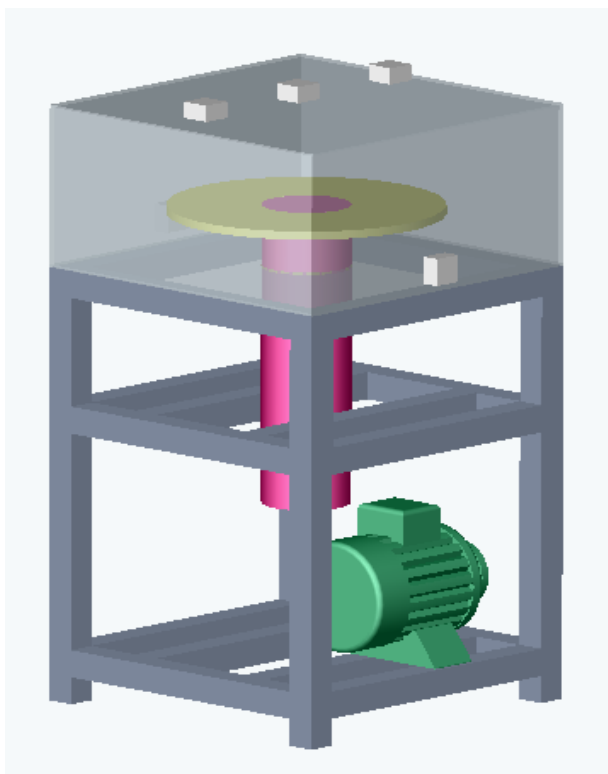




รูปที่ 5-1 เครื่องต้นแบบอุ่นตัวอย่างด้วยคลื่นไมโครเวฟที่ควรพัฒนาต่อไป

1. ควรทำการยกระดับของจานหมุนให้สูงขึ้นเพื่อให้คลื่นสามารถตกกระทบบริเวณพื้นด้านล่างของห้องอุ่น และสะท้อนกลับไปสู่ตัวอย่างด้านที่วางติดกับถาดหมุน โดยถาดหมุนนี้ควรทำด้วยวัสดุโปร่งแสง เช่น กระดาษ เพื่อให้คลื่นไมโครเวฟส่งผ่านเข้าสู่เนื้ออย่างด้านล่างได้ดังเสนอรูปเครื่องต้นแบบที่ควรพัฒนาต่อไปไว้ดังรูปที่ 5-1
2. ควรมีการทดลองนำหลอดแมกนีตรอนขนาดความถี่ 0.915 GHz มาร่วมใช้กับหลอดแมกนีตรอนความถี่ 2.45 GHz ซึ่งการใช้หลอดแมกนีตรอนที่ความถี่ 0.915 GHz จะช่วยทำให้อุณหภูมิที่จุดกึ่งกลางตัวอย่างมีอุณหภูมิสูงขึ้นเนื่องจากความสามารถในการแทรกสอดของคลื่นที่สูงกว่า
3. ทดสอบผลกระทบต่อการใช้งานกรณีใช้คลื่นไมโครเวฟในการอุ่นตัวอย่าง โดยการนำตัวอย่างต้นที่ผ่านกระบวนการผลิตซึ่งประกอบด้วยกระบวนการอุ่นตัวอย่างด้วยเครื่องอุ่นตัวอย่างต้นด้วยคลื่นไมโครเวฟมาทดลองใช้งาน
4. สำหรับค่า Dielectric Properties ของยางเป็นสมบัติที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ โดยทั้งนี้ควรทดสอบด้วยเครื่องมือความถี่สูงจึงจะมีความแม่นยำ

บรรณานุกรม

เอกสารและผลงานวิจัย

- [1] M. Vollmer, “*Physics of Microwave Oven*”, U. Appl. Sci. Brandenburg, Germany, 2004.
- [2] รัชดา โสภาคะยัง, “การเปลี่ยนแปลงการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเนื้อยางระหว่างกระบวนการอบคงรูป”, วิทยานิพนธ์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, กรุงเทพมหานคร, 2545
- [3] Suri Ryyanen, “*Microwave Heating Uniformity of Multicomponent Prepared Foods*”, Academic Dissertation, Department of Food Thecnology, University of Helsinki, 2002.
- [4] Xiaofeng Wu, M.S., “*Experimental and Theoretical Study of Microwave Heating of Thermal Runaway Materials*”, Dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State University, December 2002.
- [5] Wladyslaw Adamski and Marek Kitlinski, “*On Measurements Applied in Scientific Researches of Microwave Heating Processes*”, Technical University of Gdansk, Poland, 2001.
- [6] M. Heidemann, H. Garbe and R. Keibel, “*Calculation of Electromagnetically and Thermally Coupled Fields in Real Soil Decontamination*”, University of Hanover, Germany, 2000.
- [7] Yu V Bykov, K I Rybakov and V E Semenov, “*High-temperature microwave processing of materials*”, Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences, Russia, 2000.
- [8] Nathaniel D. Terrell, “*Field Simulation for the Microwave Heating of Thin Ceramic Fibers*”, Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, July 1998.
- [9] Roger Meredith, “*Engineers’ Handbook of Industrial Microwave Heating*”, The Institution of Electrical Engineers, London, 1998.
- [10] National Research Council, “*Microwave Processing of Materials*”, Publication NMAB-473, National Academy Press, Washington, D.C., 1994.
- [11] D.A. Hills, “*Heat Transfer and Vulcanisation of Rubber*”, Elsevier Publishing Co. Ltd., New York, 1971
- [12] David Jenn, “*Electromagnetic Wave Propagation*”, Department of Electrical & Computer Engineering, Naval Postgraduate School, Monterey, California.

[13] David W. Ward and Keith A. Nelson, “*Finite Difference Time Domain (FDTD) Simulation of Electromagnetic Wave Propagation Using a Spreadsheet*”, Department of Chemistry, Massachusetts Institute of Technology.

เว็บไซต์แหล่งข้อมูล

[14] http://www.advancedenergy.org/industrial_processes/process_technologies/process_heating/microwave.html

[15] <http://www.amtmicrowave.com/theory.html> (ATM Advanced Manufacturing Technology)

[16] <http://books.nap.edu/books/0309050278/html/10.html#pagetop>

[17] <http://www.chinaguoguang.com/uk/Products/MPP-1.htm>

[18] <http://www.cober.com/cont.vulcan.html>

[19] <http://www.industrialmicrowave.com>

[20] <http://www.industrialmicrowave.com/technologies.htm>

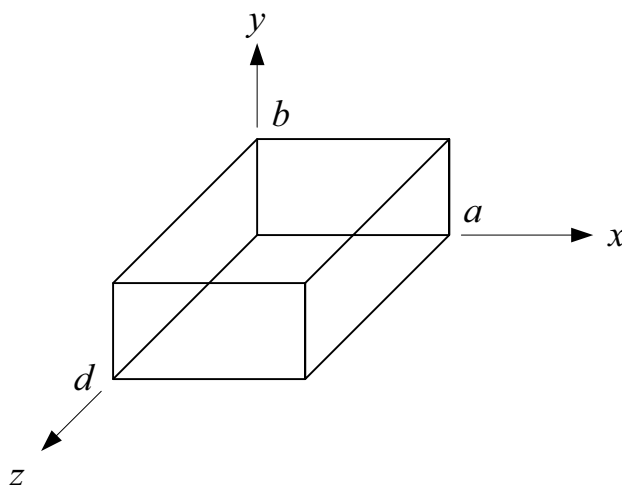
[21] <http://www.romill.cz/>

ภาคผนวก

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการหาความถี่เรโซแนนซ์ภายในห้องอุ่น

หลักการของความถี่เรโซแนนซ์

ความถี่เรโซแนนซ์สามารถหาได้จากการพิจารณาสมการคลื่นภายในโพรง โดยการหา สนามไฟฟ้าและ สนามแม่เหล็กที่สอดคล้องกับเงื่อนไขขอบเขตโดยใช้หลักการแยกตัวแปร ซึ่งโพรงดังกล่าวนี้จะเป็นโลหะหรือไม่ก็ได้และรูปทรงก็อาจเป็นได้ทั้งทรงสี่เหลี่ยม ทรงกระบอก หรือทรงกลม แต่ในที่นี้จะกล่าวเฉพาะโครงสร้างที่เป็นโลหะทรงสี่เหลี่ยมเท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ 1 เนื่องจากสอดคล้องและเหมาะสมกับโครงสร้างของแอปพลิเคชันที่ออกแบบสำหรับใช้เป็นเครื่องให้ความร้อนด้วยกำลังงานจากไมโครเวฟ อย่างไรก็ตามจะต้องแยกพิจารณาเป็นแบบแผนคลื่นสนามไฟฟ้าตามขวาง (Transverse Electric, TE) และแบบแผนคลื่นสนามแม่เหล็กตามขวาง (Transverse Magnetic, TM)



รูปที่ 1 โพรงตัวนำสี่เหลี่ยมในพิกัดคาร์ทีเซียน

1. ความถี่เรโซแนนซ์ในแบบแผนคลื่นสนามไฟฟ้าตามขวาง

ความถี่เรโซแนนซ์ในแบบแผนคลื่นสนามไฟฟ้าตามขวางเริ่มต้นด้วยการพิจารณาสนามไฟฟ้าและแม่เหล็กดังในสมการ (1) ซึ่งจะต้องสอดคล้องกับสมการศักย์เวกเตอร์ $\mathbf{F}$

$$\begin{aligned} E_x &= -\frac{1}{\epsilon} \frac{\partial F_z}{\partial y} & H_x &= -j \frac{1}{\omega \mu \epsilon} \frac{\partial^2 F_z}{\partial x \partial z} \\ E_y &= \frac{1}{\epsilon} \frac{\partial F_z}{\partial x} & H_y &= -j \frac{1}{\omega \mu \epsilon} \frac{\partial^2 F_z}{\partial y \partial z} \\ E_z &= 0 & H_z &= -j \frac{1}{\omega \mu \epsilon} \left(\frac{\partial^2}{\partial z^2} + \beta^2 \right) F_z \end{aligned} \quad (1)$$

โดยที่ F_z คือฟังก์ชันศักย์สเกลาร์ที่อยู่ในส่วนประกอบของ z ที่จะต้องเป็นไปตามเงื่อนไขของสมการคลื่นแบบสเกลาร์

$$\nabla^2 F_z(x, y, z) + \beta^2 F_z(x, y, z) = 0 \quad (2a)$$

หรือ

$$\frac{\partial^2 F_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 F_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 F_z}{\partial z^2} + \beta^2 F_z = 0 \quad (2ข)$$

จากสมการ (1) สามารถหาคำตอบได้ด้วยวิธีการแยกตัวแปร โดยจะกำหนดให้

$$F_z(x, y, z) = f(x)g(y)h(z) \quad (3)$$

โดยที่

$$f_1(x) = A_1 e^{-j\beta_x x} + B_1 e^{+j\beta_x x}$$

$$g_1(y) = A_2 e^{-j\beta_y y} + B_2 e^{+j\beta_y y}$$

$$h_1(z) = A_3 e^{-j\beta_z z} + B_3 e^{+j\beta_z z}$$

จะเป็นตัวแปรที่ใช้สำหรับแทนการเดินทางของคลื่นเช่นในกรณีที่เป็นการเดินทางของคลื่นในท่อนำคลื่น เป็นต้น และ

$$f_2(x) = C_1 \cos(\beta_x x) + D_1 \sin(\beta_x x)$$

$$g_2(y) = C_2 \cos(\beta_y y) + D_2 \sin(\beta_y y)$$

$$h_2(z) = C_3 \cos(\beta_z z) + D_3 \sin(\beta_z z)$$

จะเป็นตัวแปรที่ใช้สำหรับแทนเงื่อนไขขอบเขตหรือที่ไม่ใช่เป็นการเดินทางของคลื่น ดังนั้นสมการ (3) จึงสามารถแทนตามตัวแปรได้เป็น

$$F_z(x, y, z) = [C_1 \cos(\beta_x x) + D_1 \sin(\beta_x x)] [C_2 \cos(\beta_y y) + D_2 \sin(\beta_y y)] \times [C_3 \cos(\beta_z z) + D_3 \sin(\beta_z z)] \quad (4)$$

ในขณะที่

$$\beta_x^2 + \beta_y^2 + \beta_z^2 = \beta^2 = \omega^2 \mu \epsilon \quad (5)$$

เงื่อนไขขอบเขตของโครงสร้างโพรงตัวนำสี่เหลี่ยมคือการที่ค่าของสนามมีค่าเป็นศูนย์ที่ผนังของโพรงตัวนำนั้น ซึ่งจะเป็นสนามในแนวสัมผัส จากรูปที่ 1 จะได้ว่าที่ผนังด้านบนและด้านล่าง

$$E_x(0 \leq x \leq a, y = 0, z) = E_x(0 \leq x \leq a, y = b, z) = 0 \quad (6ก)$$

$$E_z(0 \leq x \leq a, y = 0, z) = E_z(0 \leq x \leq a, y = b, z) = 0 \quad (6ข)$$

ที่ผนังด้านซ้ายและด้านขวา

$$E_y(x=0, 0 \leq y \leq b, z) = E_y(x=a, 0 \leq y \leq b, z) = 0 \quad (6ก)$$

$$E_z(x=0, 0 \leq y \leq b, z) = E_z(x=a, 0 \leq y \leq b, z) = 0 \quad (6ง)$$

ที่ผนังด้านหน้าและด้านหลัง

$$E_x(0 \leq x \leq a, 0 \leq y \leq b, z=0) = E_x(0 \leq x \leq a, 0 \leq y \leq b, z=d) = 0 \quad (6จ)$$

$$E_y(0 \leq x \leq a, 0 \leq y \leq b, z=0) = E_y(0 \leq x \leq a, 0 \leq y \leq b, z=d) = 0 \quad (6ฉ)$$

เมื่อได้เงื่อนไขขอบเขตแล้วต่อไปจะเป็นการแก้สมการเพื่อหาตัวแปรที่ยังไม่ทราบค่า เริ่มจากแทนสมการ (4) ลงในสมการ (1) ในกรณีของ E_x ซึ่งจะสามารถเขียนส่วนประกอบ X ของสนามไฟฟ้าได้เป็น

$$E_x^+(x, y, z) = -\frac{\beta_y}{\varepsilon} [C_1 \cos(\beta_x x) + D_1 \sin(\beta_x x)] [-C_2 \sin(\beta_y y) + D_2 \cos(\beta_y y)] \times [C_3 \cos(\beta_z z) + D_3 \sin(\beta_z z)] \quad (7)$$

ให้สมการ (7) เป็นไปตามเงื่อนไขขอบเขตในสมการ (6ก) ณ ผนังด้านล่างจะได้

$$E_x^+(0 \leq x \leq a, y=0, z) = -\frac{\beta_y}{\varepsilon} [C_1 \cos(\beta_x x) + D_1 \sin(\beta_x x)] [-C_2(0) + D_2(1)] \times [C_3 \cos(\beta_z z) + D_3 \sin(\beta_z z)] = 0 \quad (8)$$

จะได้ผลเฉลยของสมการ (8) ที่สอดคล้องและเป็นจริง เมื่อ $D_2=0$ และจากนี้ กำหนดให้สมการ (7) เป็นไปตามเงื่อนไขขอบเขตในสมการ (6ก) ณ ผนังด้านบนจะได้

$$E_x^+(0 \leq x \leq a, y=b, z) = -\frac{\beta_y}{\varepsilon} [C_1 \cos(\beta_x x) + D_1 \sin(\beta_x x)] [-C_2 \sin(\beta_y b)] \times [C_3 \cos(\beta_z z) + D_3 \sin(\beta_z z)] = 0 \quad (9)$$

สำหรับคำตอบที่เป็นจริงแล้ว สมการ (9) จะสอดคล้องเมื่อ $\sin(\beta_y b) = 0$ ส่งผลให้

$$\beta_y b = \sin^{-1}(0) = n\pi, \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (10ก)$$

หรือ

$$\beta_y = \frac{n\pi}{b}, \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (10ข)$$

ทำนองเดียวกันนี้สามารถประยุกต์เงื่อนไขขอบเขตไปบนผนังด้านซ้ายและขวาในสมการ (6ค) ได้อีก ซึ่งจะได้ว่า $D_1=0$ และ

$$\beta_x = \frac{m\pi}{a}, \quad m = 0, 1, 2, \dots \quad (11)$$

และเช่นเดียวกันสำหรับผนังด้านหน้าและด้านหลังก็สามารถจะประยุกต์เงื่อนไขขอบเขตและแก้สมการได้เป็น

$$\beta_z = \frac{p\pi}{d}, \quad p = 1, 2, 3, \dots \quad (12)$$

เมื่อ $C_3=0$ และจากสมการที่ (4) จะสามารถลดรูปเหลือเพียง

$$F_z(x, y, z) = A_{mnp} \cos(\beta_x x) \cos(\beta_y y) \sin(\beta_z z) \quad (13)$$

โดยที่ $A_{mnp} = C_1 C_2 D_3$ และ

$$\left. \begin{aligned} \beta_x &= \frac{m\pi}{a} & m &= 0, 1, 2, \dots \\ \beta_y &= \frac{n\pi}{b} & n &= 0, 1, 2, \dots \\ \beta_z &= \frac{p\pi}{d} & p &= 1, 2, 3, \dots \end{aligned} \right\} m = n \neq 0 \quad (13ก)$$

ซึ่งจะได้ว่าในแบบแผนคลื่นหนึ่ง ๆ จะต้องมีเลขจำนวนเต็มของครึ่งความยาวคลื่นเพื่อแสดงถึงแบบแผนคลื่นนั้น และจากสมการที่ (13ก) พบว่าค่า m และ n จะต้องไม่เป็นศูนย์พร้อมกันเพราะจะทำให้สมการใดสมการหนึ่งใน (1) มีค่าเป็นศูนย์ซึ่งจะไม่เป็นจริง และ p จะต้องเริ่มต้นด้วย 1 ในกรณีที่ m หรือ n ค่าใดค่าหนึ่งมีค่าเป็นศูนย์ ซึ่งก็หมายความว่าแบบแผนคลื่นต่ำสุดของคลื่นสนามไฟฟ้าตามขวางเป็น 101 หรือ 011

ดังนั้นส่วนประกอบของสนามไฟฟ้าหรือแม่เหล็กตามสมการ (1) จึงเขียนได้เป็น

$$E_x = \frac{\beta_y}{\varepsilon} A_{mnp} \cos(\beta_x x) \sin(\beta_y y) \sin(\beta_z z) \quad (14ก)$$

$$E_y = -\frac{\beta_x}{\varepsilon} A_{mnp} \sin(\beta_x x) \cos(\beta_y y) \sin(\beta_z z) \quad (14ข)$$

$$E_z = 0 \quad (14ค)$$

$$H_x = j \frac{\beta_x \beta_z}{\omega \mu \varepsilon} A_{mnp} \sin(\beta_x x) \cos(\beta_y y) \cos(\beta_z z) \quad (14ง)$$

$$H_y = j \frac{\beta_y \beta_z}{\omega \mu \varepsilon} A_{mnp} \cos(\beta_x x) \sin(\beta_y y) \cos(\beta_z z) \quad (14จ)$$

$$H_z = -j \frac{A_{mnp}}{\omega \mu \varepsilon} (\beta_x^2 + \beta_y^2) \cos(\beta_x x) \cos(\beta_y y) \sin(\beta_z z) \quad (14ฉ)$$

โดยการใส่สมการ (13ก) สามารถเขียนสมการ (5) ได้เป็น

$$\beta_x^2 + \beta_y^2 + \beta_z^2 = \left(\frac{m\pi}{a} \right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b} \right)^2 + \left(\frac{p\pi}{d} \right)^2 = \beta_r^2 = \omega_r^2 \mu \varepsilon = (2\pi f_r)^2 \mu \varepsilon \quad (15)$$

ซึ่งจากสมการ (15) ทำให้หาความถี่เรโซแนนซ์ในแบบแผนคลื่นสนามไฟฟ้าตามขวางได้เป็น

$$(f_r)_{mnp}^{\text{TE}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{\mu\epsilon}} \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2 + \left(\frac{p\pi}{d}\right)^2} \quad (16)$$

