using "Edge" Finite Element. *IEEE Trans. Magnetics* 28 (March 1992): 1438-1441.

ภาคผนวก

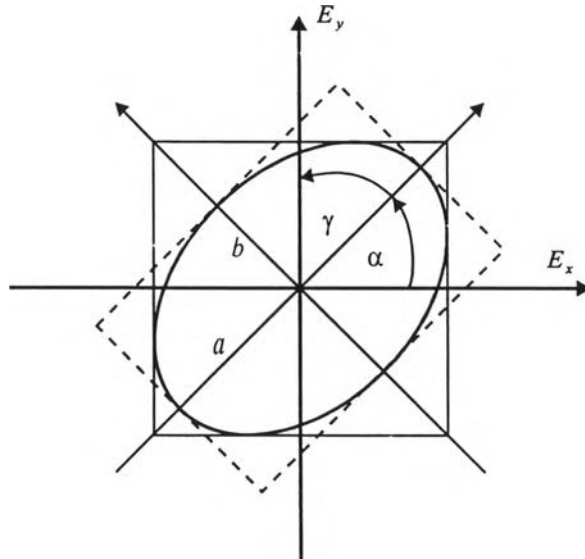
ภาคผนวก ก.

โพลาริเซชัน

โพลาริเซชัน (Ishimaru, 1991 ; Kong, 1986) หมายถึง เส้นทางเดินของเวกเตอร์ความเข้มสนามไฟฟ้าที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา เมื่อเรากำหนดให้ตำแหน่งที่จุด ๆ หนึ่งคงที่ ถ้าเส้นทางเดินของความเข้มสนามไฟฟ้าเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงตลอด คลื่นจะมีโพลาริเซชันแบบเชิงเส้น (linear polarization) ถ้าความเข้มสนามไฟฟ้ามีเส้นทางเดินเป็นวงกลมจะเรียกว่า โพลาริเซชันแบบวงกลม (circular polarization) สมการที่อธิบายการเกิดโพลาริเซชันในรูปโดยทั่วไปจะประกอบด้วยเวกเตอร์สนามสององค์ประกอบที่ตั้งฉากกันและตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่น โดยเขียนในโดเมนทางเวลาดังนี้

$$\mathbf{E}_t = E_{x0} \cos(\omega t + \varphi_x) \mathbf{a}_x + E_{y0} \cos(\omega t + \varphi_y) \mathbf{a}_y \quad (\text{ก.1})$$

เมื่อ E_{x0} และ E_{y0} คือขนาด φ_x และ φ_y คือเฟสของความเข้มสนามไฟฟ้าแนวแกน x และ y ตามลำดับ



รูปที่ ก.1 โพลาริเซชันแบบวงรี

จากสมการ (ก.1) สามารถเขียนในรูปโพลาริเซชันแบบวงรี (elliptical polarization) โดยแยกส่วนเปลี่ยนแปลงทางเวลาเขียนได้ดังนี้

$$\frac{E_x}{E_{x0}} \sin(\varphi_v) - \frac{E_y}{E_{y0}} \sin(\varphi_v) = \cos(\omega t) \sin(\varphi) \quad (\text{ก.2})$$

$$\frac{E_x}{E_{x0}} \cos(\varphi_v) - \frac{E_y}{E_{y0}} \cos(\varphi_v) = -\sin(\omega t) \sin(\varphi) \quad (\text{ก.3})$$

เมื่อ $\varphi = \varphi_v - \varphi_x$ จากนั้นจัดตัวแปรทางเวลาเราจะได้สมการโพลาริเซชันแบบวงรีมีดังนี้

$$\left(\frac{E_x}{E_{x0}}\right)^2 + \left(\frac{E_y}{E_{y0}}\right)^2 - 2\frac{E_x E_y}{E_{x0} E_{y0}} \cos(\varphi) = \sin^2(\varphi) \quad (\text{ก.4})$$

