

## โปรแกรมจำลองการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในโพรงตัวนำโดยวิธีของโมเมนต์

อลงกรณ์ พรหมที<sup>1</sup> พินิจ เนื่องภิรมย์<sup>1</sup> ศรัณย์ ชูคติ<sup>2</sup> และ สมศักดิ์ อรรคทิมากุล<sup>3\*</sup>

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการจำลองการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบนแผ่นตัวนำที่วางอยู่ในโพรงตัวนำ รูปแบบของการวิเคราะห์จะอาศัยทฤษฎีของโมเมนต์ (Moments Theory) ที่ทำงานภายใต้ฟังก์ชันการเชื่อมโยงกับผู้ใช้ทางกราฟิก (GUI) ของโปรแกรม MATLAB® ซึ่งผู้ใช้สามารถกำหนดขนาดพื้นที่ของแผ่นและโพรงตัวนำ ตลอดจนจำนวนโมเมนต์ของคลื่นที่แพร่กระจายได้ โดยการจำลองจะแสดงให้เห็นรูปร่างของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบริเวณแผ่นตัวนำ ขนาดของคลื่นในโดเมนของสเปกตรัมได้ ผลของการวิเคราะห์การแพร่กระจาย

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าโดยโปรแกรมจำลองที่พัฒนาขึ้น มีความสอดคล้องและใกล้เคียงกับผลทางทฤษฎี ทั้งนี้จากการประเมินคุณภาพของโปรแกรมจำลองโดยผู้เชี่ยวชาญและผู้ใช้งาน พบว่าความพึงพอใจที่มีต่อโปรแกรมจำลองเฉลี่ยอยู่ในระดับมาก (ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.19 ค่า S.D. เท่ากับ 0.78) ดังนั้นสรุปได้ว่าโปรแกรมจำลองการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในโพรงตัวนำสามารถใช้เป็นสื่อการสอนสำหรับวิชาคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและวงจรความถี่สูงได้

**คำสำคัญ:** โปรแกรมจำลอง ทฤษฎีของโมเมนต์ การแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

<sup>1</sup> นักศึกษา ภาควิชาครุศาสตร์ไฟฟ้า คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

<sup>2</sup> อาจารย์ สาขาวิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา

<sup>3</sup> รองศาสตราจารย์ ภาควิชาครุศาสตร์ไฟฟ้า คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

\* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 0-2555-2000 ต่อ 3322 อีเมล: ssa@kmutnb.ac.th



## Simulation Software for Electromagnetic Wave Propagation in Conducting Cavity Using Method of Moments

Alongkorn Promtee<sup>1</sup> Pinit Ningpirom<sup>1</sup> Sarun Choocadee<sup>2</sup> and Somsak Akatimagool<sup>3\*</sup>

### Abstract

This research presents simulation software for electromagnetic wave propagation in conducting cavity. The analysis model based on the Moments Theory was implemented by using the GUI (Graphic User Interface) function of MATLAB<sup>®</sup> software. Users can define the dimensions of the conducting plate and cavity dimension and mode number for calculation of the electromagnetic wave in the spectral domain of the conducting plate. The simulated results were in

good agreement in comparison with electromagnetic theory. From the quality evaluation of the developed simulation tool by experts and users, we found that the average score of satisfaction was at a high level ( $\bar{X} = 4.19$ ,  $S.D. = 0.78$ ). Finally, the developed simulation program can be used as a teaching aid for electromagnetic wave theory or related subjects.

**Keywords:** Simulation Software, Moments Theory, Electromagnetic Wave Propagation

<sup>1</sup> Student, Department of Teacher Training in Electrical Engineering, Faculty of Technical Education, King Mongkut's University of Technology North Bangkok.

<sup>2</sup> Lecturer, Department of Industrial Technology, Faculty of Industrial Technology, Songkhla Rajabhat University.

<sup>3</sup> Associate Professor, Department of Teacher Training in Electrical Engineering, Faculty of Technical Education, King Mongkut's University of Technology North Bangkok.