2. ความถี่เรโซแนนซ์ในแบบแผนคลื่นสนามแม่เหล็กตามขวาง

การหาความถี่เรโซแนนซ์ในแบบแผนคลื่นสนามแม่เหล็กตามขวางมีขั้นตอนและวิธีการดังเช่นกับการหาความถี่เรโซแนนซ์ในแบบแผนคลื่นสนามไฟฟ้าตามขวาง แต่จะมีความแตกต่างกันอยู่บ้าง โดยจะต้องสอดคล้องกับศักย์เวกเตอร์ $\mathbf{A}$ ที่มีค่าเป็น $\hat{a}_z A_z(x, y, z)$ ซึ่งจะได้ส่วนประกอบของสนามในแกนต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

$$E_x = -j \frac{\beta_x \beta_z}{\omega \mu \epsilon} B_{mnp} \cos(\beta_x x) \sin(\beta_y y) \sin(\beta_z z) \quad (17ก)$$

$$E_y = -j \frac{\beta_y \beta_z}{\omega \mu \epsilon} B_{mnp} \sin(\beta_x x) \cos(\beta_y y) \sin(\beta_z z) \quad (17ข)$$

$$E_z = -j \frac{B_{mnp}}{\omega \mu \epsilon} (\beta_x^2 + \beta_y^2) \cos(\beta_x x) \cos(\beta_y y) \sin(\beta_z z) \quad (17ค)$$

$$H_x = \frac{\beta_y}{\mu} B_{mnp} \sin(\beta_x x) \cos(\beta_y y) \cos(\beta_z z) \quad (17ง)$$

$$H_y = -\frac{\beta_x}{\mu} B_{mnp} \cos(\beta_x x) \sin(\beta_y y) \cos(\beta_z z) \quad (17จ)$$

$$H_z = 0 \quad (17ฉ)$$

โดยมีเงื่อนไขว่า

$$\beta_x = \frac{m\pi}{a}, \quad m = 1, 2, 3, \dots \quad (18ก)$$

$$\beta_y = \frac{n\pi}{b}, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (18ข)$$

$$\beta_z = \frac{p\pi}{d}, \quad p = 0, 1, 2, \dots \quad (18ค)$$

ซึ่งจะทำให้การหาความถี่เรโซแนนซ์ในแบบแผนคลื่นสนามแม่เหล็กตามขวางได้เป็น

$$(f_r)_{mnp}^{\text{TM}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{\mu\epsilon}} \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2 + \left(\frac{p\pi}{d}\right)^2} \quad (19)$$

3. ความถี่เรโซแนนซ์โดยวิธีผลต่างสืบเนื่องเชิงเวลา

ความถี่เรโซแนนซ์โดยวิธีผลต่างสืบเนื่องเชิงเวลา สามารถหาโดยการกระตุ้นพัลส์เข้าไปในโครงสร้างที่ได้สร้างแบบจำลองกริดของผลต่างสืบเนื่องเชิงเวลาเอาไว้ ซึ่งอาจจะเป็นพัลส์แบบเกาส์ อนุพันธ์พัลส์แบบเกาส์ หรืออาจเป็นพัลส์จตุรัสก็ได้ หลังจากที่แทรกใส่พัลส์เข้าไปยังโครงสร้างที่เป็นเรโซเนเตอร์ที่ได้จำลองไว้แล้ว จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าขึ้นภายใน จากนั้นอีกไม่นานสนามที่ไม่ใช่เป็นส่วนประกอบของความถี่เรโซแนนซ์จะถูกกำจัดทิ้งไป และท้ายที่สุดก็จะเหลือแต่เพียงสนามที่ออสซิลเลตอยู่ภายในโครงสร้างดังกล่าวเป็นแบบแผนคลื่นเรโซแนนซ์ที่เราต้องการ

โดยทั่วไปแล้วผลรวมของสนามแม่เหล็กและไฟฟ้าที่ความถี่ต่าง ๆ จะได้ค่าสนามแม่เหล็กและไฟฟ้าในเวลาหนึ่งตามสมการต่อไปนี้

$$A(x, y, z, t) = \sum_s \Phi(x, y, z, f_s) \exp[-j2\pi f_s t] \quad (20)$$

เมื่อ A แทนด้วย E_x, E_y, E_z, H_x, H_y หรือ H_z ตัวใดตัวหนึ่ง และด้วยการแปลงฟูริเยร์สนามจากโดเมนเชิงเวลาจะได้สเปกตรัมในโดเมนเชิงความถี่ จากสมการ (20) สามารถเขียนได้เป็น

$$F(i, j, k, \Delta f_m) = \sum_{n=0}^{N_{\text{DFT}}-1} A(i, j, k, \Delta t_n) \exp\left[\frac{-j2\pi mn\Delta t}{N_{\text{DFT}}}\right] \quad (21)$$

ในสมการ (21) การแปลงฟูริเยร์ที่จุด (i, j, k) จะได้สเปกตรัม F จากความถี่ f_m ซึ่งหากเขียนกราฟระหว่างสเปกตรัมและความถี่ที่ได้นี้ โดยเปลี่ยนค่า m จะสังเกตเห็นสเปกตรัมหนึ่งที่มีค่ามากกว่าสเปกตรัมอื่นข้าง ๆ ซึ่งก็คือความถี่เรโซแนนซ์ (f_r) นั่นเอง แสดงดังสมการ (22)

$$\Phi(x, y, z, f_r) \propto F(x, y, z, f_m) \quad (22)$$

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าภายในเนื้อวัสดุ

การจำลองการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าภายในวัสดุนั้นจะใช้วิธีการ Finite difference time-domain (FDTD) เป็นเครื่องมือดีในการแก้ปัญหา ซึ่งวิธีการ FDTD นำเสนอครั้งแรกโดย Yee ในปี ค.ศ. 1966 และต่อมาถูกพัฒนาเป็น Direc solution of Maxwell's time dependent curl equation โดย Taflov และคนอื่นๆ ซึ่งเป็นวิธีการแก้ปัญหการกระจายตัวของคลื่นเมื่อกำหนดสถานะเริ่มต้น ซึ่งสามารถเขียนแบบจำลองการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าภายในเนื้อวัสดุได้ดังนี้

Yee's Finite Difference Algorithm

ในตัวกลางแบบ Isotropic นั้น สมการของ Maxwell's นั้นจะเขียนได้ดังนี้

$$\nabla \times \bar{E} = -\mu \frac{\partial \bar{H}}{\partial t} \quad (23)$$

$$\nabla \times \bar{H} = \sigma \bar{E} + \varepsilon \frac{\partial \bar{E}}{\partial t} \quad (24)$$

จากสมการที่ (23) และ (24) นั้นสามารถเขียนเป็นสมการในพิกัดฉากได้ดังนี้

$$\frac{\partial H_x}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial E_y}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial y} \right) \quad (25)$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial E_z}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial z} \right) \quad (26)$$

$$\frac{\partial H_z}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial E_x}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial x} \right) \quad (27)$$

$$\frac{\partial E_x}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \left(\frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} - \sigma E_x \right) \quad (28)$$

$$\frac{\partial E_y}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \left(\frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} - \sigma E_y \right) \quad (29)$$

$$\frac{\partial E_z}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \left(\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} - \sigma E_z \right) \quad (30)$$

หากพิจารณาข้อกำหนดของ Yee เราสามารถกำหนด Grid Point ที่จะแก้ปัญหาในพื้นที่คำนวณที่กำหนด
คือ

$$(i, j, k) = (i\Delta x, j\Delta y, k\Delta z) \quad (31)$$

และเขียนให้อยู่ใน Function ของเวลาได้คือ

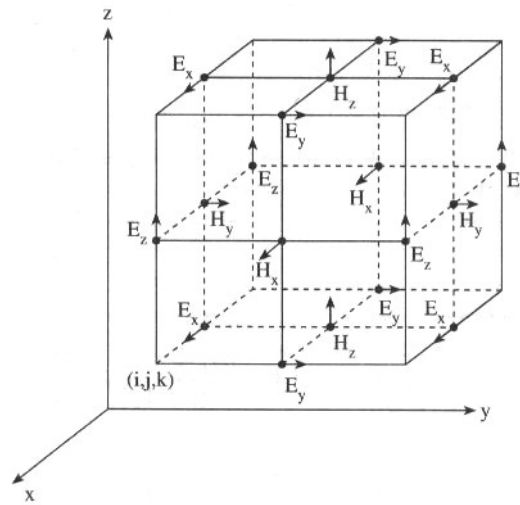
$$F^n(i, j, k) = F(i\delta, j\delta, k\delta, n\Delta t) \quad (32)$$

เมื่อ $\delta = \Delta x = \Delta y = \Delta z$ คือช่วงความยาวเล็กๆ Δt คือช่วงเวลาเล็กๆ โดย i, j, k และ n เป็นจำนวนเต็ม จากนั้นใช้ central finite difference approximation สำหรับ space และ time derivative ซึ่งให้ second-order accurate

$$\frac{\partial F^n(i, j, k)}{\partial x} = \frac{F^n\left(i + \frac{1}{2}, j, k\right) - F^n\left(i - \frac{1}{2}, j, k\right)}{\delta} + O(\delta^2) \quad (33)$$

$$\frac{\partial F^n(i, j, k)}{\partial t} = \frac{F^{n+\frac{1}{2}}(i, j, k) - F^{n-\frac{1}{2}}(i, j, k)}{\delta t} + O(\delta t^2) \quad (34)$$

นำสมการที่ (33) มาใช้กับสมการที่ (25)-(32) ในพิกัดของ Yee ตำแหน่งของ E และ H ใน Unit cell ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2



Positions of the field components in a unit cell of the Yee's lattice.

รูปที่ 2 แสดงตำแหน่งของ E และ H ใน Unit cell ในพิกัดของ Yee

นำสมการที่ (34) มาใช้กับสมการที่ (25)-(32) ส่วนประกอบ E และ H นั้นถูกจัดในช่วงครึ่งช่วงเวลา จากนั้นใช้ explicit finite difference approximation กับ สมการ (25)-(32) ได้ดังนี้

$$H_x^{n+\frac{1}{2}}\left(i, j + \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2}\right) = H_x^{n-\frac{1}{2}}\left(i, j + \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2}\right) + \frac{\delta t}{\mu\left(i, j + \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2}\right)\delta} \cdot \left[\begin{aligned} &E_y^n\left(i, j + \frac{1}{2}, k + 1\right) - E_y^n\left(i, j + \frac{1}{2}, k\right) + \\ &E_z^n\left(i, j, k + \frac{1}{2}\right) - E_z^n\left(i, j + 1, k + \frac{1}{2}\right) \end{aligned} \right] \quad (35)$$

$$\begin{aligned}
H_y^{n+\frac{1}{2}}\left(i+\frac{1}{2}, j, k+\frac{1}{2}\right) &= H_y^{n-\frac{1}{2}}\left(i+\frac{1}{2}, j, k+\frac{1}{2}\right) + \frac{\delta t}{\mu\left(i+\frac{1}{2}, j, k+\frac{1}{2}\right)} \delta \\
&\bullet \left[\begin{aligned} &E_z^n\left(i+1, j, k+\frac{1}{2}\right) - E_z^n\left(i, j, k+\frac{1}{2}\right) + \\ &E_x^n\left(i+\frac{1}{2}, j, k\right) - E_x^n\left(i+\frac{1}{2}, j, k+1\right) \end{aligned} \right]
\end{aligned} \tag{36}$$

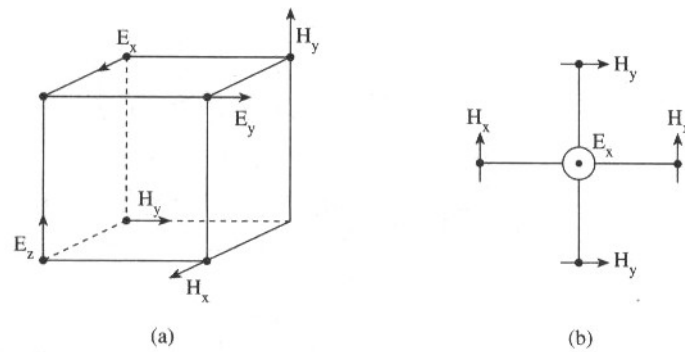
$$\begin{aligned}
H_z^{n+\frac{1}{2}}\left(i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}, k\right) &= H_z^{n-\frac{1}{2}}\left(i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}, k\right) + \frac{\delta t}{\mu\left(i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}, k\right)} \delta \\
&\bullet \left[\begin{aligned} &E_x^n\left(i+\frac{1}{2}, j+1, k\right) - E_x^n\left(i+\frac{1}{2}, j, k\right) + \\ &E_y^n\left(i, j+\frac{1}{2}, k\right) - E_y^n\left(i+1, j+\frac{1}{2}, k\right) \end{aligned} \right]
\end{aligned} \tag{37}$$

$$\begin{aligned}
E_x^{n+1}\left(i+\frac{1}{2}, j, k\right) &= \left[1 - \frac{\sigma\left(i+\frac{1}{2}, j, k\right) \delta t}{\varepsilon\left(i+\frac{1}{2}, j, k\right)} \right] E_x^n\left(i+\frac{1}{2}, j, k\right) + \frac{\delta t}{\varepsilon\left(i+\frac{1}{2}, j, k\right)} \delta \\
&\bullet \left[\begin{aligned} &H_z^{n+\frac{1}{2}}\left(i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}, k\right) - H_z^{n+\frac{1}{2}}\left(i+\frac{1}{2}, j-\frac{1}{2}, k\right) + \\ &H_y^{n+\frac{1}{2}}\left(i+\frac{1}{2}, j, k-\frac{1}{2}\right) - H_y^{n+\frac{1}{2}}\left(i+\frac{1}{2}, j, k+\frac{1}{2}\right) \end{aligned} \right]
\end{aligned} \tag{38}$$

$$\begin{aligned}
E_y^{n+1}\left(i, j+\frac{1}{2}, k\right) &= \left[1 - \frac{\sigma\left(i, j+\frac{1}{2}, k\right) \delta t}{\varepsilon\left(i, j+\frac{1}{2}, k\right)} \right] E_x^n\left(i, j+\frac{1}{2}, k\right) + \frac{\delta t}{\varepsilon\left(i, j+\frac{1}{2}, k\right)} \delta \\
&\bullet \left[\begin{aligned} &H_x^{n+\frac{1}{2}}\left(i, j+\frac{1}{2}, k+\frac{1}{2}\right) - H_x^{n+\frac{1}{2}}\left(i, j+\frac{1}{2}, k-\frac{1}{2}\right) + \\ &H_z^{n+\frac{1}{2}}\left(i-\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}, k\right) - H_z^{n+\frac{1}{2}}\left(i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}, k\right) \end{aligned} \right]
\end{aligned} \tag{39}$$

$$E_z^{n+1}\left(i, j, k + \frac{1}{2}\right) = \left[1 - \frac{\sigma\left(i, j, k + \frac{1}{2}\right)\delta t}{\varepsilon\left(i, j, k + \frac{1}{2}\right)} \right] E_z^n\left(i, j, k + \frac{1}{2}\right) + \frac{\delta t}{\varepsilon\left(i, j, k + \frac{1}{2}\right)\delta} \cdot \left[\begin{aligned} &H_y^{n+1/2}\left(i + \frac{1}{2}, j, k + \frac{1}{2}\right) - H_y^{n+1/2}\left(i - \frac{1}{2}, j, k + \frac{1}{2}\right) + \\ &H_x^{n+1/2}\left(i, j - \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2}\right) - H_x^{n+1/2}\left(i, j + \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2}\right) \end{aligned} \right] \quad (40)$$

จากสมการที่ (35)-(40) และรูปที่ 3 แสดงส่วนประกอบของ E และ H ของ Unit cell ในช่วงเวลาครึ่งช่วงเวลา เราสามารถที่จะนำสมการ (35)-(40) มาเขียนเป็นโปรแกรมเพื่อใช้ในการคำนวณโดยการคำนวณต้องทำการคำนวณแบบขึ้นเวลาสะสมเนื่องจากเวลาที่คำนวณปัจจุบันต้องมาจากผลคำนวณก่อนหน้านั้นแล้ว



Typical relations between field components: (a) within a quarter of a unit cell, (b) in a plane.

รูปที่ 3 แสดงส่วนประกอบของ E และ H ของ Unit cell ในช่วงเวลาครึ่งช่วงเวลา

ความแม่นยำและความมีเสถียรภาพ

การรับประกันความแม่นยำในการคำนวณผลของการคำนวณจะแม่นยำขึ้นอยู่กับค่า δ ซึ่งจะต้องน้อยเมื่อเทียบกับความยาวคลื่น λ (ทั่วไป $\delta < \lambda/10$) ส่วนการรับประกันความมีเสถียรภาพของสมการ(35)-(40) Δt ต้องเป็นไปตามเงื่อนไขดังนี้

$$u_{\max} \Delta t \leq \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2} + \frac{1}{\Delta z^2}}} \quad (41)$$

เมื่อ $u_{\max}$ คือความเร็วเฟสสูงสุดของคลื่นในแบบจำลอง เมื่อเราใช้ cubic cell ซึ่ง $\Delta x = \Delta y = \Delta z = \delta$ จากสมการที่ (41) จะได้เป็น

$$\frac{u_{\max} \Delta t}{\delta} \leq \frac{1}{\sqrt{n}} \quad (42)$$

โดย n คือ จำนวนของ Space dimension

Lattice Truncation Conditions

เงื่อนไขอีกประการในการจำลองสนามไฟฟ้าคือ การเลือกเงื่อนไขขอบเขตของพื้นที่การกระจายตัวสนามไฟฟ้าว่าเป็น เงื่อนไขการกระจาย(Radiation condition) หรือ เงื่อนไขขอบเขตการซึมซับ (Absorbing boundary condition) โดยกำหนดขอบเขตเป็นแบบ PEC(Perfect Electrical Conditions) หรือแบบ PML(Perfect Matched Layer)ตามลำดับ

การกำหนดขอบเขตแบบ PEC นั้น ในการคำนวณสามารถกำหนดได้โดยกำหนดค่าสนามไฟฟ้า $E(i, j, k) = 0$ ที่บริเวณขอบ ส่วนการกำหนดขอบเขตแบบ PML นั้นสามารถกำหนดได้โดยต้องทำตามลำดับตามสมการดังนี้

a) ที่ระยะนาบ $i = 1/2$

$$H_y^n\left(\frac{1}{2}, j, k + \frac{1}{2}\right) = \frac{1}{3} \left[H_y^{n-2}\left(\frac{3}{2}, j, k - \frac{1}{2}\right) + H_y^{n-2}\left(\frac{3}{2}, j, k + \frac{1}{2}\right) + H_y^{n-2}\left(\frac{3}{2}, j, k + \frac{3}{2}\right) \right]$$

$$H_z^n\left(\frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}, k\right) = \frac{1}{3} \left[H_y^{n-2}\left(\frac{3}{2}, j + \frac{1}{2}, k - 1\right) + H_y^{n-2}\left(\frac{3}{2}, j + \frac{1}{2}, k\right) + H_y^{n-2}\left(\frac{3}{2}, j + \frac{1}{2}, k + 1\right) \right]$$

b) ที่ระยะนาบ $i = I_{\max} + 1/2$

$$H_y^n\left(I_{\max} + \frac{1}{2}, j, k + \frac{1}{2}\right) = \frac{1}{3} \left[H_y^{n-2}\left(I_{\max} - \frac{1}{2}, j, k - \frac{1}{2}\right) + H_y^{n-2}\left(I_{\max} - \frac{1}{2}, j, k + \frac{1}{2}\right) + H_y^{n-2}\left(I_{\max} - \frac{1}{2}, j, k + \frac{3}{2}\right) \right]$$

$$H_z^n\left(I_{\max} + \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}, k\right) = \frac{1}{3} \left[H_y^{n-2}\left(I_{\max} - \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}, k - 1\right) + H_y^{n-2}\left(I_{\max} - \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}, k\right) + H_y^{n-2}\left(I_{\max} - \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}, k + 1\right) \right]$$

c) ที่ระยะนาบ $j = 0$

$$E_x^n\left(i + \frac{1}{2}, 0, k\right) = E_x^{n-2}\left(i + \frac{1}{2}, 1, k\right)$$

$$E_z^n\left(i, 0, k + \frac{1}{2}\right) = E_z^{n-2}\left(i, 1, k + \frac{1}{2}\right)$$

d) ที่ระยะนาบ $j = J_{\max}$

$$E_x^n\left(i + \frac{1}{2}, J_{\max}, k\right) = E_x^{n-2}\left(i + \frac{1}{2}, J_{\max} - 1, k\right)$$

$$E_z^n\left(i, J_{\max}, k + \frac{1}{2}\right) = E_z^{n-2}\left(i, J_{\max} - 1, k + \frac{1}{2}\right)$$

e) ที่ระยะนาบ $k = 0$

$$E_x^n\left(i + \frac{1}{2}, j, 0\right) = \frac{1}{3} \left[E_x^n\left(i - \frac{1}{2}, j, 1\right) + E_x^n\left(i + \frac{1}{2}, j, 1\right) + E_x^n\left(i + \frac{3}{2}, j, 1\right) \right]$$

$$E_y^n(i, j + \frac{1}{2}, 0) = \frac{1}{3} \left[E_y^n(i-1, j + \frac{1}{2}, 1) + E_y^n(i, j + \frac{1}{2}, 1) + E_y^n(i+1, j + \frac{1}{2}, 1) \right]$$

f) ที่ระยะนาบ $k = K_{\max}$

$$E_x^n(i + \frac{1}{2}, j, K_{\max}) = \frac{1}{3} \left[E_x^n(i - \frac{1}{2}, j, K_{\max} - 1) + E_x^n(i + \frac{1}{2}, j, K_{\max} - 1) + E_x^n(i + \frac{3}{2}, j, K_{\max} - 1) \right]$$

$$E_y^n(i, j + \frac{1}{2}, K_{\max}) = \frac{1}{3} \left[E_y^n(i-1, j + \frac{1}{2}, K_{\max} - 1) + E_y^n(i, j + \frac{1}{2}, K_{\max} - 1) + E_y^n(i+1, j + \frac{1}{2}, K_{\max} - 1) \right]$$