ในรูปที่ ก.1 แสดงโพลาริเซชันแบบวงรี โดย α (Kong, 1986) ทำมุมกับแกน x และ γ ทำมุมกับแกนหลักของวงรีมีสมการดังนี้

$$\alpha = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{2E_{x0} E_{y0} \cos(\varphi)}{E_{x0}^2 - E_{y0}^2} \right) \quad (\text{ก.5})$$

$$\tan(\gamma) = \pm \frac{b}{a} \quad (\text{ก.6})$$

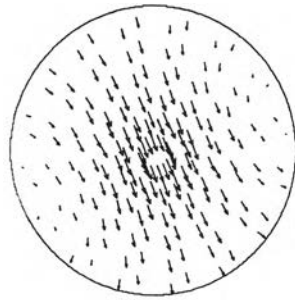
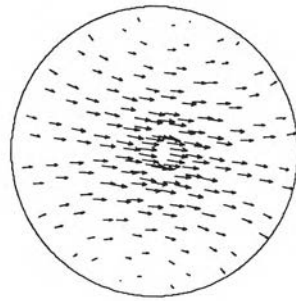
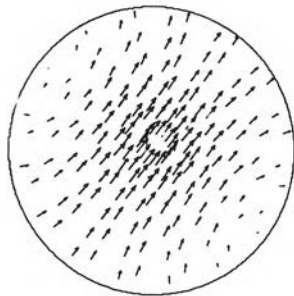
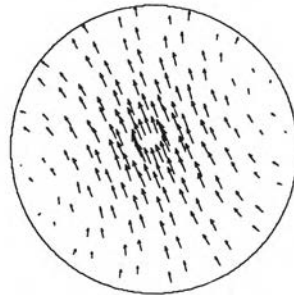
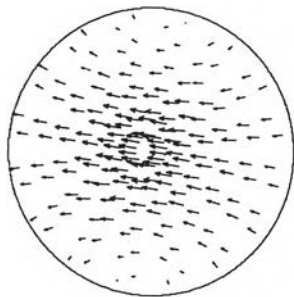
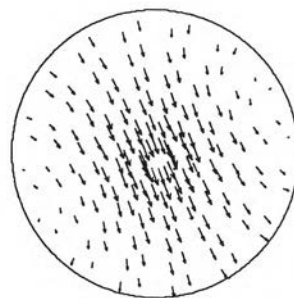
เมื่อ a คือ ความยาวของแกนหลัก และ b คือ ความยาวของแกนรองของวงรี

การศึกษาการเกิดโพลาริเซชันในท่อนำคลื่นโพลาริเซชันเนติกแสดงได้ดังนี้ แบบรูปความเข้มสนามไฟฟ้าในโหมดพื้นฐานที่มีโพลาริเซชันแบบวงรีหมุนขวาและหมุนซ้ายของท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยวัสดุโพลาริเซชันเนติกมีภาคตัดขวางรูปวงกลม ตัวกลางโพลาริเซชันเนติกมีค่า $\mu = 1.0$, $\kappa/\mu = 0.750$ และ $\epsilon_r = 15.0$ กำหนด $k_0 a = 0.6$ มุมการหมุนเปลี่ยนแปลงจาก 0 องศา ถึง 360 องศา ดังรูปที่ ก.2 และรูปที่ ก.3 ซึ่งจะพบว่าแบบรูปความเข้มสนามไฟฟ้าในโหมดพื้นฐานนี้จะเหมือนกับแบบรูปความเข้มสนามไฟฟ้าในโหมดพื้นฐานของท่อนำคลื่นกลวงมีภาคตัดขวางรูปวงกลมแต่จะมีโพลาริเซชันต่างกัน และโพลาริเซชันแบบวงรีหมุนขวาและหมุนซ้ายที่พิจารณาแต่ละตำแหน่งพิกัดบนภาคตัดขวางของท่อนำคลื่นดังรูปที่ ก.4 และรูปที่ ก.5 โดยกำหนดตำแหน่งพิกัดจำนวน 12 จุดดังตารางที่ ก.1 และกำหนดรัศมีของท่อนำคลื่นมีขนาด 1 หน่วย จากรูปจะพบว่าโพลาริเซชันที่ตำแหน่งทุกจุดบนภาคตัดขวางของท่อนำคลื่นจะมีลักษณะโพลาริเซชันแตกต่างกันไปกล่าวคือ ตำแหน่งพิกัดจุดศูนย์กลางของท่อนำคลื่นความเข้มสนามไฟฟ้าจะโพลาริเซชันแบบวงกลม จากนั้นตรงบริเวณใกล้จุดศูนย์กลางของท่อนำคลื่น โพลาริเซชันในลักษณะใกล้เคียงกับโพลาริเซชันแบบวงกลม และที่ตำแหน่งพิกัดห่างจากจุดศูนย์กลางออกไปโพลาริเซชันแบบวงรีและมีค่าความเยื้องศูนย์กลางมากขึ้น จากการเกิดโพลาริเซชันแบบวงกลมที่