\* Corresponding Author, Tel. 0-2555-2000 Ext. 3322, E-mail: ssa@kmutnb.ac.th

## 1. บทนำ

วิวัฒนาการด้านเทคโนโลยีการสื่อสารในทุกวันนี้มีความทันสมัยและความก้าวหน้าเป็นอย่างมาก ผู้ใช้สามารถติดต่อสื่อสารทั้งภาพและเสียงจากประเทศไปอีกประเทศหนึ่งหรือติดต่อข้ามทวีปได้โดยใช้โทรศัพท์มือถือหรือใช้การเชื่อมต่อผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ต และในอนาคตการพัฒนาเทคโนโลยีการสื่อสารจะยิ่งสะดวก รวดเร็ว และทันสมัยมากยิ่งขึ้น อย่างไรก็ตามการพัฒนาและการใช้งานด้านเทคโนโลยีการสื่อสารจำเป็นต้องมีการลงทุนที่ใช้ค่าใช้จ่ายจำนวนมากที่ผู้ที่เกี่ยวข้องจำเป็นต้องพิจารณาการเลือกใช้งานอย่างระมัดระวังเป็นอย่างยิ่ง

การจัดการเรียนการสอนทั้งในและต่างประเทศมีการสนับสนุนให้มีการจัดการเรียนการสอนเกี่ยวกับสาขาด้านการสื่อสาร ทั้งนี้เพื่อรองรับกับการพัฒนาและการใช้งานด้านเทคโนโลยีการสื่อสารที่ไม่มีวันสิ้นสุดที่ส่งผลทั้งทางตรงและอ้อมกับการศึกษา ทำให้ผู้เรียนส่วนใหญ่ให้ความสนใจในการศึกษาทางด้านสาขาการสื่อสารหรือโทรคมนาคมเพิ่มมากขึ้น โดยเนื้อหาการศึกษาพบว่าหลักการและพื้นฐานของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นสิ่งสำคัญและมีความจำเป็นที่ผู้เรียนต้องมีความรู้ ความเข้าใจ ตลอดจนสามารถประยุกต์ใช้ในการพัฒนาเทคโนโลยีด้านการสื่อสารอย่างต่อเนื่องและมีประสิทธิภาพ [1]

ปัจจุบันการศึกษาในระดับปริญญาตรีทางด้านวิศวกรรมศาสตร์ในสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า อิเล็กทรอนิกส์ และโทรคมนาคม มีความจำเป็นที่ทุกมหาวิทยาลัยต้องบรรจุรายวิชาวิศวกรรมแม่เหล็กไฟฟ้า หรือรายวิชาที่มีทฤษฎีสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเข้าไปในทุกหลักสูตร เนื่องจากเป็นวิชาพื้นฐานที่มีความสำคัญและความจำเป็นกับการศึกษาในรายวิชาอื่น เช่น วิชาวิศวกรรมสายอากาศ วิชาคลื่นและการแพร่กระจายคลื่น วิชาการออกแบบวงจรความถี่สูง เป็นต้น หรือนำไปใช้ศึกษาต่อในระดับที่สูงขึ้นจากการสำรวจและศึกษาการจัดการเรียนการสอนในรายวิชาสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของ 4 มหาวิทยาลัย

ได้แก่ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตสกลนคร มหาวิทยาลัยราชธานี วิทยาเขตอุดรธานี มหาวิทยาลัยนเรศวร และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร ผู้สอนและผู้เรียนได้ให้ข้อคิดเห็นและข้อเสนอแนะที่เกี่ยวกับรายวิชาสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ดังนี้ 1) เป็นวิชาที่มีสมการยุ่งยากและซับซ้อนมากส่งผลให้ผู้เรียนขาดความเข้าใจเนื้อหาที่ลึกซึ้ง 2) เป็นวิชาที่ไม่มี การทดลอง (Laboratory) จึงทำให้การเรียนการสอนต้องใช้จินตนาการมากทำให้ผู้เรียนไม่เข้าใจหลักการอย่างแท้จริง 3) เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการเรียนการสอนมีราคาแพงมาก ขาดงบประมาณในการจัดซื้อ 4) สื่อประกอบการเรียนการสอนมีน้อย ไม่เหมาะสมและไม่หลากหลาย