Initial Field

การกำหนดค่าเริ่มต้นนั้นมีความจำเป็นและสำคัญอย่างยิ่งการกำหนดค่าเริ่มต้นนั้นสามารถกำหนดได้โดยใช้สมการ

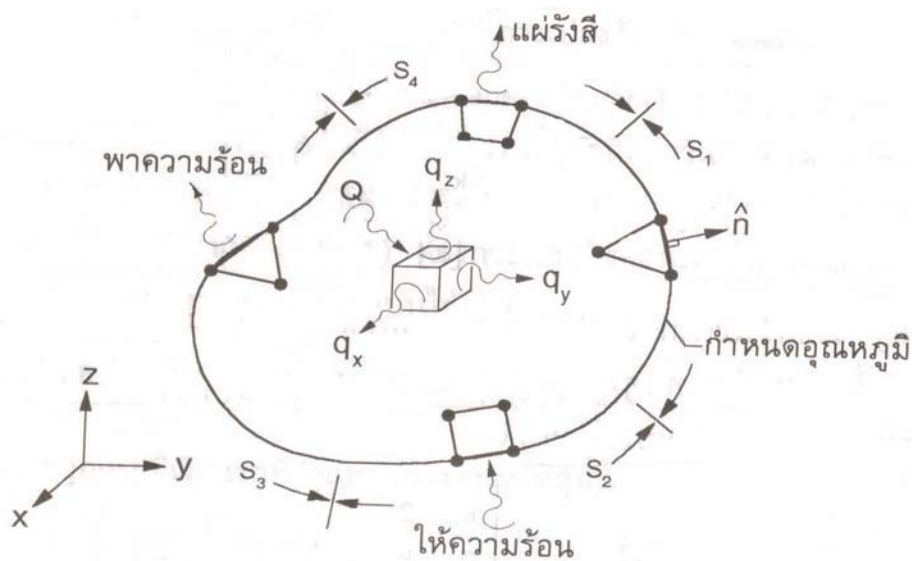
$$E_z^n(i, j_s, k + \frac{1}{2}) \leftarrow 1000 \sin(2\pi f \delta t) + E_z^n(i, j_s, k + \frac{1}{2}) \quad (43)$$

ซึ่งเป็นสมการ Source Generate ที่จ่ายให้แก่ระบบซึ่งจะมีค่าเปลี่ยนแปลงตามเวลาโดย δt นั้นต้องเป็นไปตามเงื่อนไขตามสมการที่ (41) ด้วย

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการถ่ายเทความร้อนภายในวัสดุขณะรับคลื่นไมโครเวฟ

1. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การศึกษาการถ่ายเทความร้อนภายในยางขณะอุ่นอย่างตันจะใช้วิธีการเชิงตัวเลข ซึ่งเป็นการคำนวณการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆภายในเนื้อยาง สำหรับงานวิจัยนี้เลือกใช้การคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยใช้โปรแกรมออบาคัส (Abaqus) ในการแก้ปัญหา



รูปที่ 4 แสดงการถ่ายเทความร้อนใน 3 มิติระบบพิกัดฉาก

พิจารณาระบบที่มีขนาดจำกัดไม่มีมวลผ่านเข้าออกจากระบบซึ่งภายในระบบบรรจุสารตัวกลางอยู่ และเมื่อระบบได้รับความร้อนจากภายนอก จากกฎอนุรักษ์ของพลังงานกล่าวไว้ว่าอัตราการเพิ่มหรือสะสมของพลังงานทั้งหมดในระบบ จะมีค่าเท่ากับอัตราสุทธิของพลังงานที่ระบบได้รับเนื่องจากการนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสีความร้อนของตัวกลางรวมกับอัตราสุทธิของการผลิตพลังงานขึ้นในระบบ ดังนั้นสามารถเขียนสมการพลังงานของระบบได้ดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_V \rho U dV = \iint_S (\vec{q}_c + \vec{q}_v + \vec{q}_r) \cdot \vec{n} ds + \iiint_V \dot{Q} dV \quad (44)$$

เมื่อ $\dot{U}$ คืออัตราของพลังงานภายในต่อเวลา (Rate of internal energy)

V คือโดเมนวัสดุ (Volume)

S คือผิวห่อหุ้มโดเมนวัสดุ (Surface area)

ρ คือความหนาแน่นของวัสดุ (Density) สมมุติให้มีค่าคงที่

q_c คืออัตราการถ่ายเทความร้อนแบบการนำความร้อน (Heat flow rate by conduction)

q_v คืออัตราการถ่ายเทความร้อนแบบการพาความร้อน (Heat flow rate by convection)

q_r คืออัตราการถ่ายเทความร้อนแบบการแผ่รังสีความร้อน (Heat flow rate by radiation)

$\dot{Q}$ คืออัตราปริมาณความร้อนที่ผลิตขึ้นได้เอง (Rate of internal heat generation)

n คือเวกเตอร์ตั้งฉากของพื้นที่ผิวโดเมน (Normal vector)

กรณีที่ขอบเขตของโดเมนมีค่าคงที่สามารถเขียนได้ว่า

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_V \rho U dV = \iiint_V \frac{\partial}{\partial t} \rho U dV = \iiint_V \rho \dot{U} dV \quad (45)$$

ดังนั้นเขียนสมการพลังงานของระบบได้คือ

$$\iiint_V \rho \dot{U} dV = \iint_S (\bar{q}_c + \bar{q}_v + \bar{q}_r) \cdot \bar{n} ds + \iiint_V \dot{Q} dV \quad (46)$$

เมื่อพิจารณาเฉพาะการถ่ายเทความร้อนแบบการนำความร้อน โดยพิจารณาจากกฎการนำความร้อนของฟูรีเยร์ (Fourier's law) ซึ่งกล่าวว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนขึ้นอยู่กับสัมประสิทธิ์การนำความร้อนและความชันของการกระจายของอุณหภูมิ (Temperature gradient)

ดังนั้นสำหรับการนำความร้อนของวัสดุแบบแอนไอโซทรอปิก (Anisotropic material) สามารถเขียนอยู่ในรูปของเมตริกซ์ได้ดังนี้

$$\begin{Bmatrix} q_x \\ q_y \\ q_z \end{Bmatrix} = - \underbrace{\begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} \end{bmatrix}}_{[k]} \begin{Bmatrix} \frac{\partial \theta}{\partial x} \\ \frac{\partial \theta}{\partial y} \\ \frac{\partial \theta}{\partial z} \end{Bmatrix} \quad (47)$$

โดย $[k]$ คือเมตริกซ์สัมประสิทธิ์การนำความร้อน

จากสมมติฐานกำหนดให้วัสดุขงมีคุณสมบัติแบบไอโซทรอปิก (Isotropic Material) และค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนมีค่าคงที่ ดังนั้นเมตริกซ์สัมประสิทธิ์การนำความร้อนสามารถลดรูปอยู่ในรูปแบบง่ายๆ คือ

$$[k] = \begin{bmatrix} k & 0 & 0 \\ 0 & k & 0 \\ 0 & 0 & k \end{bmatrix} \quad (48)$$

ดังนั้นสามารถเขียนสมการพลังงาน (44) ได้ดังนี้

$$\iiint_V \rho \dot{U} dV = \iint_S (-[k] \nabla \theta) \cdot \vec{n} ds + \iiint_V \dot{Q} dV \quad (49)$$

และใช้ทฤษฎีไดเวอร์เจนซ์ของเกาส์ (Gauss's divergence theorem) เปลี่ยนจากอินทิกรัลตามพื้นผิว (Surface Integrals) เป็นอินทิกรัลตามปริมาตร (Volume Integrals) ดังนี้

$$\iint_S (-[k] \nabla \theta) \cdot \vec{n} ds = \iiint_V \nabla \cdot (-[k] \nabla \theta) dV \quad (50)$$

นำสมการ (50) แทนในสมการพลังงาน (49) และจัดสมการให้อยู่ในรูปของการอินทิกรัลตามปริมาตรทั้งหมด จะได้สมการพลังงานที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์หาการกระจายตัวของอุณหภูมิของยางระหว่างกระบวนการอุ่นยาง คือ

$$\iiint_V \rho \dot{U} dV = \iiint_V \nabla \cdot (-[k] \nabla \theta) dV + \iiint_V \dot{Q} dV \quad (51)$$

เงื่อนไขขอบเขตและค่าเริ่มต้น

การหาผลเฉลยของสมการเชิงอนุพันธ์ สิ่งสำคัญที่ต้องทราบคือเงื่อนไขขอบเขตและค่าเริ่มต้น (Boundary and initial condition) ซึ่งสำหรับงานวิจัยนี้ได้วิเคราะห์ที่สภาวะดังนี้คือ

1. กำหนดให้ที่ผิวขอบนอกของล้อยางต้นมีการพาความร้อนแบบอิสระ (Free convection) เกิดขึ้นตลอดการอุ่นยาง

$$-[k] \nabla \theta_s = -h(\theta_s - \theta_\infty) \quad (52)$$

2. กำหนดให้ที่ภาวะเริ่มต้นล้อยางต้นมีอุณหภูมิเท่ากันสม่ำเสมอทั่วทั้งเนื้อยาง ซึ่งมีค่าเท่ากับ 32 °C คือ

$$\theta(x, y, z, 0) = \theta_0(x, y, z) = 32^\circ\text{C} \quad (53)$$

เมื่อ θ คืออุณหภูมิของยาง (Temperature)
 θ_s คืออุณหภูมิที่ตำแหน่งผิวยาง
 θ_∞ คืออุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม
 θ_0 คืออุณหภูมิเริ่มต้นที่ตำแหน่งต่างๆทั่วทั้งเนื้อยาง
 t คือเวลาในการอบยาง (Time)
 x, y, z คือตำแหน่งที่พิจารณาในระบบพิกัดฉาก x, y, z

2. สมการไฟไนต์เอลิเมนต์

เอลิเมนต์และฟังก์ชันการประมาณภายใน

เอลิเมนต์ที่เลือกใช้ในการวิเคราะห์คือเอลิเมนต์สี่เหลี่ยมด้านเท่าซึ่งประกอบด้วย 4 จุดต่อและอาจเลือกใช้เอลิเมนต์ทรงหกหน้าซึ่งประกอบด้วย 8 จุดต่อหรือเอลิเมนต์ทรงเหลี่ยมสี่หน้าซึ่งประกอบด้วย 4 จุดต่อ ในการคำนวณตัวอย่างที่จะใช้งานจริง ดังนั้นจึงจะแสดงฟังก์ชันพื้นฐานและฟังก์ชันการประมาณภายในรายงานฉบับสมบูรณ์ต่อไป

การสร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์

สมการพลังงาน (51) ที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์ระบบปัญหาของงานวิจัยนี้คือ

$$\iiint_V \rho \dot{U} dV = \iiint_V \nabla \cdot (-[k] \nabla \theta) dV + \iiint_V \dot{Q} dV \quad (54)$$

ภาวะการแปรผัน (Variational statement) ของสมการพลังงานสามารถแทนค่าโดยตรงโดยอาศัยสมการมาตรฐานของกาลอร์กิน (The standard galerkin) จะได้สมการเป็นดังนี้

$$\iiint_V \rho \dot{U} \delta \theta dV + \iiint_V \delta \theta \cdot (\nabla \cdot (-[k] \nabla \theta)) dV = \iiint_V \delta \theta \dot{Q} dV \quad (55)$$

เมื่อ $\delta \theta$ เป็นสนามการผันแปรของอุณหภูมิ (Temperature variational field) ที่เหมาะสมกับเงื่อนไขขอบเขตที่กำหนด

ทำการอินทิเกรตทีละส่วน (Integrate by parts) ลงบนเทอมที่สองของสมการด้านซ้ายโดยใช้ทฤษฎีบทของเกาส์ (Gauss's theorem)

$$\iiint_V \delta \theta \cdot (\nabla \cdot (-[k] \nabla \theta)) dV = \iint_S \delta \theta (-[k] \nabla \theta)^T \vec{n} ds - \iiint_V (\nabla \delta \theta)^T (-[k] \nabla \theta) dV \quad (56)$$

ดังนั้นแทนค่าสมการ (56) ในสมการพลังงาน (55) จะได้สมการพลังงานใหม่คือ

$$\iiint_V \rho \dot{U} \delta \theta dV + \iiint_V (\nabla \delta \theta)^T ([k] \nabla \theta) dV - \iint_S \delta \theta ([k] \nabla \theta)^T \vec{n} ds = \iiint_V \delta \theta \dot{Q} dV \quad (57)$$

การประมาณขนาดรูปร่างของวัตถุด้วยวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element) ทำได้โดยการสมมติให้การกระจายของอุณหภูมิในเอลิเมนต์อยู่ในรูปแบบของฟังก์ชันการประมาณภายในเอลิเมนต์ และค่าอุณหภูมิที่จุดต่อ

$$\theta(x, y, z, t) = [N(x, y, z)]_{I \times 4} \{\theta(t)\}_{4 \times 1} \quad (58)$$

ดังนั้นความชันของการกระจายของอุณหภูมิในทิศทางต่างๆคือ

$$\begin{Bmatrix} \frac{\partial \theta}{\partial x} \\ \frac{\partial \theta}{\partial y} \\ \frac{\partial \theta}{\partial z} \end{Bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial x} & \frac{\partial N_2}{\partial x} & \frac{\partial N_3}{\partial x} & \frac{\partial N_4}{\partial x} \\ \frac{\partial N_1}{\partial y} & \frac{\partial N_2}{\partial y} & \frac{\partial N_3}{\partial y} & \frac{\partial N_4}{\partial y} \\ \frac{\partial N_1}{\partial z} & \frac{\partial N_2}{\partial z} & \frac{\partial N_3}{\partial z} & \frac{\partial N_4}{\partial z} \end{bmatrix}}_{[B(x,y,z)]} \begin{Bmatrix} \theta_1(t) \\ \theta_2(t) \\ \theta_3(t) \\ \theta_4(t) \end{Bmatrix}_{4 \times 1} \quad (59)$$

และจากวิธีการของกาเลอร์กิน (Galerkin's method) จะสมมติให้ $\delta\theta$ ซึ่งเป็นสนามการผันแปรของอุณหภูมิ สามารถประมาณโดยฟังก์ชันการประมาณภายในและค่าของอุณหภูมิที่แปรผันที่จุดต่อไปนี้

$$\delta\theta(x, y, z, t) = [\delta\theta(t)]_{I \times 4} \{N(x, y, z)\}_{4 \times I} \quad (60)$$

ดังนั้นความชันของการกระจายของการแปรผันอุณหภูมิในทิศทางต่างๆ คือ

$$\begin{Bmatrix} \frac{\partial(\delta\theta)}{\partial x} \\ \frac{\partial(\delta\theta)}{\partial y} \\ \frac{\partial(\delta\theta)}{\partial z} \end{Bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial x} & \frac{\partial N_2}{\partial x} & \frac{\partial N_3}{\partial x} & \frac{\partial N_4}{\partial x} \\ \frac{\partial N_1}{\partial y} & \frac{\partial N_2}{\partial y} & \frac{\partial N_3}{\partial y} & \frac{\partial N_4}{\partial y} \\ \frac{\partial N_1}{\partial z} & \frac{\partial N_2}{\partial z} & \frac{\partial N_3}{\partial z} & \frac{\partial N_4}{\partial z} \end{bmatrix}}_{[B(x,y,z)]} \begin{Bmatrix} \delta\theta_1(t) \\ \delta\theta_2(t) \\ \delta\theta_3(t) \\ \delta\theta_4(t) \end{Bmatrix}_{4 \times 1} \quad (61)$$

แทนค่าสมการ (58) และ (60) ในสมการพลังงาน (57) จะได้

$$\{\delta\theta\} \left\{ \iiint_V \rho \{N\} \dot{U} dV + \iiint_V [B]^T \cdot ([k] \nabla \theta) dV - \iint_S \{N\} ([k] \nabla \theta)^T \bar{n} ds = \iiint_V \{N\} \dot{Q} dV \right\} \quad (62)$$

ดังนั้นสามารถหารตลอดด้วย $\{\delta\theta\}$ จะได้สมการของระบบคือ

$$\iiint_V \rho \{N\} \dot{U} dV + \iiint_V [B]^T \cdot ([k] \nabla \theta) dV - \iint_S \{N\} ([k] \nabla \theta)^T \bar{n} ds = \iiint_V \{N\} \dot{Q} dV \quad (63)$$

$$\text{จาก} \quad \dot{U} = c(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (64)$$

$$\text{และ} \quad \{q\} = -[k] \nabla \theta \quad (65)$$

แทนค่าสมการ (64) และ (65) ในสมการพลังงาน (63) จะได้

$$\iiint_V \rho c \{N\} \frac{\partial \theta}{\partial t} dV + \iiint_V [B]^T \cdot ([k] \nabla \theta) dV + \iint_S \{N\} [q] \bar{h} ds = \iiint_V \{N\} \dot{Q} dV \quad (66)$$

แทนค่าสมการ (58) และ (59) ในสมการ (66) จะได้สมการพลังงานคือ

$$\iiint_V \rho c \{N\} [N] \left\{ \dot{\theta} \right\} dV + \iiint_V [B]^T \cdot [k] [B] \{\theta\} dV + \iint_S \{N\} [q] \bar{h} ds = \iiint_V \{N\} \dot{Q} dV \quad (67)$$