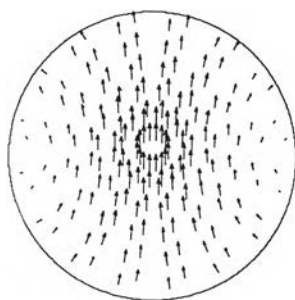
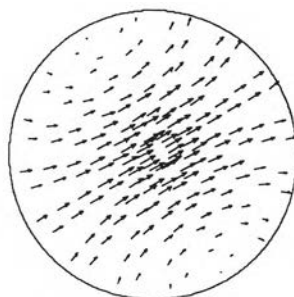
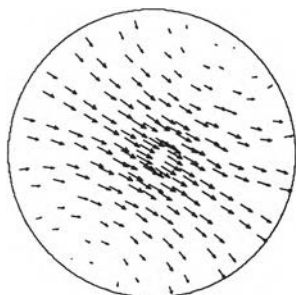
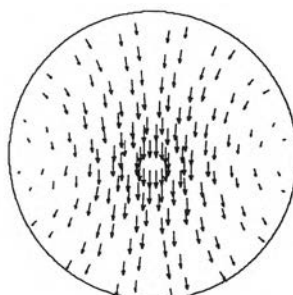
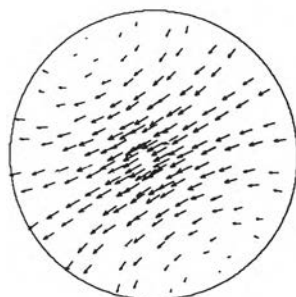
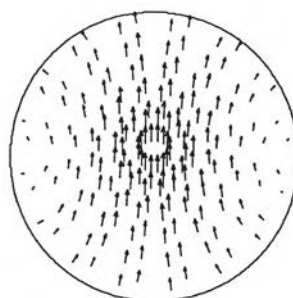
ตำแหน่งพิกัดจุดศูนย์กลางของท่อนำคลื่นนี้จึงกล่าวได้ว่าตรงบริเวณจุดศูนย์กลางของท่อนำคลื่น สนามมีลักษณะใกล้เคียงกับคลื่นระนาบ ทำให้เราประมาณได้ว่ามีคลื่นระนาบเกิดในตัวกลางใจโรแมกเนติกที่มีขนาดอนันต์ได้ และผลอันนี้จะเป็นส่วนสำคัญของการวิเคราะห์การหมุนฟาราเดย์