สำหรับงานวิจัยทางด้านสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ได้มีนักวิจัยจำนวนหนึ่งได้ศึกษาและพัฒนางานวิจัยที่เป็นฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์เป็นจำนวนมาก [2]-[5] อย่างไรก็ตามนักวิจัยส่วนใหญ่นิยมใช้เครื่องมือสำเร็จรูปที่เป็นโปรแกรมจำลองสำหรับการใช้ในการออกแบบและวิเคราะห์วงจรความถี่สูง เช่น โปรแกรม CST โปรแกรม Microwave Studio โปรแกรม Sonnet เป็นต้น นอกจากนี้งานวิจัยที่เกี่ยวกับการวิเคราะห์สนามแม่เหล็กไฟฟ้าส่วนใหญ่ [6],[7] จะมุ่งเน้นการสร้างโปรแกรมการจำลองที่แสดงให้เห็นถึงรูปร่างและการแพร่กระจายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในลักษณะเป็นภาพ 2 มิติ ภายในชิ้นส่วนของโครงสร้างในรูปแบบต่างๆ มากมาย เพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์หรือออกแบบ และพัฒนาเครื่องมือและอุปกรณ์ที่นำไปใช้ในภาคอุตสาหกรรมเป็นส่วนใหญ่

ส่วนงานวิจัยที่เกี่ยวกับการพัฒนาเป็นสื่อการเรียนการสอนทางด้านสนามแม่เหล็กไฟฟ้า [8],[9] พบว่ามีจำนวนไม่มากนัก อาทิ เช่น งานวิจัยของสมภารถ [10] ที่พัฒนาโปรแกรมจำลองสำหรับวิเคราะห์วงจรไมโครสตริป ซึ่งเป็นการนำความรู้ทางด้านวิศวกรรมไปพัฒนาเป็นสื่อการเรียนหรือนวัตกรรมที่นำไปใช้กับการเรียนการสอน และงานวิจัยของศรัณย์ [11] ที่พัฒนาโปรแกรมจำลองสำหรับวิเคราะห์วงจรรองความถี่ภายในท่อนำคลื่น

ที่มุ่งเน้นให้ผู้เรียนได้เห็นภาพหรือปรากฏการณ์ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในวัตถุหรือวงจรที่มีโครงสร้างที่แตกต่างกันดังกล่าวข้างต้น

บทความวิจัยนี้ ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการพัฒนาโปรแกรมจำลองการแพร่กระจายคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในโพรงตัวนำเพื่อเป็นสื่อประกอบการเรียนการสอนในรายวิชาสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและวิชาอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง ซึ่งเป็นการพัฒนารูปแบบการจำลองโดยอาศัยวิธีของโมเมนต์ (Method of Moments) [12],[13] เพื่อแสดงให้เห็นรูปร่างของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ปรากฏในบริเวณพื้นที่รอบๆ และบนแผ่นตัวนำที่ทำงานภายใต้ฟังก์ชันการเชื่อมโยงกับผู้ใช้ทางกราฟิก (GUI) ของโปรแกรม MATLAB® โดยที่โปรแกรมจำลองการแพร่กระจายคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นนี้เป็นการวิจัยเกี่ยวกับวิศวกรรมศึกษาซึ่งต้องให้ผู้เชี่ยวชาญประเมินและนำไปทดลองใช้กับกลุ่มตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์หาคุณภาพและความเหมาะสมในการใช้งานของโปรแกรมจำลองที่ใช้เป็นแนวทางการพัฒนาในลำดับต่อไป