สามารถนำสมการ (67) จัดให้อยู่ในรูปแบบเมตริกซ์ได้ดังนี้

$$[C] \left\{ \dot{\theta} \right\} + [K] \{\theta\} = \{Q\} + \{Q\}_c \quad (68)$$

$$\text{โดย } [C] = \iiint_V \rho c \{N\} [N] dV \quad (69)$$

$$[K] = \iiint_V [B]^T [k] [B] dV \quad (70)$$

$$\{Q\} = \iiint_V \dot{Q} \{N\} dV \quad (71)$$

$$\{Q\}_c = - \iint_S \{N\} [q] \bar{h} ds \quad (72)$$

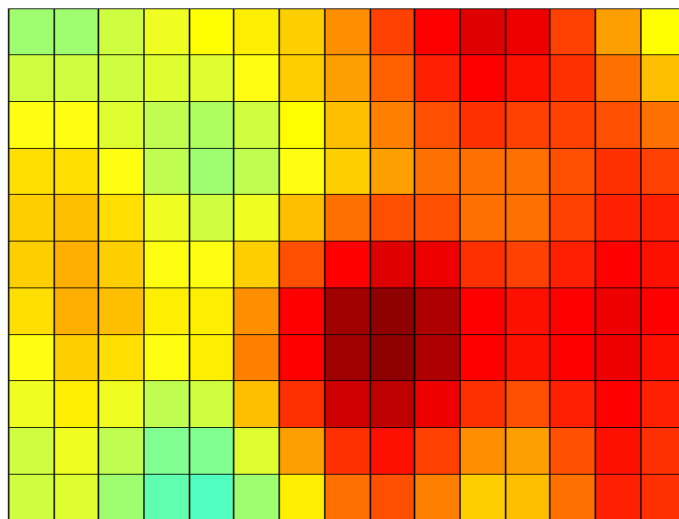
สำหรับการอินทิเกรตเพื่อหาเอลิเมนต์เมตริกซ์จากสมการ (68) – (72) จะคำนวณหาด้วยวิธีการอินทิเกรตแบบเชิงตัวเลข (Integrate by numerically) โดยใช้โปรแกรมออบาคัส (Abaqus)

3. ความร้อนที่เกิดขึ้นภายในเนื้อวัสดุจากคลื่นไมโครเวฟ

จากการคำนวณค่าสนามไฟฟ้าที่กระจายตัวอยู่ภายในเนื้อเยื่อด้วยโปรแกรม MatLab ที่เขียนขึ้นทำให้สามารถนำมาคำนวณหาอัตราของความร้อนที่เกิดขึ้นภายในเนื้อวัสดุ (Heat generation) ได้โดยการประมาณค่าอัตราของความร้อนที่เกิดขึ้นภายในเนื้อวัสดุให้ผันแปรกับอุณหภูมิดังต่อไปนี้

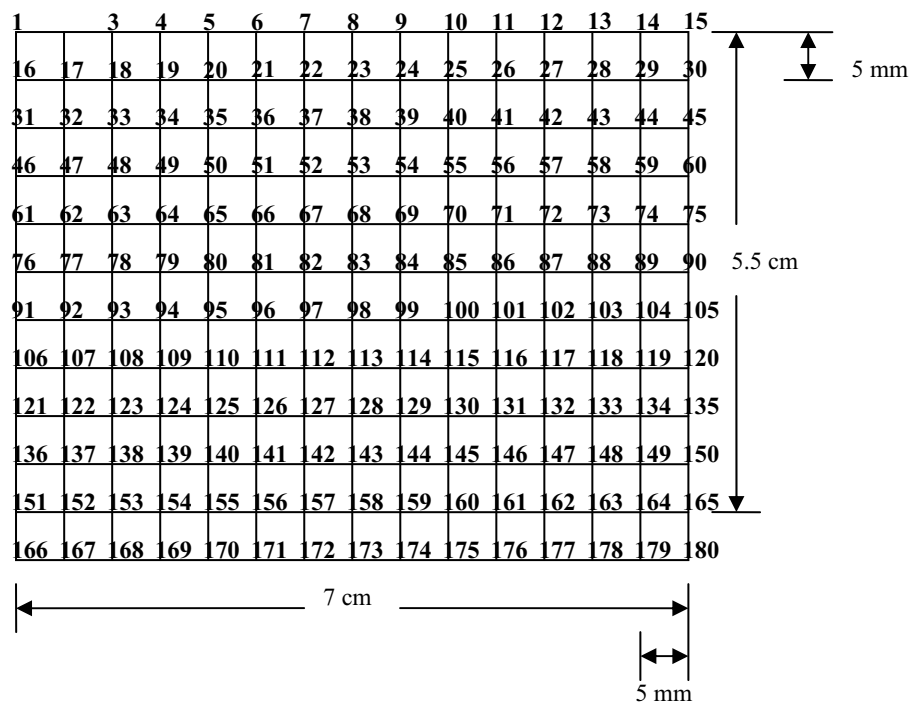
การประมาณฟังก์ชันอัตราการเกิดความร้อนขึ้นภายในเนื้อยาง (Heat generation)

1. ทดลองอุ่นล้อยางด้วยไมโครเวฟโดยใช้เตาไมโครเวฟที่มีขายตามท้องตลาด โดยให้ล้อยางหมุนขณะอุ่นยางเป็นเวลา 20 นาที ซึ่งได้ผลการทดลองการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ ในภาคผนวกซึ่งจะนำเสนอต่อไป
2. ทำการคำนวณค่าสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในเนื้อยางเมื่อสมมุติว่ายางได้รับสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอเท่ากันทุกหน้าตัด ซึ่งจะได้ค่าการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าที่หน้าตัดของล้อยางในเวลาต่างๆ เช่น



รูปที่ 5 แสดงการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าบริเวณหน้าตัดยางที่เวลา $5.82\text{E-}07$ วินาที

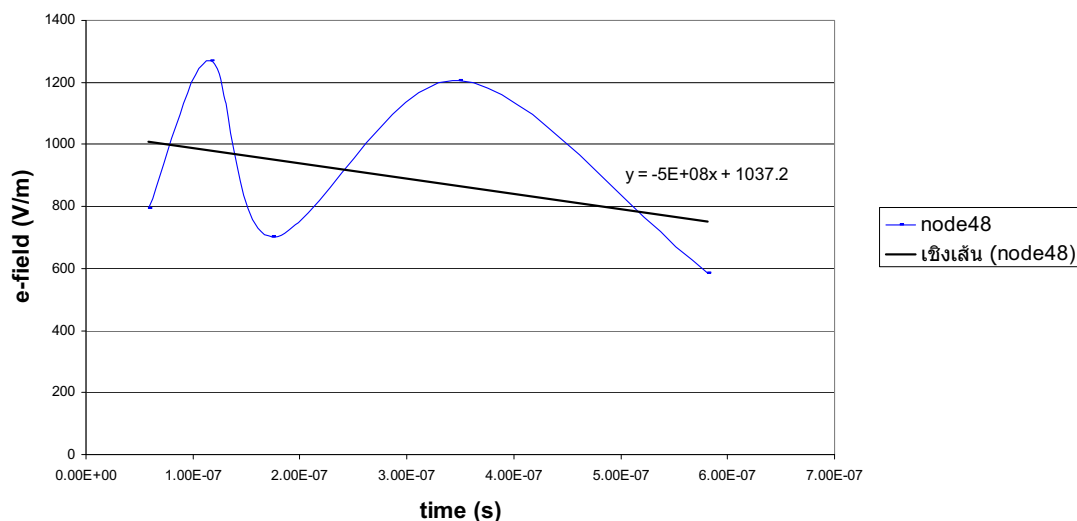
โดยทำการคำนวณการกระจายของสนามไฟฟ้าบริเวณหน้าตัดยางที่เวลาต่างๆ แล้วทำการประมาณค่าสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเมื่อเวลาอยู่ในช่วง 1 – 20 นาที เพราะเป็นช่วงเวลาจริงในการทดลอง ซึ่งทำการประมาณค่าสนามไฟฟ้าในแต่ละจุดต่อ โดยเลือกประมาณจุดต่อที่เราได้ทำการทดลองวัดอุณหภูมิจริงไปด้วย ดังแสดงตำแหน่งจุดต่อดังนี้



รูปที่ 6 แสดงหมายเลขของตำแหน่งต่างๆของหน้าตัดตัวอย่าง

โดยจุดต่อที่ใช้ในการประมาณค่าสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในยางและได้วัดอุณหภูมิที่เกิดขึ้นจริงที่จุดดังกล่าวคือ จุดต่อที่ 48, 50, 52, 54, 56, 123, 125, 127, 129, 131 ซึ่งจะแสดงตัวอย่างการประมาณค่าที่จุดต่อ 48 ดังนี้

การประมาณแนวโน้มของค่าสนามไฟฟ้า



รูปที่ 7 แสดงการประมาณค่าสนามไฟฟ้าเป็นฟังก์ชันของเวลาที่จุดต่อ 48

จะเห็นว่าค่าสนามไฟฟ้าในแต่ละจุดต่อที่แปรผันกับเวลาจะมีลักษณะเดียวกันคือเป็นลักษณะรูปคลื่น โดยมีทิศทางลาดเอียงลงในแนวเส้นตรง ดังนั้นจึงทำการประมาณเป็นสมการเส้นตรงก่อน โดยสมการที่ได้จะเป็นสมการของแกนสมมาตรของคลื่นนี้ จากนั้นจะทำการประมาณแอมพลิจูดเฉลี่ยของคลื่นซึ่งจะทำให้หาสมการที่ขนานกับแกน

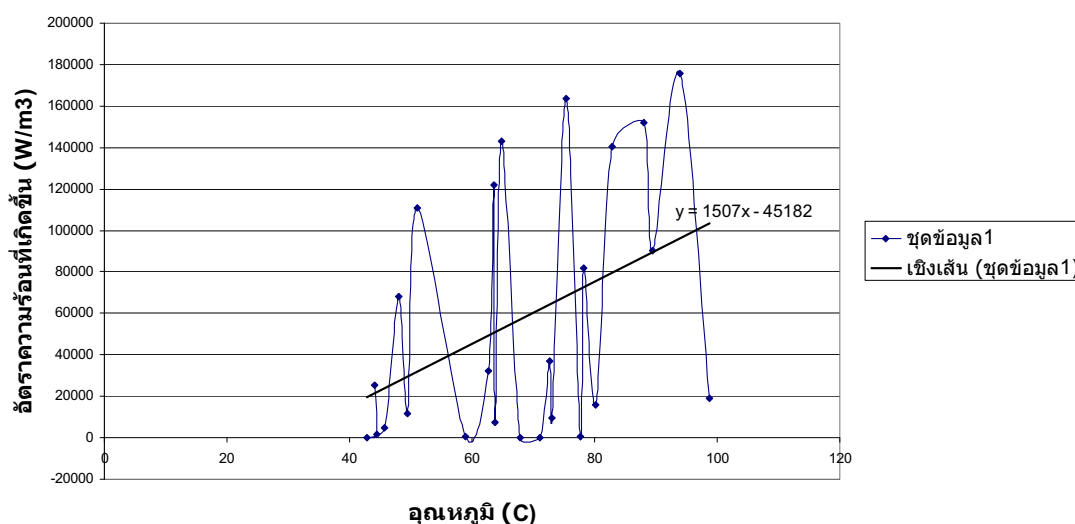
สมมาตรและมีระยะห่างจากแกนสมมาตรเท่ากับแอมพลิจูดเฉลี่ยของคลื่นซึ่งจะได้ 2 สมการ จากนั้นเลือกใช้สมการที่ให้ค่าสนามไฟฟ้าซึ่งมีความเป็นไปได้มากกว่าก็จะทำให้สามารถประมาณค่าสนามไฟฟ้า แล้วทำการประมาณในลักษณะเดียวกันนี้กับตำแหน่งจุดต่ออื่นๆ

3. นำค่าสนามไฟฟ้าที่คำนวณได้ในแต่ละตำแหน่งมาคำนวณค่าอัตราการเกิดความร้อนขึ้นภายในยางด้วยสมการนี้

$$q = 2\pi f \epsilon_0 \epsilon_r'' |E|^2 \quad (73)$$

แล้วพิจารณาค่าอัตราการความร้อนที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่งต่างๆ เวลาต่างๆ แล้วเปรียบเทียบกับผลการวัดอุณหภูมิที่ได้ที่ตำแหน่งต่างๆ เวลาต่างๆ จากนั้นพิจารณาที่ตำแหน่งเดียวกัน เวลาเดียวกัน เราจะทราบค่าอัตราการความร้อนที่เกิดขึ้นและอุณหภูมิที่ได้จากการทดลอง ดังนั้นเราจึงสรุปว่าที่อุณหภูมินี้ควรมีค่าอัตราการความร้อนที่เกิดขึ้นเป็นค่าที่ได้ที่ตำแหน่งเดียวกันเวลาเดียวกัน แล้วทำการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการความร้อนที่เกิดขึ้นกับอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ เวลาต่างๆ ซึ่งสามารถสร้างเป็นความสัมพันธ์ได้ดังนี้

การประมาณค่าอัตราการความร้อนที่เกิดขึ้นกับอุณหภูมิ



รูปที่ 8 แสดงการประมาณค่าฟังก์ชันอัตราการเกิดความร้อนกับอุณหภูมิ

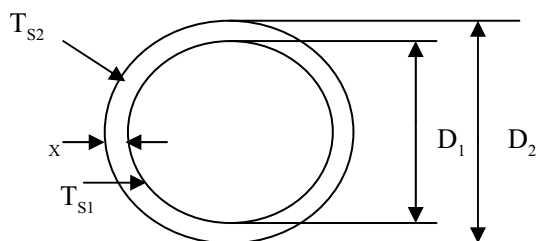
จะเห็นว่าความสัมพันธ์ที่ได้เป็นลักษณะเหมือนรูปคลื่น ดังนั้นจึงประมาณด้วยวิธีการเดียวกับการประมาณค่าสนามไฟฟ้าที่ผ่านมา โดยประมาณแกนสมมาตรก่อนจากนั้นจึงประมาณแอมพลิจูดเฉลี่ยแล้วสร้างเป็นสมการที่ขนานกับแกนสมมาตรและมีระยะห่างจากแกนสมมาตรเท่ากับค่าแอมพลิจูดเฉลี่ย ซึ่งจะได้ 2 สมการโดยเราจะเลือกใช้สมการที่เมื่อนำมาใช้ในการคำนวณอุณหภูมิภายในเนื้อยางแล้วได้ค่าใกล้เคียงกับผลการทดลอง ซึ่งในงานวิจัยนี้เลือกใช้สมการคือ

$$Q = 1507T - 5605.35 \quad (74)$$

แล้วจึงใช้ฟังก์ชันนี้ในการคำนวณการกระจายตัวของอุณหภูมิด้วยโปรแกรมออบาส โดยจะพัฒนาให้ประมาณได้ใกล้เคียงมากขึ้นต่อไป

4. ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน

ใช้สมการเอมไพริกัล[s] สำหรับคำนวณสัมประสิทธิ์การพาความร้อนสำหรับการพาความร้อนแบบอิสระสำหรับกรณีผนังสองชั้นปิดรูปทรงในแนวนราบ



รูปที่ 9 ผนังสองชั้นปิดรูปทรงในแนวนราบ

ในกรณีนี้จะเป็นการสะดวกกว่าถ้าเราเขียนสัมประสิทธิ์การพาความร้อนให้อยู่ในรูปดังนี้

$$\bar{h} = \frac{Q}{A_1(T_{s1} - T_{s2})} \quad (75)$$

โดยที่ A_1 คือพื้นที่รูปทรงกระบอกที่เล็กกว่า

x คือระยะห่างระหว่างทรงกระบอก

ใช้สมการสำหรับนี้ในกรณี $G_{rx} > 10^3$ จะได้สมการที่ใช้คำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนคือ

$$\frac{\bar{h}x}{k} = 0.21(G_{rx}P_r)^{0.25} \quad (76)$$

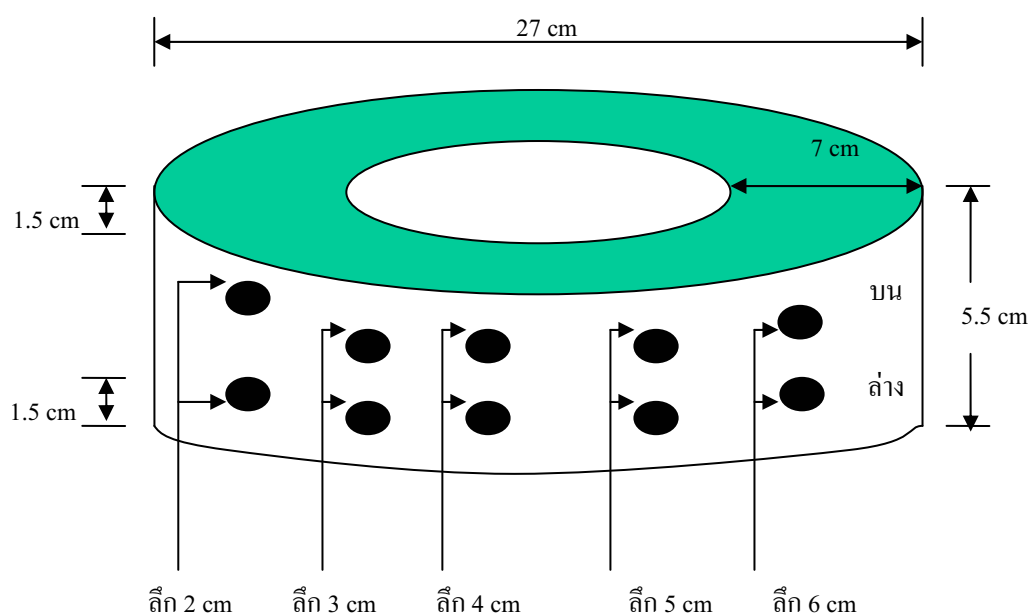
ซึ่งจะได้ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนมีค่าเท่ากับ $0.922 \text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$

การเปรียบเทียบ

ผลการคำนวณการกระจายตัวของอุณหภูมิขณะรับคลื่นไมโครเวฟกับผลการทดลอง

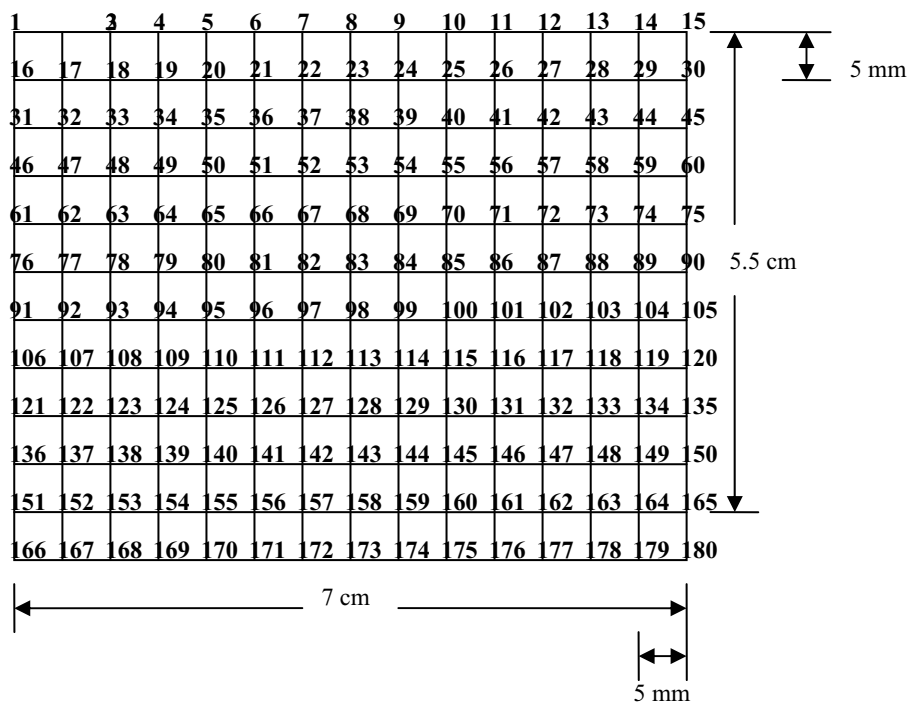
1. เปรียบเทียบผลการคำนวณกับการทดลอง

ข้างต้นที่นำมาทดลองมีขนาดและตำแหน่งในการวัดอุณหภูมิตามที่แสดงในรูปที่ 10 ซึ่งทดลองโดยการนำไปอุ่นในเตาไมโครเวฟซึ่งมีขายตามท้องตลาดซึ่งใช้หลอดแมกนีตรอน 1 หลอด ความถี่ 2.45 GHz กำลัง 1200 W โดยนำมาดัดแปลงใหม่ให้เตาไมโครเวฟส่งคลื่นแบบต่อเนื่อง