ตารางที่ ก.1 พิกัด ณ จุดกึ่งกลางอิมเมนต์ของท่อนำคลื่นมีภาคตัดขวางรูปวงกลม

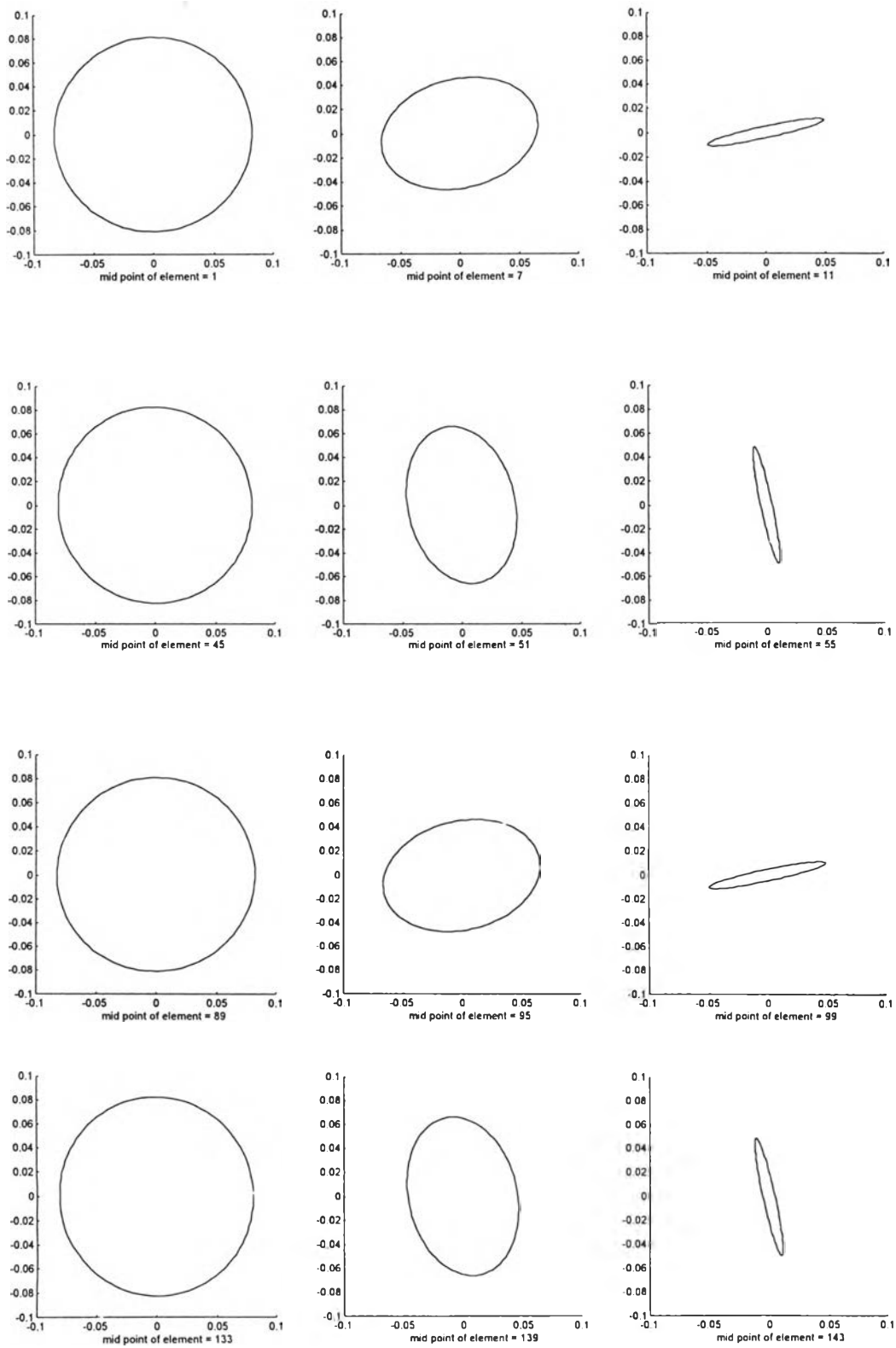
พิกัด ณ จุดกึ่งกลางของอิมเมนต์(x,y)			
1	(0.1068 , 0.0212)	89	(-0.1068 , -0.0212)
7	(0.5941 , 0.0850)	95	(-0.5941 , -0.0850)
11	(0.9190 , 0.1275)	99	(-0.9190 , -0.1275)
45	(-0.0212 , 0.1068)	133	(0.0212 , -0.1068)
51	(-0.0850 , 0.5941)	139	(0.0850 , -0.5941)
55	(-0.1275 , 0.9190)	143	(0.1275 , -0.9190)

(ก) $\omega t = 0^\circ$ (ข) $\omega t = 60^\circ$ (ค) $\omega t = 120^\circ$ (ง) $\omega t = 180^\circ$ (จ) $\omega t = 240^\circ$ (ฉ) $\omega t = 360^\circ$