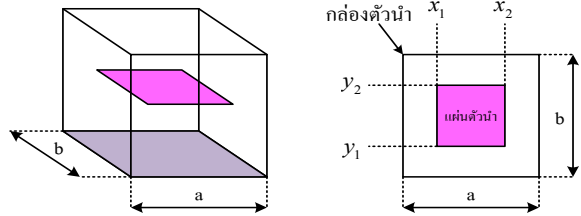
## 2. วิธีการของโมเมนต์ (Method of Moments)

งานวิจัยครั้งนี้ใช้วิธีของโมเมนต์ (Method of Moments) [12] เพื่อวิเคราะห์คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่กระจายในโพรงตัวนำ โดยพิจารณาจำนวนองค์ประกอบความถี่ของคลื่นในโหมดของ  $TE$  และ  $TM$  ที่ทำงานในโดเมนทางสเปกตรัม (Spectral Domain) และแพร่กระจายอยู่ภายในโพรงตัวนำ โครงสร้างของแผ่นตัวนำดังแสดงในรูปที่ 1

รายละเอียดของการวิเคราะห์คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าโดยใช้วิธีของโมเมนต์ (Method of Moments) มีดังนี้

### 1) กำหนดโครงสร้างโพรงตัวนำ

โครงสร้างโพรงตัวนำมีขนาดกว้าง (a) และยาว (b) มีแผ่นตัวนำที่วางภายในกล่องตามพิกัดของแกน x และ y สำหรับการคำนวณหาค่าสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กบนแผ่นตัวนำและพื้นที่ไดอิเล็กตริกที่อยู่รอบๆ แผ่นตัวนำที่มีองค์ประกอบของโหมด  $TE$  และโหมด  $TM$  ที่มีลำดับของโหมดเป็น p, k โดยที่ p, k มีค่าตั้งแต่ 0, 1, 2, ..., ∞



รูปที่ 1 แผ่นตัวนำในโพรงตัวนำ

### 2) วิเคราะห์คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

การวิเคราะห์คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมด  $TE$  และโหมด  $TM$  เพื่อหาค่าสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่ปรากฏในระนาบของแผ่นตัวนำที่วางภายในโพรงตัวนำตามพิกัด x และ y ที่แผ่นตัวนำถูกล้อมรอบด้วยอากาศว่างที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเท่ากับ 1 สำหรับการวิเคราะห์หาค่าของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า จำเป็นต้องวิเคราะห์เป็น 2 กรณี ดังนี้

#### • กรณีพื้นที่แผ่นตัวนำ

สมการทางคณิตศาสตร์ของตัวกระทำในโหมดต่างๆ ที่เขียนในรูปของสมการทางเมตริกซ์ ที่ปรากฏบนแผ่นตัวนำ ( $H_m$ ) สามารถเขียนได้ดังนี้

$$H_m = \begin{bmatrix} \langle f_0 | H_m | f_0 \rangle & \dots & \langle f_0 | H_m | f_p \rangle \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \langle f_k | H_m | f_0 \rangle & \dots & \langle f_k | H_m | f_p \rangle \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_m & \dots & B_m \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ C_m & \dots & D_m \end{bmatrix} \quad (1)$$

สมการของตัวกระทำของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมด  $TE$  และโหมด  $TM$  บนแผ่นตัวนำเขียนได้ดังนี้

$$A_m = \frac{1}{a} \left\{ a + x_1 - x_2 + \frac{a}{\pi} \sin \left\{ (x_2 - x_1) \frac{\pi}{2a} \right\} \cos \left\{ (x_1 + x_2) \frac{\pi}{2a} \right\} \right\}$$

$$B_m = \frac{2}{b} \sin \left( \frac{b(x_2 - x_1)}{2} \right) \cos \left( \frac{b(x_2 + x_1)}{2} \right)$$

$$C_m = \frac{2}{a} \sin \left( \frac{a(x_2 - x_1)}{2} \right) \cos \left( \frac{a(x_2 + x_1)}{2} \right)$$

$$D_m = \frac{1}{a} \left\{ a + x_1 - x_2 + \frac{a}{p\pi} \sin \left\{ (x_2 - x_1) \frac{p\pi}{2a} \right\} \cos \left\{ (x_1 + x_2) \frac{p\pi}{2a} \right\} \right\}$$