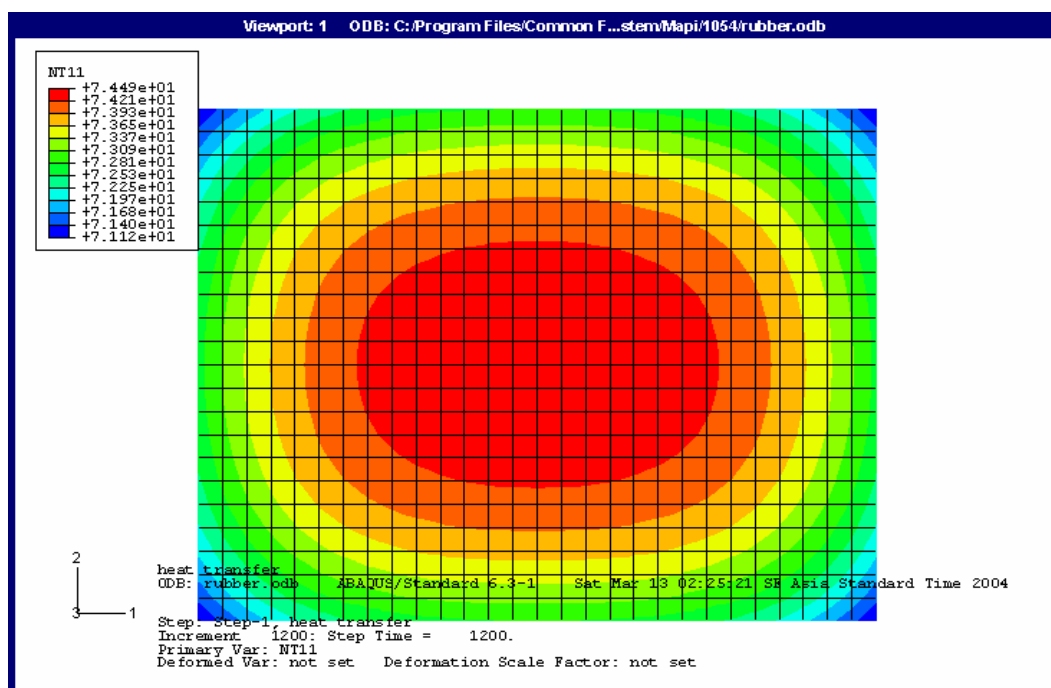
รูปที่ 10 แสดงชิ้นงานจริงที่นำมาทดลองเพื่อวัดค่าการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเนื้อยาง

จากการทดลองจะให้ล้อยางหมุนไปด้วยขณะได้รับพลังงานไมโครเวฟเป็นเวลา 20 นาที ดังนั้นจึงสมมุติให้ทุกๆหน้าตัดของชิ้นยางสมมาตรกันตลอด



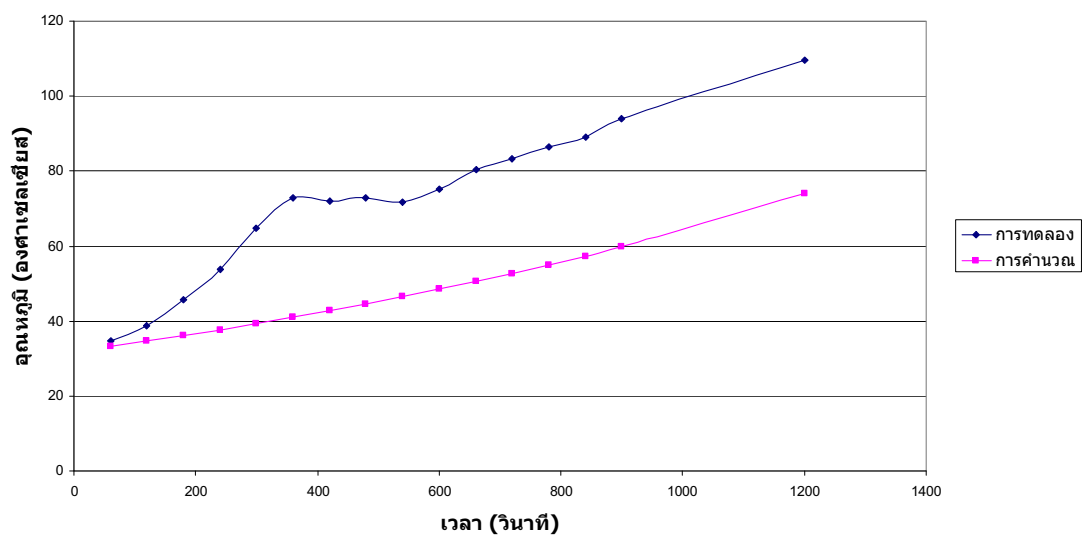
รูปที่ 11 แสดงหมายเลขของตำแหน่งต่างๆของหน้าตัดตัวอย่าง

แล้วทำการคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 2 มิติ โดยแบ่งเอลิเมนต์เป็น 616 เอลิเมนต์ กว้างยาว ด้านละ 2.5 มิลลิเมตร โดยพิจารณาถึงการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในตัวอย่างของแต่ละหน้าตัดเพื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่วัดได้ในแต่ละตำแหน่งดังนี้



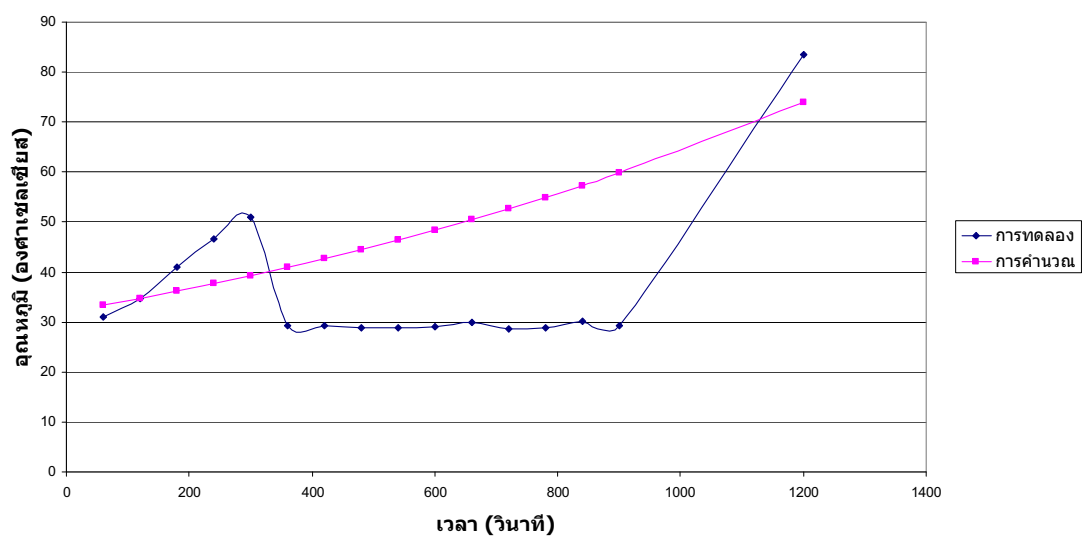
รูปที่ 12 แสดงผลการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในหน้าตัดตัวอย่างเมื่อเวลาผ่านไป 20 นาที นำผลการทดลองและผลการคำนวณที่ตำแหน่งเดียวกันมาเปรียบเทียบกับกันโดยอ้างอิงตามตำแหน่งในรูปที่ 11 ซึ่งได้ผลดังนี้

การเปรียบเทียบผลการทดลองและการคำนวณในตำแหน่งลึกจากขอบยาง 2 cm (บน)



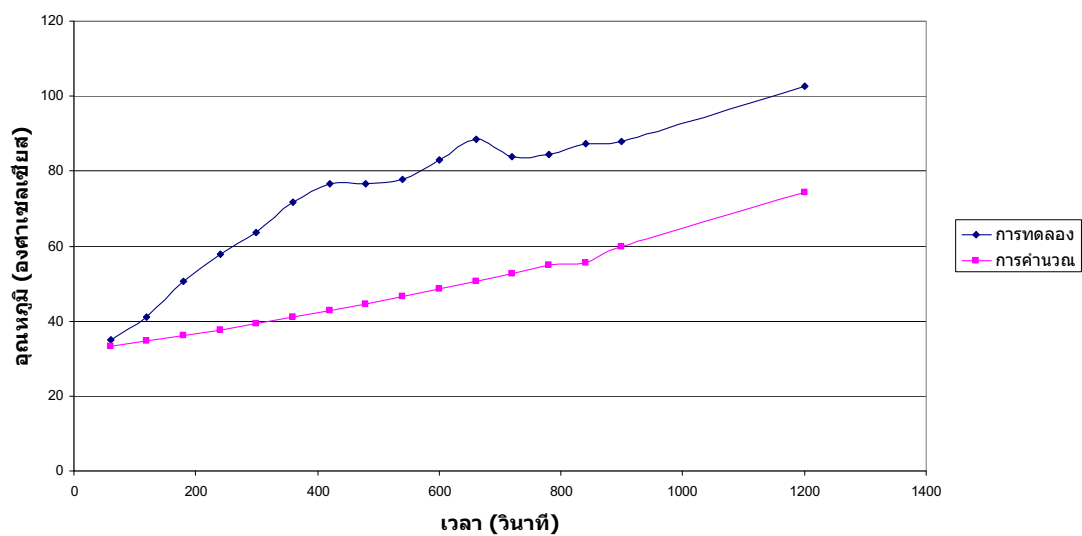
รูปที่ 13 แสดงผลการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในหน้าต่างล้อยางที่ตำแหน่ง 56

การเปรียบเทียบผลการทดลองและการคำนวณในตำแหน่งลึกจากขอบยาง 2 cm (ล่าง)



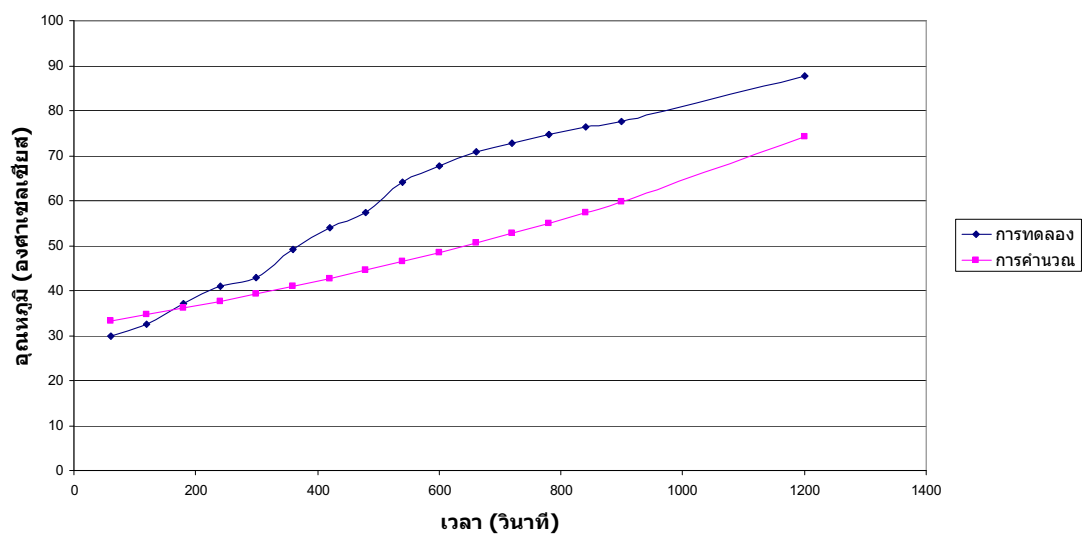
รูปที่ 14 แสดงผลการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในหน้าต่างล้อยางที่ตำแหน่ง 131
(ข้อมูลจากการทดลองน่าจะผิดพลาดจากเครื่องมือวัดอุณหภูมิ จึงไม่นำข้อมูลชุดนี้มาวิเคราะห์)

การเปรียบเทียบผลการทดลองและการคำนวณในตำแหน่งลึกจากขอบยาง 3 cm (บน)



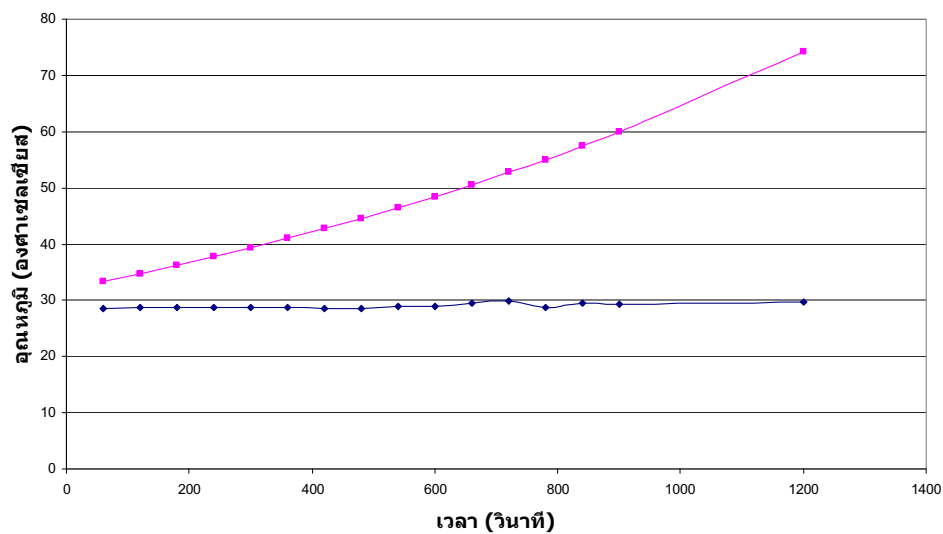
รูปที่ 15 แสดงผลการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในหน้าตัดล้อยางที่ตำแหน่ง 54

การเปรียบเทียบผลการทดลองและการคำนวณในตำแหน่งลึกจากขอบยาง 3 cm (ล่าง)



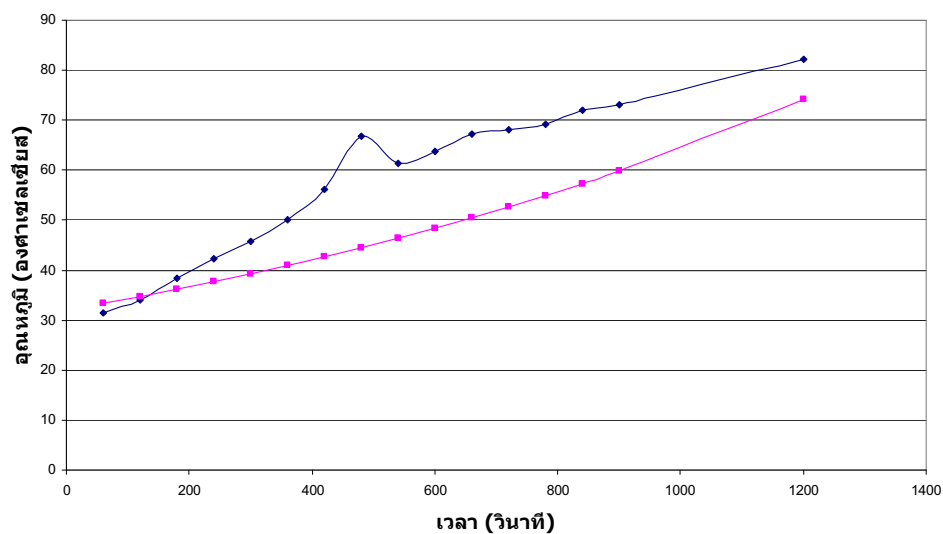
รูปที่ 16 แสดงผลการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในหน้าตัดล้อยางที่ตำแหน่ง 129

การเปรียบเทียบผลการทดลองและการคำนวณในตำแหน่งลึกจากขอบยาง 4 cm (บน)



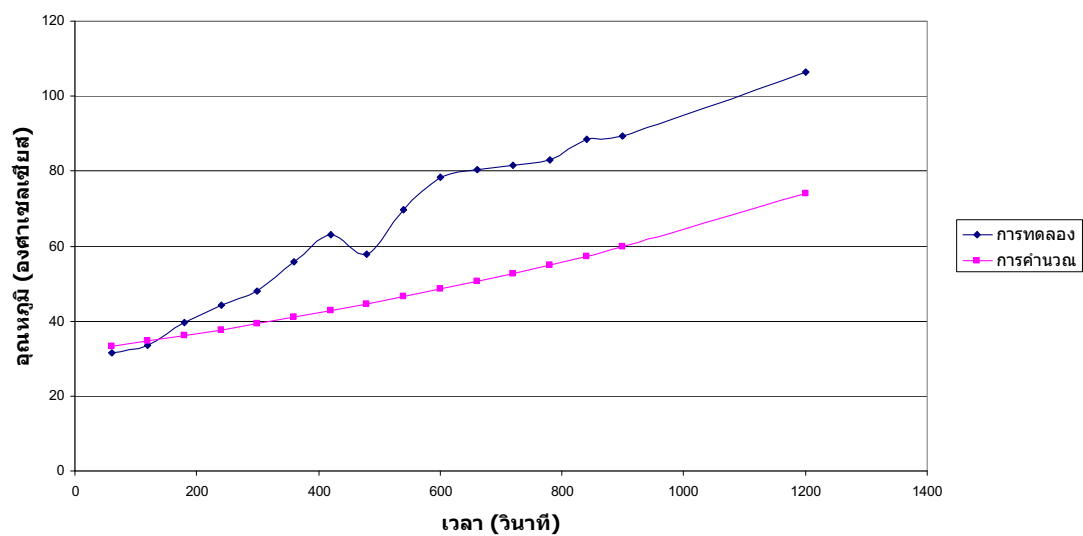
รูปที่ 17 แสดงผลการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในหน้าต่างตัวอย่างที่ตำแหน่ง 52 (ข้อมูลจากการทดลองน่าจะผิดพลาดจากเครื่องมือวัดอุณหภูมิ จึงไม่นำข้อมูลชุดนี้มาวิเคราะห์)

การเปรียบเทียบผลการทดลองและการคำนวณในตำแหน่งลึกจากขอบยาง 4 cm (ล่าง)



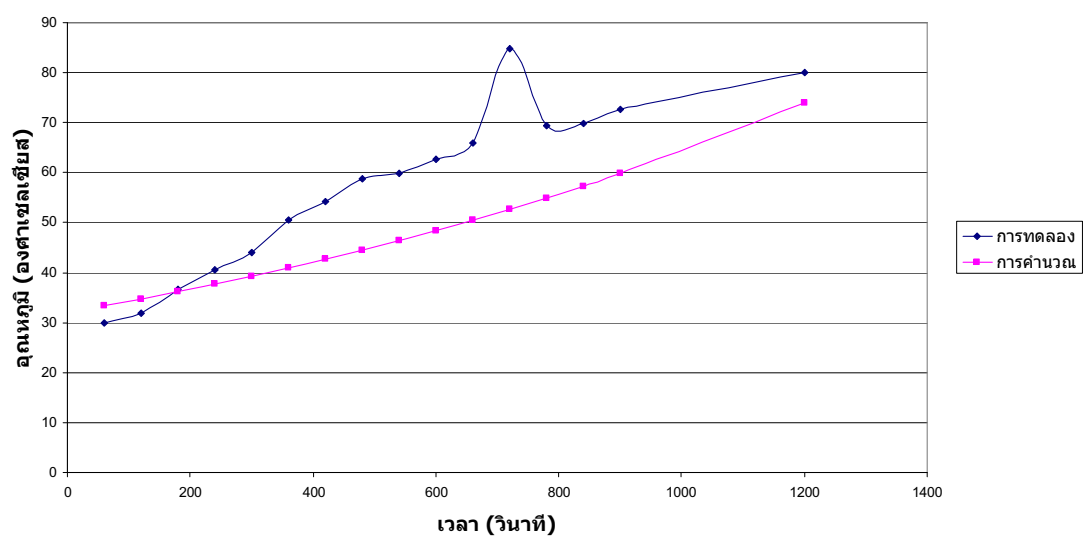
รูปที่ 18 แสดงผลการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในหน้าต่างตัวอย่างที่ตำแหน่ง 127

การเปรียบเทียบผลการทดลองและการคำนวณในตำแหน่งลึกจากขอบยาง 5 cm (บน)