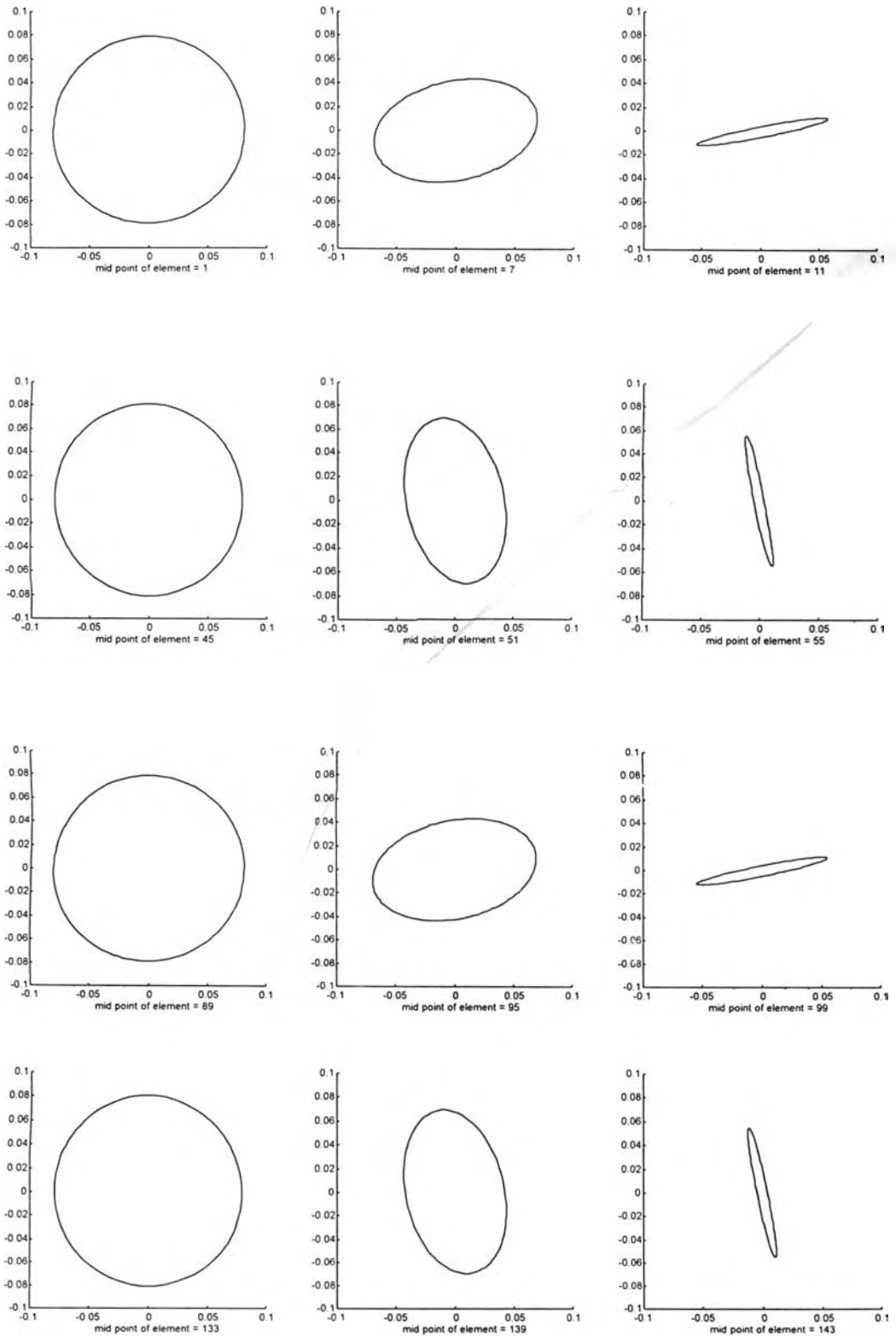
รูปที่ ก.2 แบบรูปความเข้มสนามไฟฟ้าในโหมดพื้นฐานที่มีโพลาไรเซชันแบบวงรีหมุนขวา
ของท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยวัสดุไดโรแมกเนติกมีภาคตัดขวางรูปวงกลม

(ก) $\omega t = 0^\circ$ (ข) $\omega t = 60^\circ$ (ค) $\omega t = 120^\circ$ (ง) $\omega t = 180^\circ$ (จ) $\omega t = 240^\circ$ (ฉ) $\omega t = 360^\circ$

รูปที่ ก.3 แบบรูปความเข้มสนามไฟฟ้าในโมดพื้นฐานที่มีโพลาไรเซชันแบบวงรีหมุนซ้าย
ของท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยวัสดุไอโรแมกเนติกมีภาคตัดขวางรูปวงกลม



รูปที่ ก.4 โพลาริเซชันแบบวงรีหมุนขวาในโมดพื้นฐานของ
ท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยวัสดุไอโรแมกเนติกมีภาคตัดขวางรูปวงกลม



รูปที่ ก.5 โพลาริเซชันแบบวงรีหมุนซ้ายในโมดพื้นฐานของ
 ท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยวัสดุไอโรแมกเนติกมีภาคตัดขวางรูปวงกลม

ภาคผนวก ข.