• กรณีในพื้นที่ไดโวลีเกกตริก

สมการทางคณิตศาสตร์ของตัวกระทำในโหมดต่างๆ ที่เขียนในรูปของสมการทางเมตริกซ์ ที่ปรากฏในพื้นที่ของไดโวลีเกกตริก ( $H_d$ ) สามารถเขียนได้ดังนี้

$$H_d = \begin{bmatrix} \langle f_o|H_d|f_o \rangle & \dots & \langle f_o|H_d|f_p \rangle \\ \dots & \dots & \dots \\ \langle f_k|H_d|f_o \rangle & \dots & \langle f_k|H_d|f_p \rangle \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_d & \dots & B_d \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ C_d & \dots & D_d \end{bmatrix} \quad (2)$$

สมการของตัวกระทำของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ในโหมด TE และโหมด TM ในพื้นที่ของไดโวลีเกกตริก เขียนได้ดังนี้

$$A_d = \frac{1}{a} \left\{ x_2 - x_1 - \frac{a}{\pi} \sin \left\{ (x_2 - x_1) \frac{\pi}{2a} \right\} \cos \left\{ (x_1 + x_2) \frac{\pi}{2a} \right\} \right\}$$

$$B_d = \frac{2}{b} \sin \left( \frac{b(x_2 - x_1)}{2} \right) \cos \left( \frac{b(x_2 + x_1)}{2} \right)$$

$$C_d = \frac{2}{a} \sin \left( \frac{a(x_2 - x_1)}{2} \right) \cos \left( \frac{a(x_2 + x_1)}{2} \right)$$

$$D_d = \frac{1}{a} \left\{ x_2 - x_1 - \frac{a}{p\pi} \sin \left\{ (x_2 - x_1) \frac{p\pi}{2a} \right\} \cos \left\{ (x_1 + x_2) \frac{p\pi}{2a} \right\} \right\}$$

เมื่อเครื่องหมาย  $\langle \rangle$  แสดงฟังก์ชันทางเวกเตอร์  $f_n$  แสดงสมการของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าตามขวาง ที่  $n$  แทนตัวแปรลำดับของโหมดต่างๆ ที่ใช้ในการคำนวณ

3) กำหนดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าตามขวาง

สนามแม่เหล็กไฟฟ้าตามขวางที่เคลื่อนที่ภายในโพรงตัวนำ สามารถเขียนเป็นสมการพื้นฐานในโหมด TE และโหมด TM ที่มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1 สนามไฟฟ้าในโหมด TE มีสมการดังนี้

$$E_x^{TE} = \frac{n}{b \sqrt{\frac{n^2}{b^2} + \frac{m^2}{a^2}}} \sqrt{\frac{2\tau_{mn}}{ab}} \cos \left( \frac{m\pi x}{a} \right) \sin \left( \frac{n\pi y}{b} \right) \quad (3)$$

$$E_y^{TE} = \frac{-m}{a \sqrt{\frac{n^2}{b^2} + \frac{m^2}{a^2}}} \sqrt{\frac{2\tau_{mn}}{ab}} \sin \left( \frac{m\pi x}{a} \right) \cos \left( \frac{n\pi y}{b} \right) \quad (4)$$

3.2 สนามไฟฟ้าในโหมด TM มีสมการดังนี้

$$E_x^{TM} = \frac{m}{a \sqrt{\frac{n^2}{b^2} + \frac{m^2}{a^2}}} \sqrt{\frac{2\tau_{mn}}{ab}} \cos \left( \frac{m\pi x}{a} \right) \sin \left( \frac{n\pi y}{b} \right) \quad (5)$$

$$E_y^{TM} = \frac{n}{a \sqrt{\frac{n^2}{b^2} + \frac{m^2}{a^2}}} \sqrt{\frac{2\tau_{mn}}{ab}} \sin \left( \frac{m\pi x}{a} \right) \cos \left( \frac{n\pi y}{b} \right) \quad (6)$$