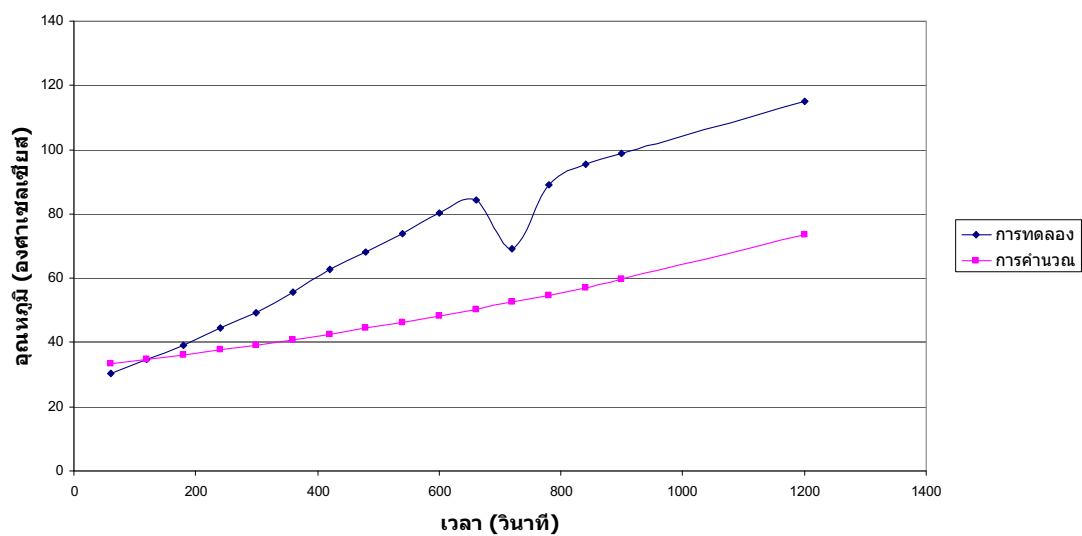
รูปที่ 19 แสดงผลการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในหน้าต่างล้อยางที่ตำแหน่ง 50

การเปรียบเทียบผลการทดลองและการคำนวณในตำแหน่งลึกจากขอบยาง 5 cm (ล่าง)



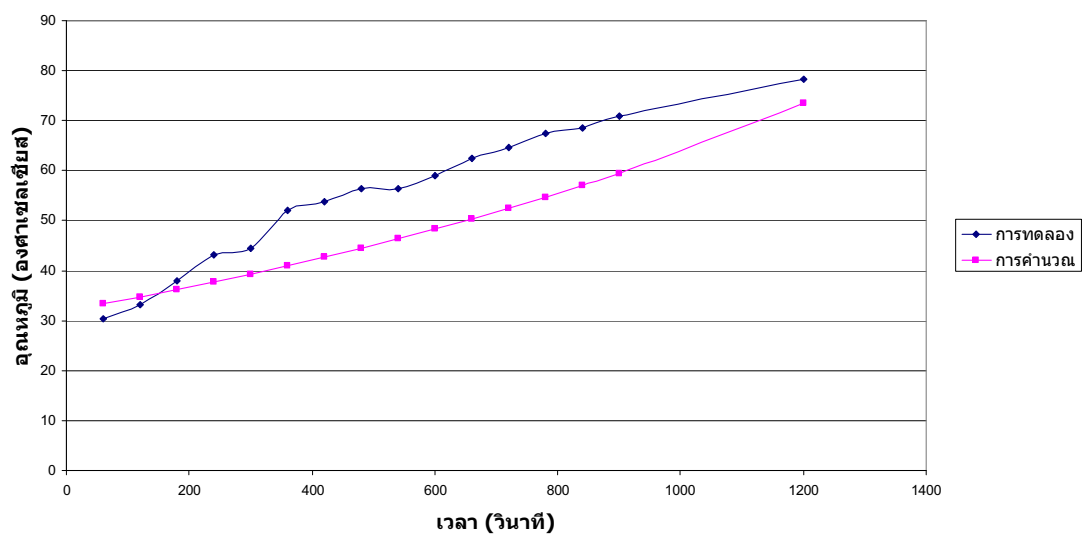
รูปที่ 20 แสดงผลการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในหน้าต่างล้อยางที่ตำแหน่ง 125

การเปรียบเทียบผลการทดลองและการคำนวณในตำแหน่งลึกจากขอบยาง 6 cm (บน)



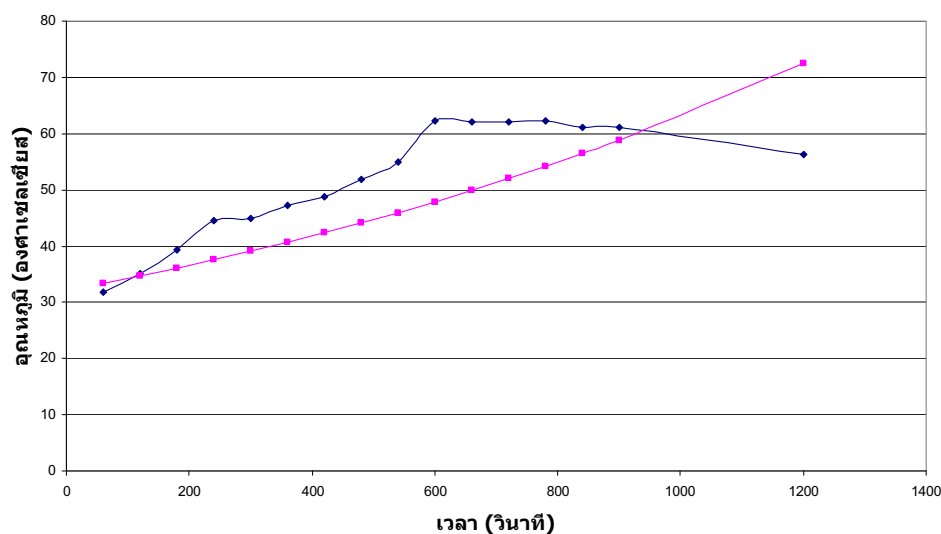
รูปที่ 21 แสดงผลการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในหน้าต่างล้อยางที่ตำแหน่ง 48

การเปรียบเทียบผลการทดลองและการคำนวณในตำแหน่งลึกจากขอบยาง 6 cm (ล่าง)



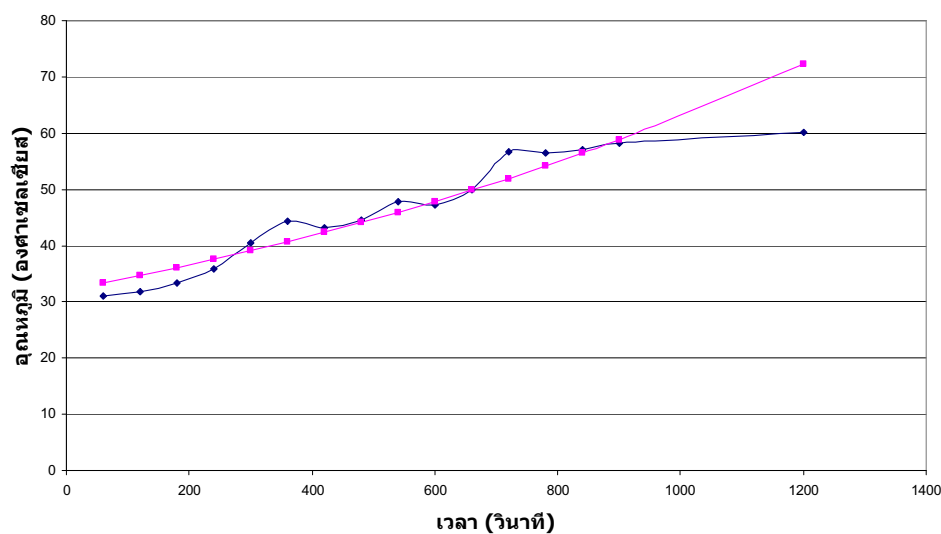
รูปที่ 22 แสดงผลการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในหน้าต่างล้อยางที่ตำแหน่ง 123

การเปรียบเทียบผลการทดลองและการคำนวณในตำแหน่งขอบยาง (บน)



รูปที่ 23 แสดงผลการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในหน้าตัดล้อยางที่ตำแหน่ง 60

การเปรียบเทียบผลการทดลองและการคำนวณในตำแหน่งขอบยาง (ล่าง)



รูปที่ 24 แสดงผลการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในหน้าตัดล้อยางที่ตำแหน่ง 135

2. การวิเคราะห์และสรุปผล

จากการเปรียบเทียบผลการทดลองและการคำนวณการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในหน้าตัดยาง ที่ตำแหน่งต่างๆ พบว่าถ้าตำแหน่งที่พิจารณาอยู่บริเวณส่วนบนของล้อยางซึ่งเป็นบริเวณที่อยู่ใกล้คลื่นไมโครเวฟมากกว่าจะมีความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิจากการคำนวณและการทดลองประมาณ 20 – 25 °C ซึ่งถ้าตำแหน่งที่พิจารณาอยู่บริเวณส่วนล่างของล้อยางจะมีความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิจากการคำนวณและการทดลองประมาณ 10 – 15 °C โดยแนวโน้มในการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิทั้งการทดลองและการคำนวณเป็นไปในทิศทางเดียวกัน

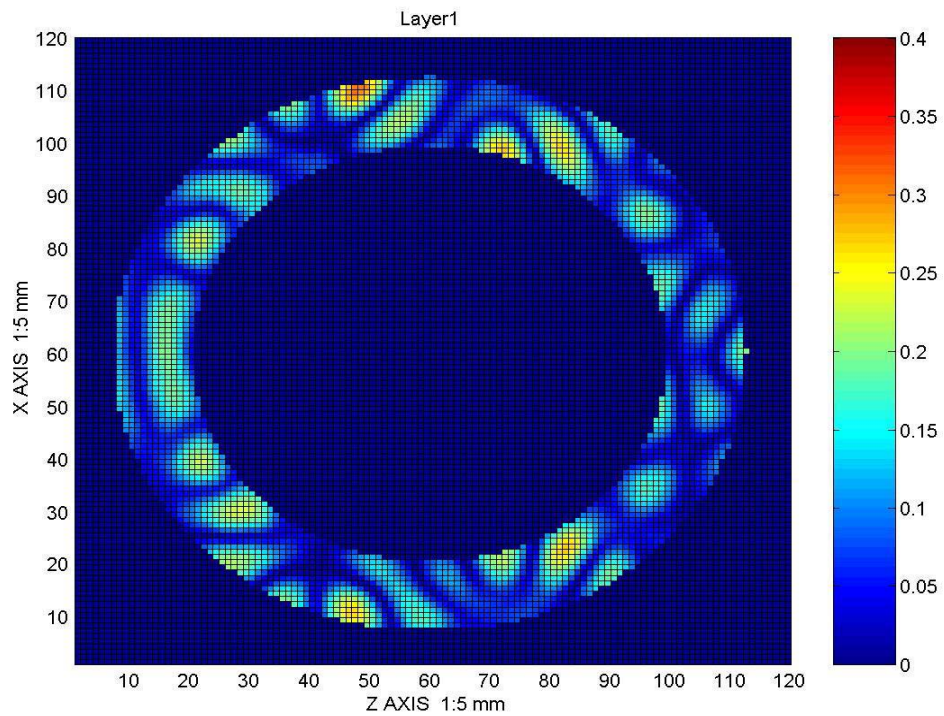
ดังนั้นเมื่อวิเคราะห์ถึงความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจึงน่าจะมาจากสาเหตุคือ การประมาณค่าอัตราการเกิดความร้อนขึ้นภายในเนื้องาน (Heat generation) น่าจะไม่แม่นยำเนื่องจากผู้วิจัยประมาณค่าอัตราการเกิดความร้อนขึ้นภายในเนื้องานให้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิเพียงอย่างเดียว เพราะต้องนำผลการคำนวณค่าสนามไฟฟ้าที่ได้จากโปรแกรม MatLab มาประมาณเป็นฟังก์ชันก่อนแล้วจึงนำไปคำนวณต่อในโปรแกรมออบาคัสเพื่อหาค่าอุณหภูมิต่อไป ซึ่งผู้วิจัยจะได้ปรับปรุงแก้ไขต่อไป

สำหรับลักษณะของการเกิดความร้อนในยางพบว่าเมื่อให้พลังงานไมโครเวฟแก่ยาง ยางจะสามารถเกิดความร้อนขึ้นภายในเนื้องานได้ดี และการหมุนยางจะช่วยให้การกระจายตัวของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นมีความสม่ำเสมอมากกว่ากรณีไม่หมุนยาง แต่ในการออกแบบเครื่องอุ่นสัอย่างที่จะใช้งานจริงอาจจะนำไปพัฒนากลั่นมาใช้แทนเพื่อให้กลั่นมีความสม่ำเสมอไม่ตกกระทบที่ใดที่หนึ่งมากเกินไป จนเป็นเหตุให้เกิดจุดความร้อนขึ้นภายในยาง

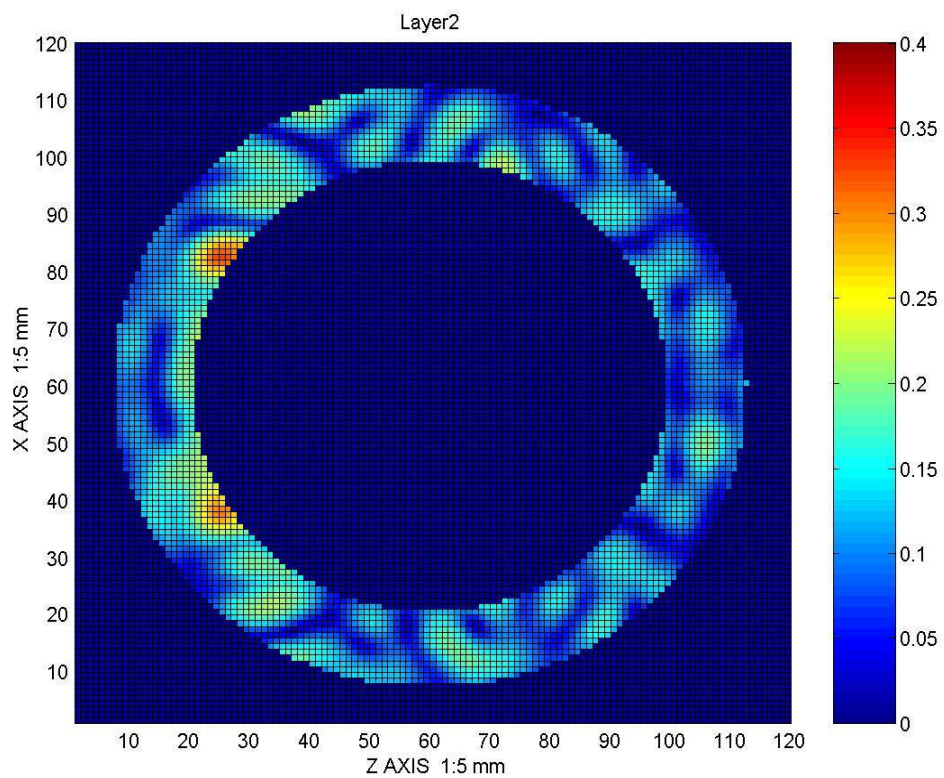
ค่าสมบัติต่างๆของยางที่ใช้ในการคำนวณ

ตารางที่ 1 ค่าสมบัติทางฉนวนไฟฟ้าและทางความร้อนของยาง โดยการทดสอบและเอกสารอ้างอิง[9]

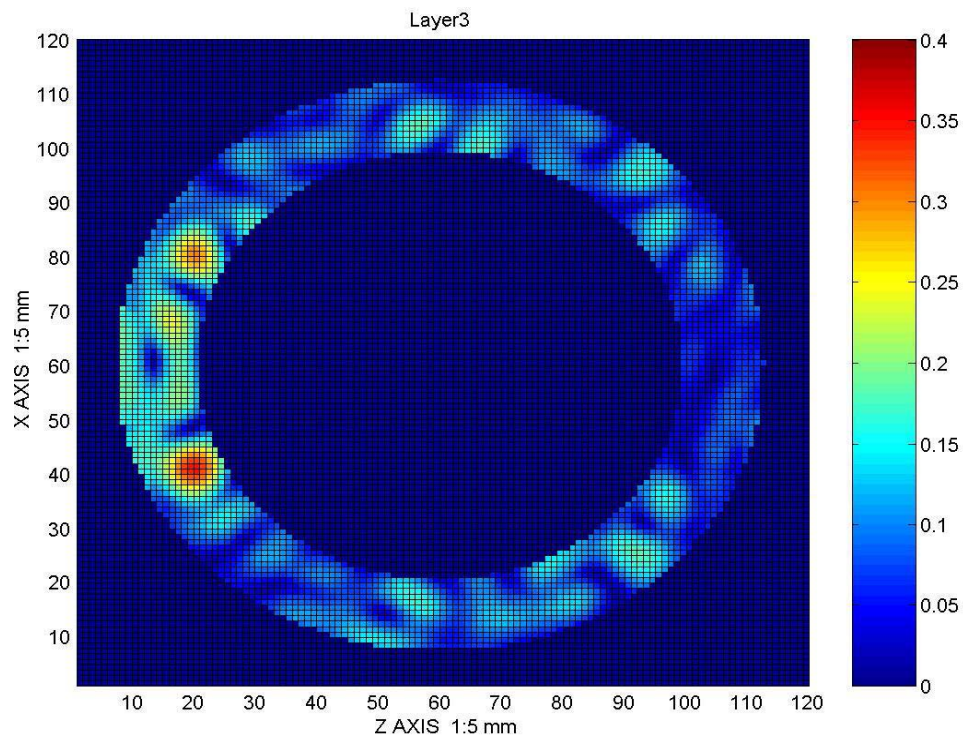
Rubber	Dielectric Properties		Thermal Properties		
	Dielectric Constant	Dielectric Loss	Thermal Conductivity (W/m.°C)	Specific heat (kJ/kg °C)	Density (kg/m ³)
C-559	4.0	0.14	0.3334	1707	1184.5
M-049	4.0	0.14	0.2500	1756	1093.3
M-059	4.0	0.14	0.2877	1780	1128.7



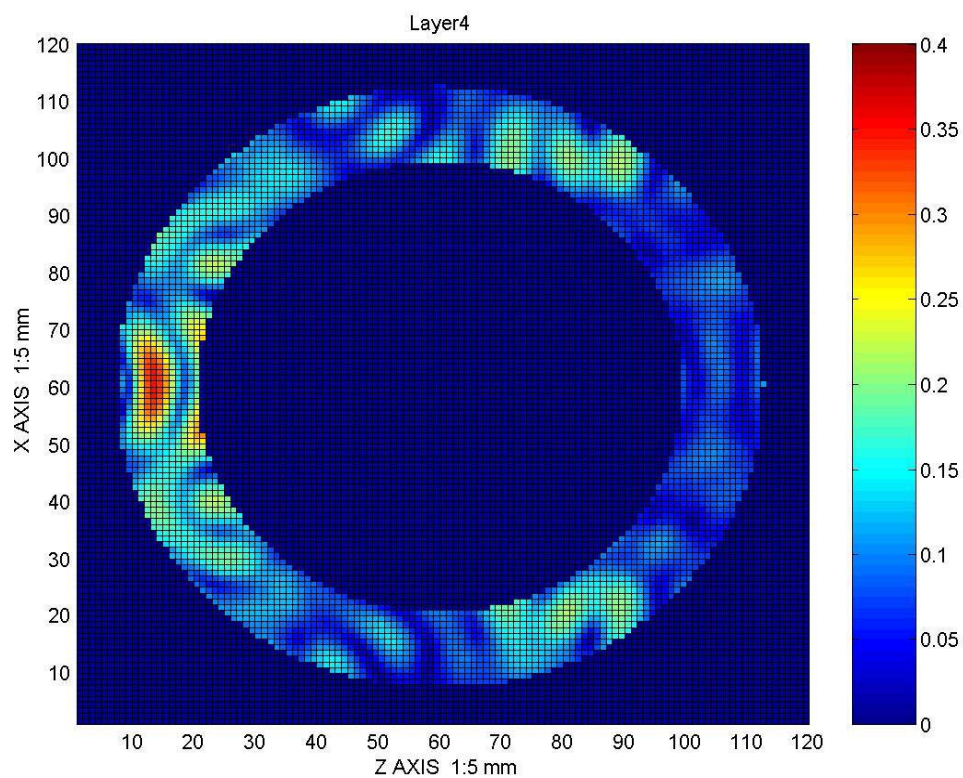
รูปที่ 27 สนามไฟฟ้าภายในวัตถุทรงกระบอกรูปวงแหวนที่ระนาบ XZ ที่ความหนา 0 มิลลิเมตรของวัตถุ