การหมุนฟาราเดย์

ในตัวกลางแบบไอโซโทรปิกที่มีขนาดอนันต์ (infinite) และทิศทางการเดินทางของคลื่นระนาบมีความสัมพันธ์กับทิศการโพลาไรซ์ของสนามแม่เหล็กสถิตในทิศทางเดียวกัน สิ่งที่เกิดขึ้นคือ โมดการเคลื่อนที่ของคลื่นมี 2 โมดซึ่งแต่ละโมดมีโพลาไรเซชันแบบวงกลมและมีการหมุนในทิศทางตรงกันข้ามกัน (โพลาไรเซชันแบบวงกลมหมุนขวาและวงกลมหมุนซ้าย) คลื่นที่โพลาไรเซชันแบบวงกลมทั้งสองนี้ก็จะมีความถี่ที่ประกอบด้วยค่าคงตัวเฟสแทนด้วย β^+ และ β^- ผลรวมของคลื่นที่มีโพลาไรเซชันแบบวงกลมหมุนขวาและวงกลมหมุนซ้ายทำให้เกิดคลื่นที่มีโพลาไรเซชันแบบเชิงเส้น มีสมการดังต่อไปนี้

$$\mathbf{E}^+ = \frac{E_0}{2}(\mathbf{a}_x - j\mathbf{a}_y)\exp(-j\beta^+z) \quad (\text{ข.1})$$

$$\mathbf{E}^- = \frac{E_0}{2}(\mathbf{a}_x + j\mathbf{a}_y)\exp(-j\beta^-z) \quad (\text{ข.2})$$

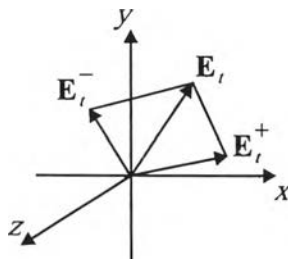
โดยคลื่นที่มีโพลาไรเซชันแบบวงกลมหมุนขวาและหมุนซ้ายที่เดินทางในแกน z เปลี่ยนแปลงด้วยฟังก์ชัน $\exp(-j\beta^+z)$ และ $\exp(-j\beta^-z)$ ตามลำดับ ผลรวมของความเข้มสนามไฟฟ้าตามสมการ (ข.1) และ (ข.2) มีดังนี้

$$\begin{aligned} E_z &= \frac{E_0}{2}(\mathbf{a}_x - j\mathbf{a}_y)\exp(-j\beta^+z) + \frac{E_0}{2}(\mathbf{a}_x + j\mathbf{a}_y)\exp(-j\beta^-z) \\ &= E_0 \left[\mathbf{a}_x \cos\left(\frac{\beta^+ - \beta^-}{2}z\right) - \mathbf{a}_y \sin\left(\frac{\beta^+ - \beta^-}{2}z\right) \right] \exp[-j(\beta^+ + \beta^-)z/2] \end{aligned} \quad (\text{ข.3})$$

จากสมการ (ข.3) ผลของความเข้มสนามไฟฟ้า E_z ยังคงเป็นคลื่นที่โพลาไรเซชันแบบเชิงเส้นที่เดินทางในแกน z โดยมีค่าคงตัวเฟสเท่ากับผลเฉลี่ยค่าคงตัวเฟสคลื่นของโมดที่โพลาไรเซชันแบบวงกลมหมุนขวาและหมุนซ้ายเมื่อเรากำหนดตำแหน่งบนแกน z ระยะทางใด ๆ ทิศโพลาไรเซชันที่วัดจากแกน x คือ

$$\begin{aligned} \theta &= \tan^{-1} \frac{E_y}{E_x} = \tan^{-1} \left[-\tan\left(\frac{\beta^+ - \beta^-}{2}z\right) \right] \\ &= -\left(\frac{\beta^+ - \beta^-}{2}\right)z \end{aligned} \quad (\text{ข.4})$$

เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า การหมุนฟาราเดย์ ค้นพบครั้งแรกโดย Michael Faraday ในระหว่างที่เขาศึกษาการเดินทางของแสงในตัวกลางที่เป็นของเหลวและมีคุณสมบัติเป็นสารแม่เหล็ก ข้อสังเกตที่ได้จากปรากฏการณ์อันนี้คือ เมื่อระยะทางแกน z มีตำแหน่งคงที่ มุมที่เกิดจากโพลาไรเซชันจะคงที่ แตกต่างจากกรณีที่มีโพลาไรเซชันแบบวงกลม มุมที่เกิดจากโพลาไรเซชันจะหมุนเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา แม้ว่าสิ่งที่ได้กล่าวถึงมานี้จะเป็นจริงในกรณีที่เฟอร์ไรต์เป็นตัวกลางที่ขนาดอนันต์ แต่ยังคงสามารถนำหลักการอันนี้มาศึกษาการหมุนฟาราเดย์ในตัวกลางเฟอร์ไรต์ที่ถูกล้อมรอบด้วยตัวนำไฟฟ้าสมบูรณ์หรือท่อนำคลื่นที่มีเฟอร์ไรต์ การพิจารณาความเข้มสนามไฟฟ้าตามขวางของโหมดพื้นฐานที่เกิดขึ้นบนภาคตัดขวางท่อนำคลื่นจากการคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์เพื่อการวิเคราะห์การหมุนฟาราเดย์มีดังนี้



รูปที่ ข.1 การรวมของความเข้มสนามไฟฟ้าตามขวางที่มีโพลาไรเซชันแบบหมุนขวาและหมุนซ้าย

$$\mathbf{E}_t = \mathbf{E}_t^+ + \mathbf{E}_t^- \quad (\text{ข.5})$$

$$\mathbf{E}_t = (E_x^+ \mathbf{a}_x + E_y^+ \mathbf{a}_y) \exp(-j\beta^+ z) + (E_x^- \mathbf{a}_x + E_y^- \mathbf{a}_y) \exp(-j\beta^- z) \quad (\text{ข.6})$$

เมื่อ $+$ และ $-$ แทนโพลาไรเซชันของความเข้มสนามไฟฟ้าตามขวางแบบหมุนขวาและหมุนซ้ายตามลำดับ ซึ่งผลเฉลยของความเข้มสนามไฟฟ้าตามแนวแกน x และแกน y จากวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์เป็นจำนวนเชิงซ้อน จากสมการ (ข.5) แสดงการรวมกันของความเข้มสนามไฟฟ้าตามขวางที่มีโพลาไรเซชันแบบวงรีแบบหมุนขวาและหมุนซ้ายบนตำแหน่งพิกัดจุด ๆ หนึ่งโดยคลื่นเคลื่อนที่ในแนวแกน z ดังรูปที่ ข.1 ดังนั้นจากสมการนี้เราสามารถแยกความเข้มสนามไฟฟ้าตามแนวแกน x และแกน y แสดงได้ดังนี้

$$E_x \mathbf{a}_x = \left\{ \begin{array}{l} |E_x^+| \cos(\phi_x^+ - \beta^+ z) + j |E_x^+| \sin(\phi_x^+ - \beta^+ z) + \\ |E_x^-| \cos(\phi_x^- - \beta^- z) + j |E_x^-| \sin(\phi_x^- - \beta^- z) \end{array} \right\} \mathbf{a}_x \quad (\text{ข.7})$$

$$E_y \mathbf{a}_y = \left\{ \begin{array}{l} |E_y^+| \cos(\phi_y^+ - \beta^+ z) + j |E_y^+| \sin(\phi_y^+ - \beta^+ z) + \\ |E_y^-| \cos(\phi_y^- - \beta^- z) + j |E_y^-| \sin(\phi_y^- - \beta^- z) \end{array} \right\} \mathbf{a}_y \quad (\text{ข.8})$$

จากสมการ (ข.7) และ (ข.8) แปลงให้อยู่ในรูปของโดเมนทางเวลาที่มีรูปทั่วไปได้

ประวัติผู้เขียน

นายปรกโมทย์ งามอิสระกุล เกิดวันที่ 20 ธันวาคม พ.ศ. 2514 ที่อำเภอสะเดา จังหวัดสงขลา สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ในปีการศึกษา 2537 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2538