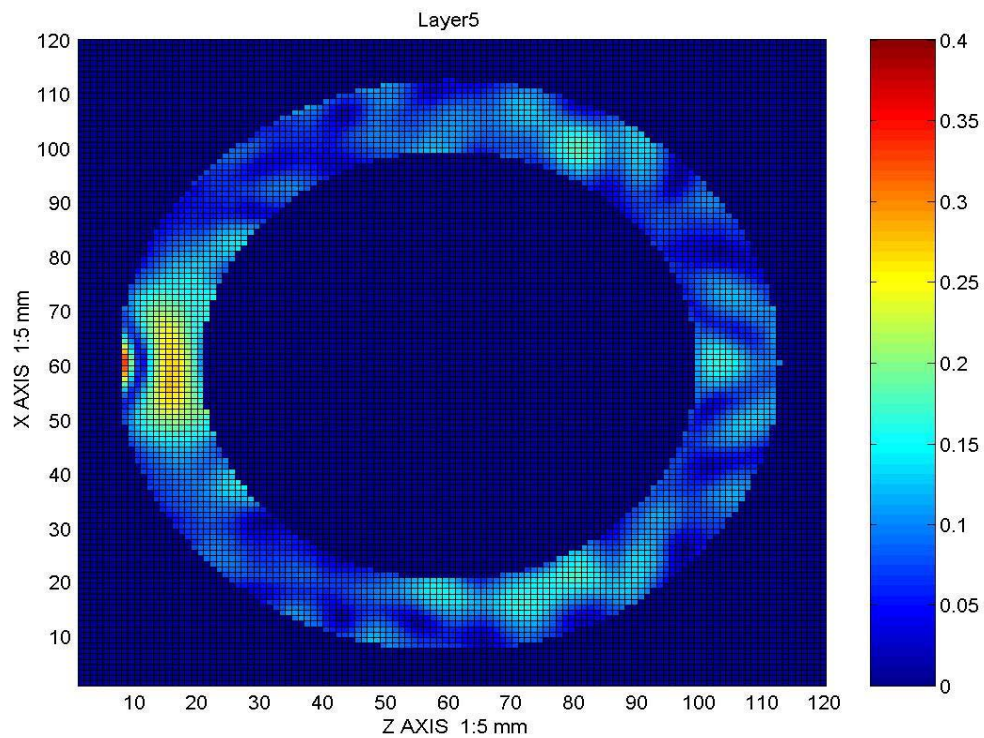
รูปที่ 28 สนามไฟฟ้าภายในวัตถุทรงกระบอกรูปวงแหวนที่ระนาบ XZ ที่ความหนา 40 มิลลิเมตรของวัตถุ



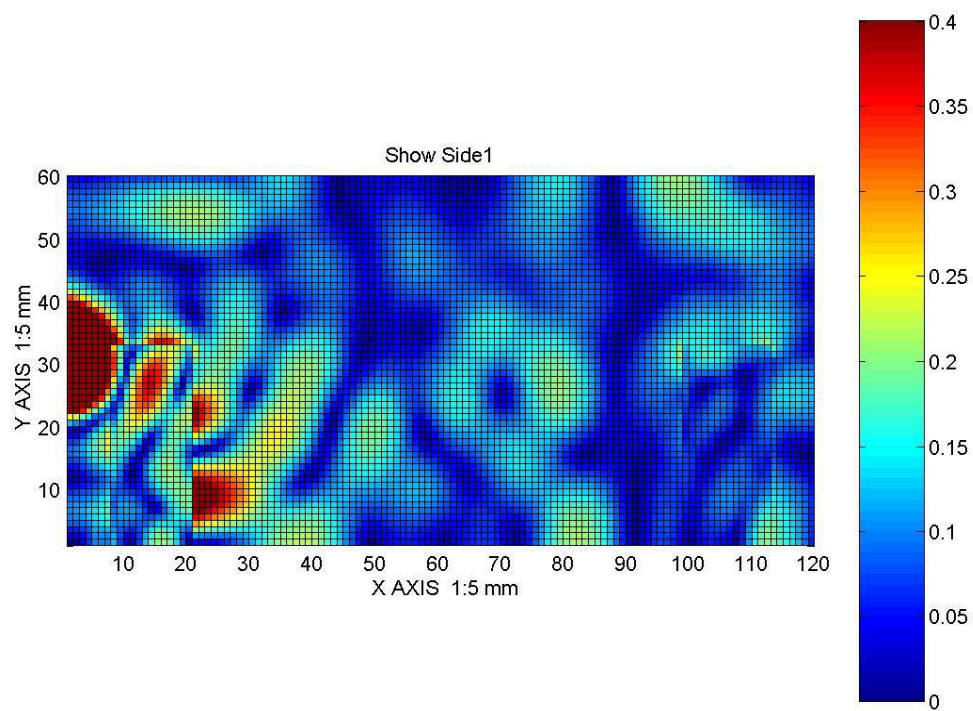
รูปที่ 29 สนามไฟฟ้าภายในวัตถุทรงกระบอกรูปวงแหวนที่ระนาบ XZ ที่ความหนา 80 มิลลิเมตรของวัตถุ



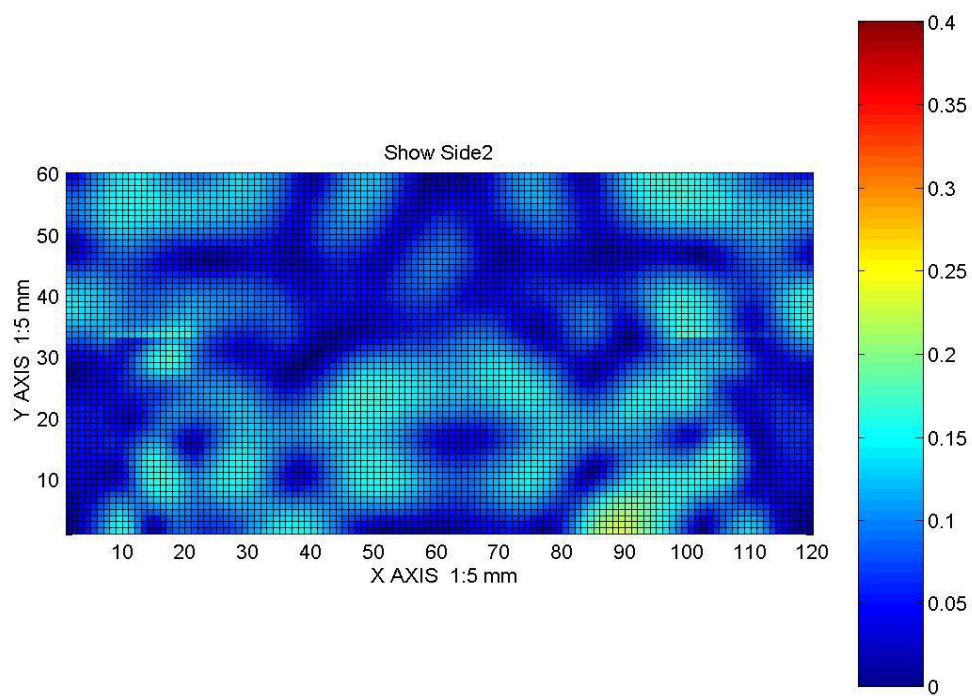
รูปที่ 30 สนามไฟฟ้าภายในวัตถุทรงกระบอกรูปวงแหวนที่ระนาบ XZ ที่ความหนา 120 มิลลิเมตรของวัตถุ



รูปที่ 31 สนามไฟฟ้าภายในวัตถุทรงกระบอกรูปวงแหวนที่ระนาบ XZ ที่ความหนา 160 มิลลิเมตรของวัตถุ



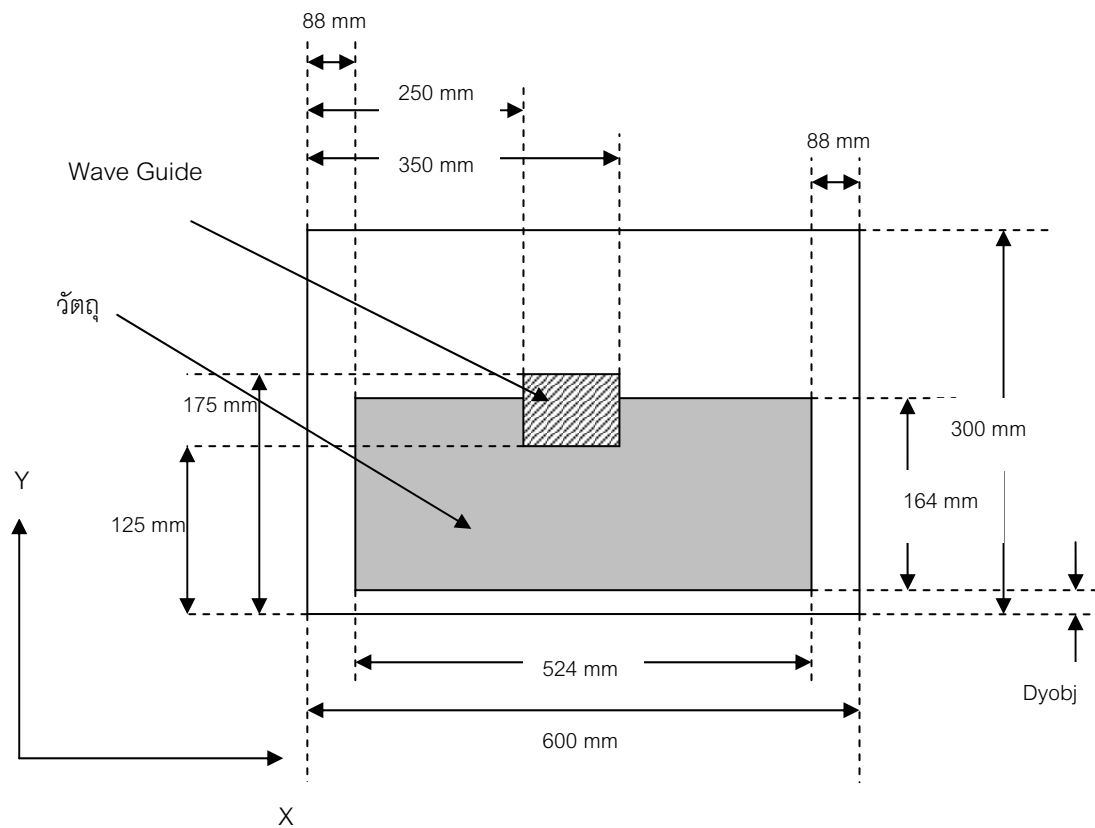
รูปที่ 32 สนามไฟฟ้าภายในวัตถุทรงกระบอกรูปวงแหวนที่ระนาบ XY ที่ $Z = 300$ มิลลิเมตร



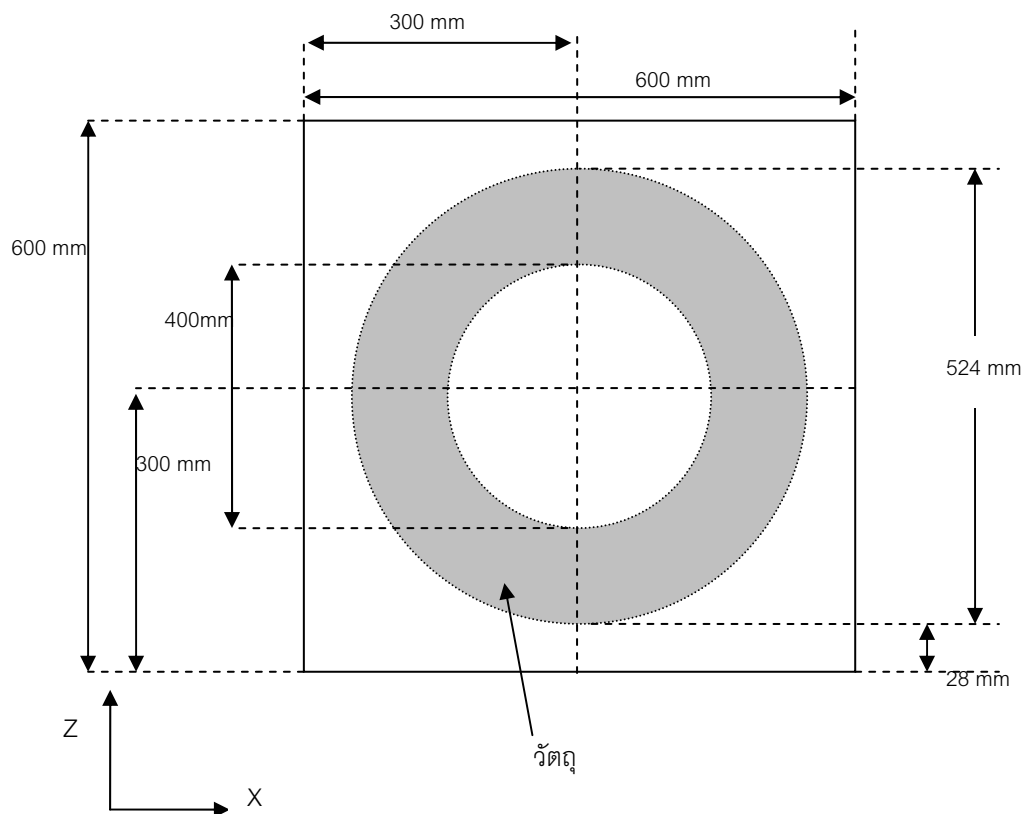
รูปที่ 33 สนามไฟฟ้าภายในวัตถุทรงกระบอกรูปวงแหวนที่ระนาบ YZ ที่ $X = 300$ มิลลิเมตร

แบบจำลองที่ 2

พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองในแบบจำลองที่ 2 มีดังนี้

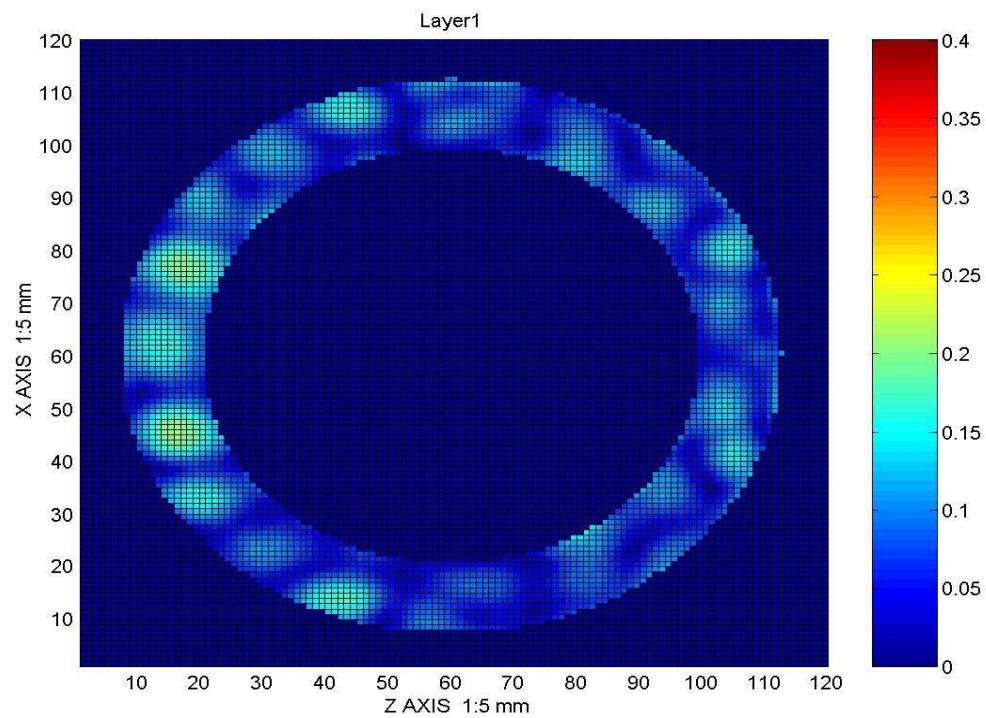


รูปที่ 34 ขนาด ตำแหน่งของท่อนำคลื่น ขนาดของโพรงสี่เหลี่ยม ขนาดของวัตถุ และตำแหน่งการวางวัตถุ

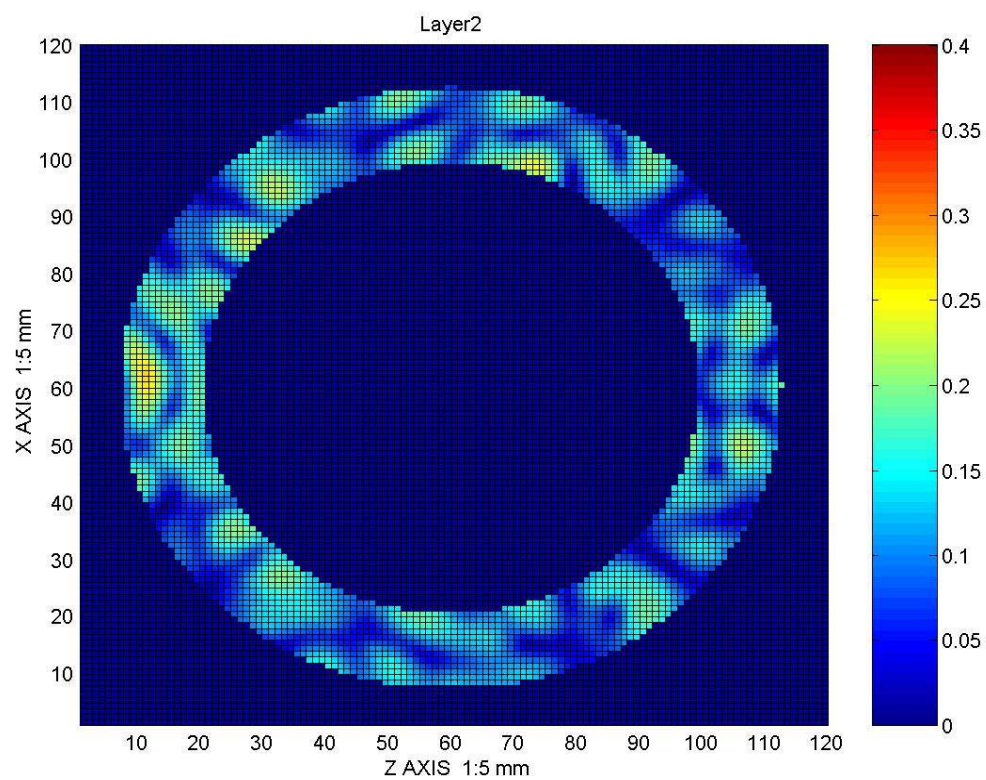


รูปที่ 35 ขนาด ตำแหน่งของท่อนำคลื่น ขนาดของโพรงสี่เหลี่ยม ขนาดของวัตถุ และตำแหน่งการวางวัตถุ

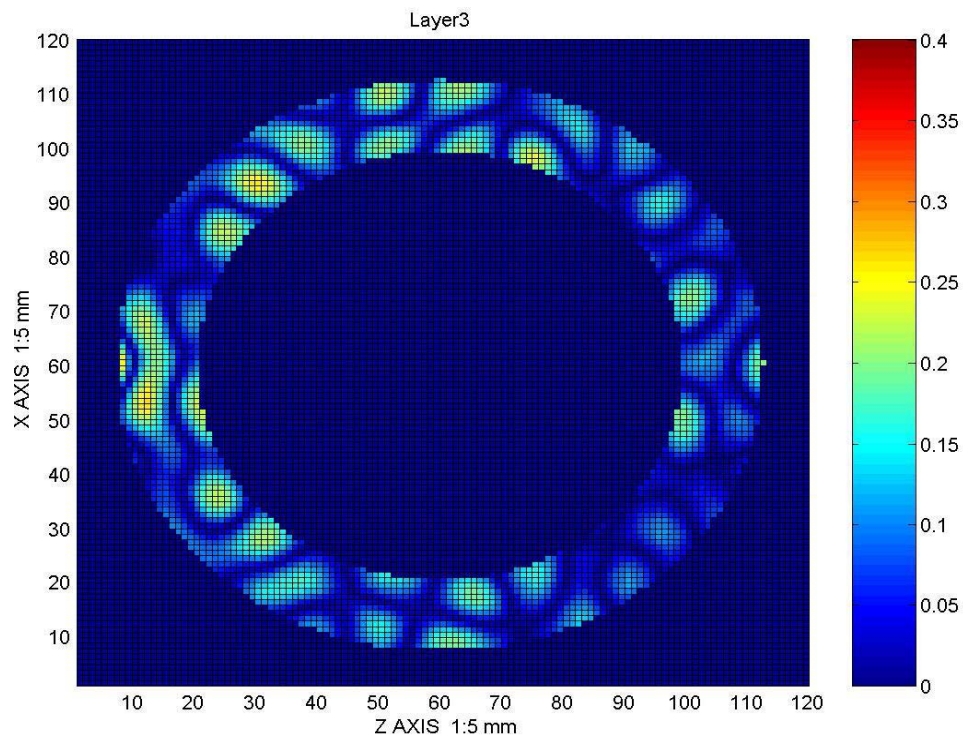
ขนาดของโพรงสี่เหลี่ยมในแนวแกน X	600	มิลลิเมตร
ขนาดของโพรงสี่เหลี่ยมในแนวแกน Y	300	มิลลิเมตร
ขนาดของโพรงสี่เหลี่ยมในแนวแกน Z	600	มิลลิเมตร
เส้นผ่านศูนย์กลางขอบนอกของวัตถุ	524	มิลลิเมตร
เส้นผ่านศูนย์กลางขอบในของวัตถุ	400	มิลลิเมตร
ความหนาของวัตถุ	164	มิลลิเมตร
ขนาดของกริดที่ใช้ในการคำนวณ	5	มิลลิเมตร
ความถี่ที่ใช้	2.45	GHz
ตำแหน่งการเชื่อมต่อท่อนำคลื่นกับโพรงรูปสี่เหลี่ยม(X/Y)	300/150	มิลลิเมตร
ตำแหน่งการวางวัตถุในโพรงสี่เหลี่ยม(X/Z)	300/300	มิลลิเมตร
ระยะการวางตำแหน่งในแกน Y ($D_{y,obj}$)	140	มิลลิเมตร



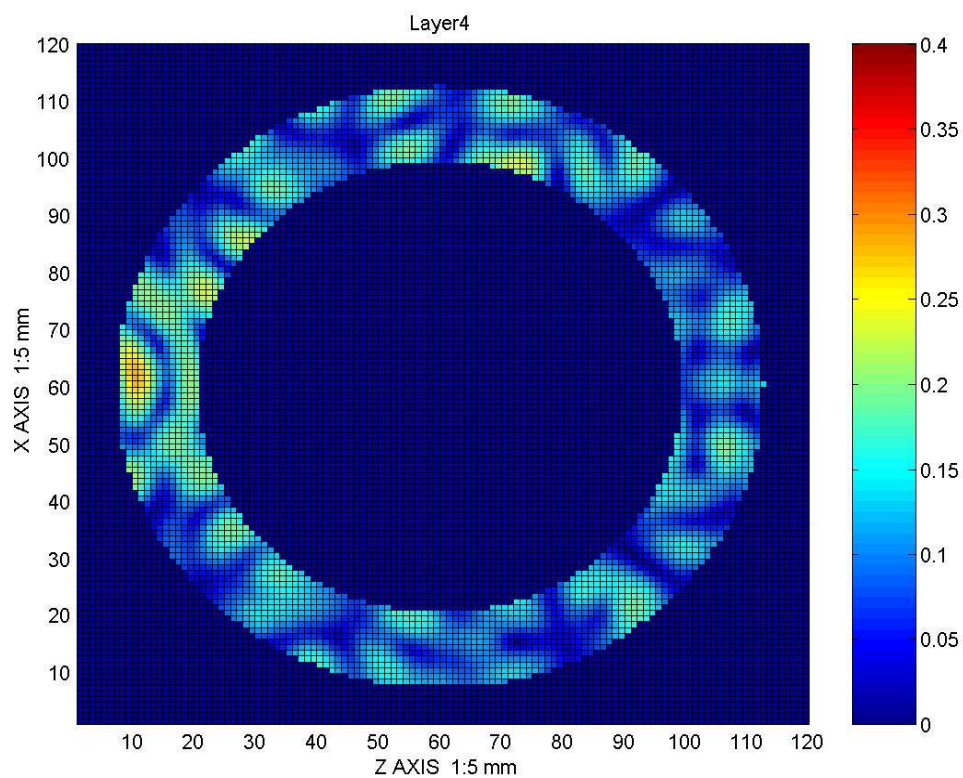
รูปที่ 36 สนามไฟฟ้าภายในวัตถุทรงกระบอกรูปวงแหวนที่ระนาบ XZ ที่ความหนา 0 มิลลิเมตรของวัตถุ



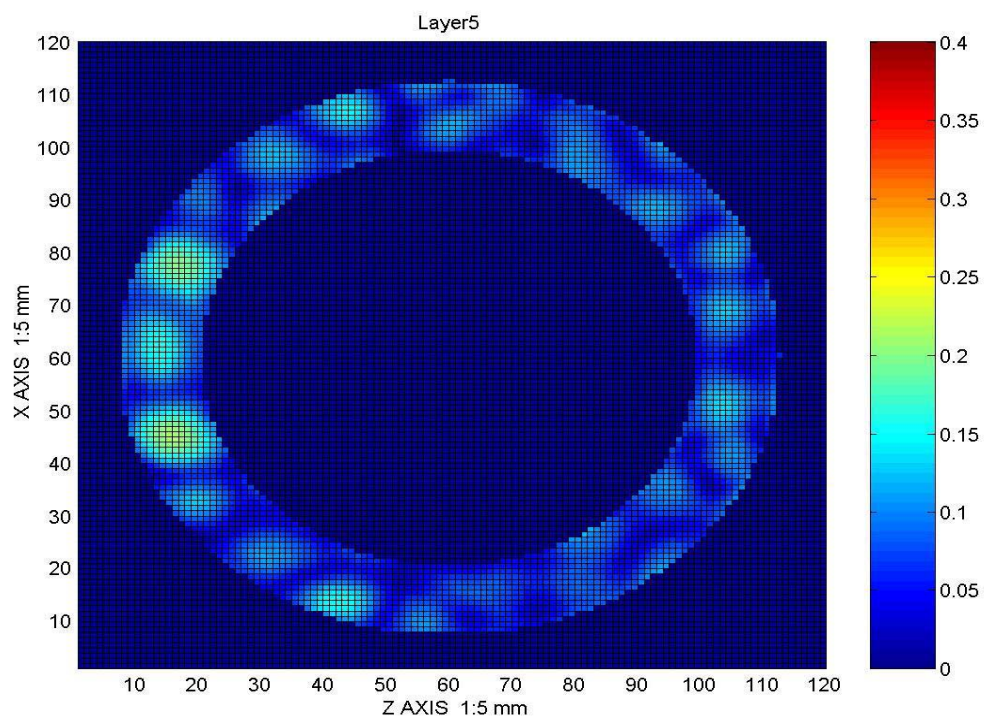
รูปที่ 37 สนามไฟฟ้าภายในวัตถุทรงกระบอกรูปวงแหวนที่ระนาบ XZ ที่ความหนา 40 มิลลิเมตรของวัตถุ



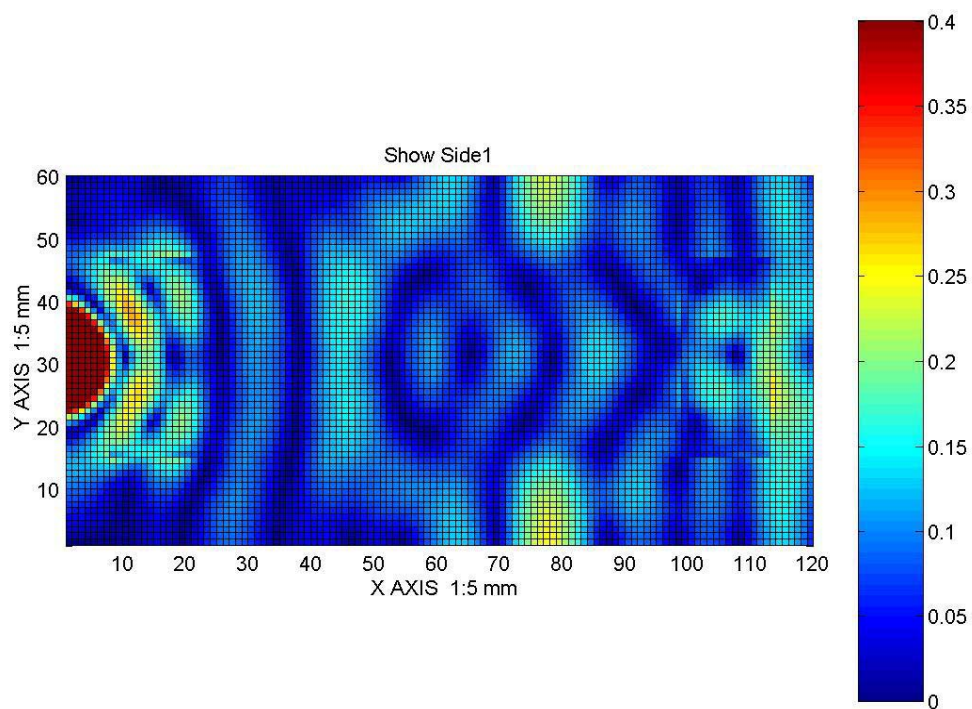
รูปที่ 38 สนามไฟฟ้าภายในวัตถุทรงกระบอกรูปวงแหวนที่ระนาบ XZ ที่ความหนา 80 มิลลิเมตรของวัตถุ



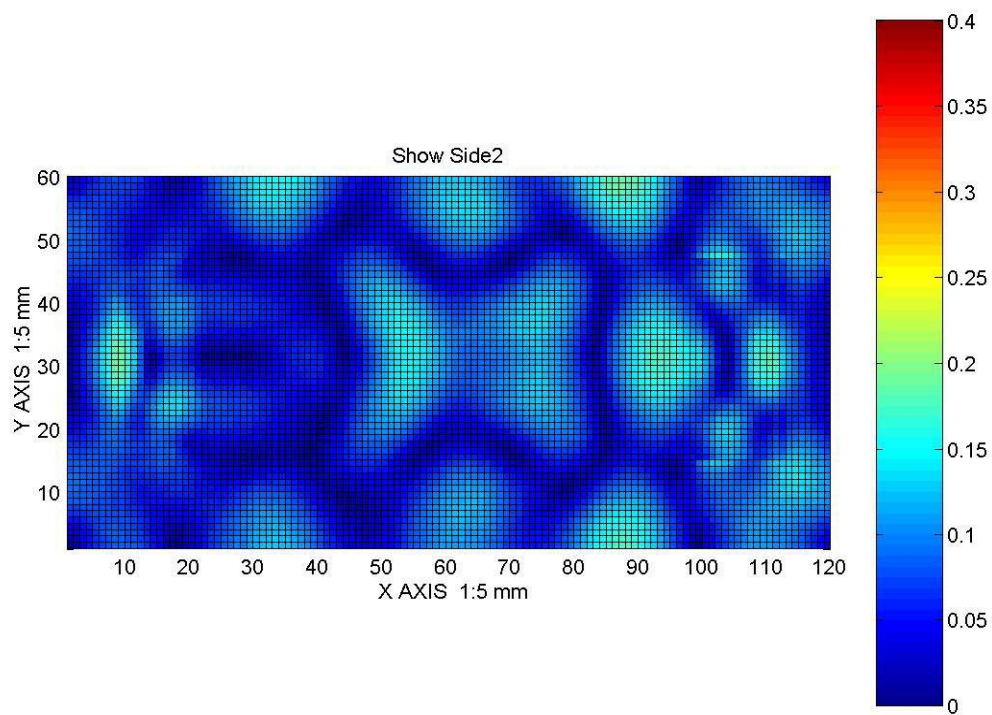
รูปที่ 39 สนามไฟฟ้าภายในวัตถุทรงกระบอกรูปวงแหวนที่ระนาบ XZ ที่ความหนา 120 มิลลิเมตรของวัตถุ



รูปที่ 40 สนามไฟฟ้าภายในวัตถุทรงกระบอกรูปวงแหวนที่ระนาบ XZ ที่ความหนา 160 มิลลิเมตรของวัตถุ



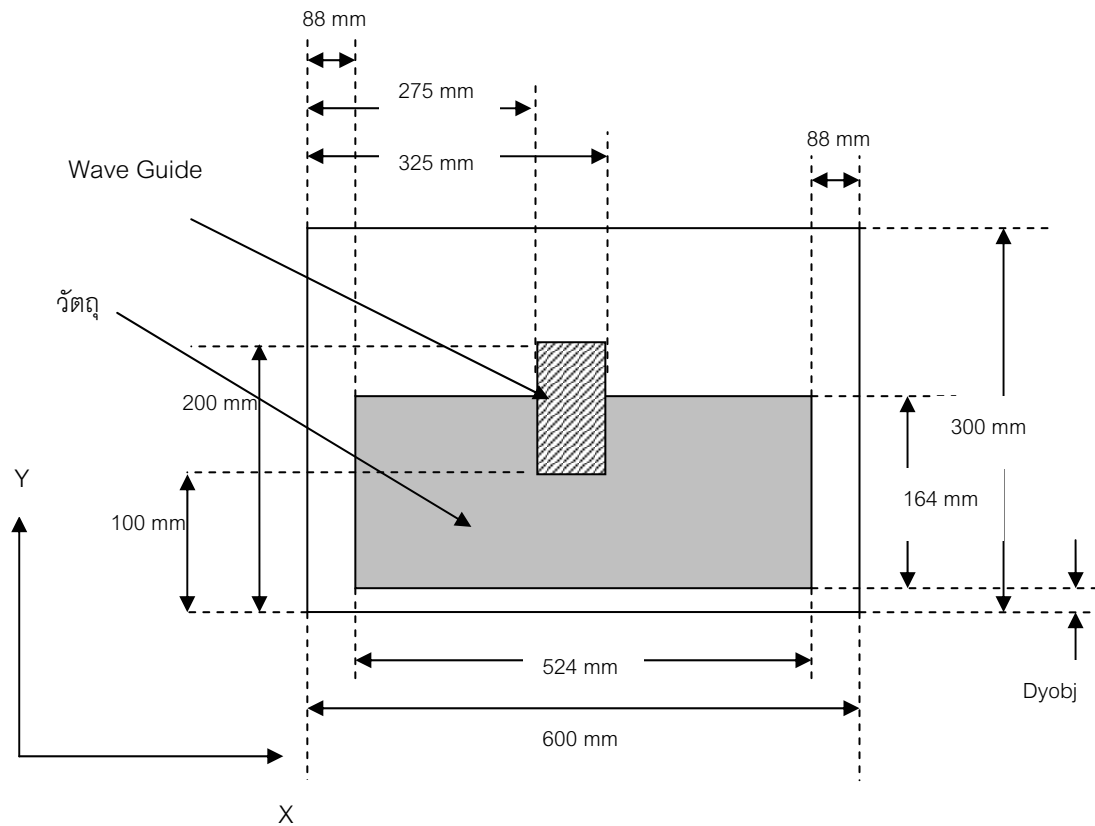
รูปที่ 41 สนามไฟฟ้าภายในวัตถุทรงกระบอกรูปวงแหวนที่ระนาบ XY ที่ $Z = 300$ มิลลิเมตร



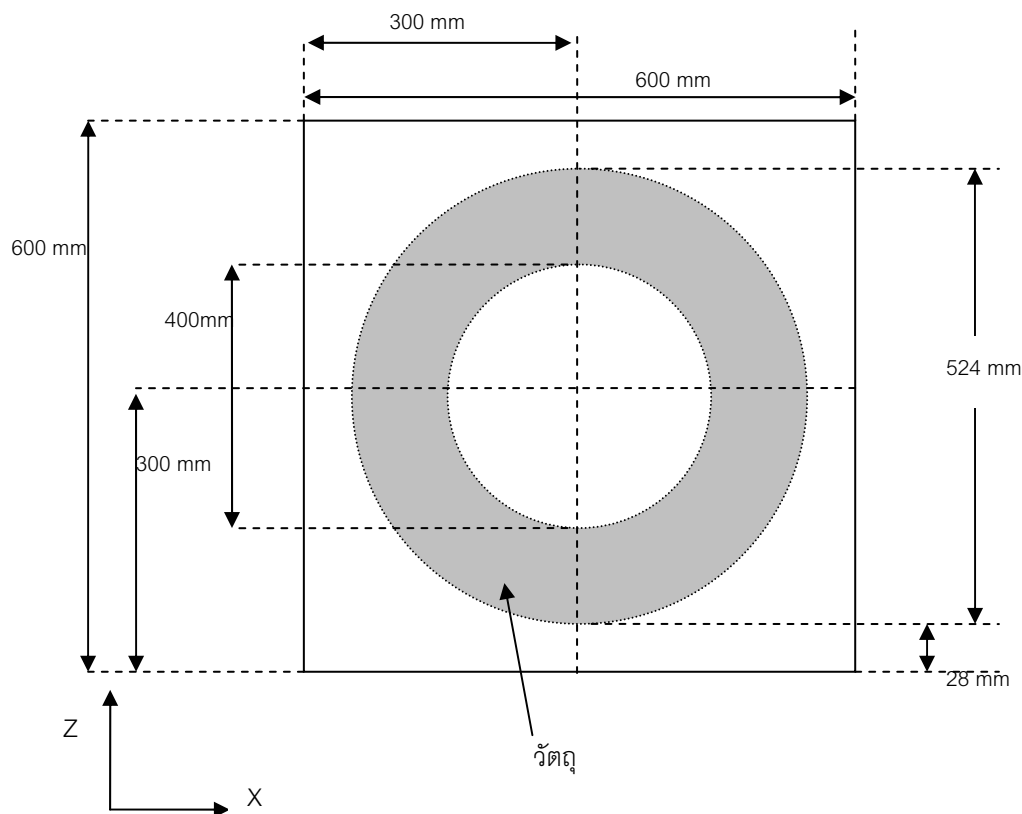
รูปที่ 42 สนามไฟฟ้าภายในวัตถุทรงกระบอกรูปวงแหวนที่ระนาบ YZ ที่ $X = 300$ มิลลิเมตร

แบบจำลองที่ 3

พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองในแบบจำลองที่ 3 มีดังนี้



รูปที่ 43 ขนาด ตำแหน่งของท่อนำคลื่น ขนาดของโพรงสี่เหลี่ยม ขนาดของวัตถุ และตำแหน่งการวางวัตถุ



รูปที่ 44 ขนาด ตำแหน่งของท่อนำคลื่น ขนาดของโพรงสี่เหลี่ยม ขนาดของวัตถุ และตำแหน่งการวางวัตถุ

ขนาดของโพรงสี่เหลี่ยมในแนวแกน X	600	มิลลิเมตร
ขนาดของโพรงสี่เหลี่ยมในแนวแกน Y	300	มิลลิเมตร
ขนาดของโพรงสี่เหลี่ยมในแนวแกน Z	600	มิลลิเมตร
เส้นผ่านศูนย์กลางขอบนอกของวัตถุ	524	มิลลิเมตร
เส้นผ่านศูนย์กลางขอบในของวัตถุ	400	มิลลิเมตร
ความหนาของวัตถุ	164	มิลลิเมตร
ขนาดของกริดที่ใช้ในการคำนวณ	5	มิลลิเมตร
ความถี่ที่ใช้	2.45	GHz
ตำแหน่งการเชื่อมต่อท่อนำคลื่นกับโพรงรูปสี่เหลี่ยม(X/Y)	300/150	มิลลิเมตร
ตำแหน่งการวางวัตถุในโพรงสี่เหลี่ยม(X/Z)	300/300	มิลลิเมตร
ระยะการวางตำแหน่งในแกน Y ($D_{y,obj}$)	0	มิลลิเมตร