โดยที่  $\tau_{mn} = 2$  ถ้า  $m$  และ  $n$  ไม่เท่ากับศูนย์

$\tau_{mn} = 1$  ถ้า  $m$  หรือ  $n$  เท่ากับศูนย์

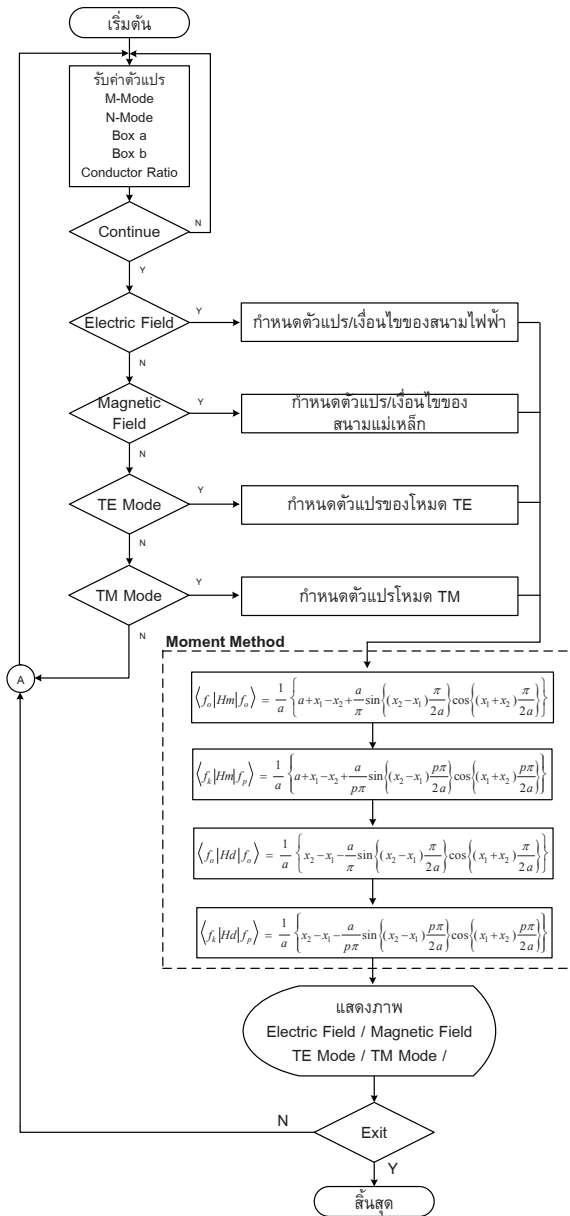
เมื่อ  $m = p$  และ  $n = k$  เป็นตัวเลขลำดับโหมด

จากสมการข้างต้นสามารถคำนวณหาค่าของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในรูปแบบของโหมด TE และโหมด TM ที่ลำดับต่างๆ ในโดเมนทางสเปกตรัม จากนั้นดำเนินการแปลงสภาพโดยการใช้อนุกรมอินทิกรัลทางเวกเตอร์ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีจำนวนโหมดต่างๆ ตามที่กำหนดให้เป็นสมการของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ปรากฏในระนาบของแผ่นตัวนำเพื่อให้เห็นปรากฏการณ์ของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจริงบนแผ่นตัวนำที่ต้องการได้

3. การพัฒนาโปรแกรมจำลอง

การพัฒนาโปรแกรมจำลองการแพร่กระจายคลื่นในโพรงตัวนำ สามารถเรียกโปรแกรมจำลองนี้ว่า EWP2013 (Electromagnetic Wave Propagation 2013) ที่มีลักษณะเป็นหน้าต่างเมนูให้ผู้ใช้เลือกหรือป้อนค่าตัวแปรลงในช่องว่างที่กำหนดให้ ตลอดจนมีเมนูให้ผู้ใช้เลือกรูปแบบของการแสดงผลตามที่ต้องการ ซึ่งโปรแกรมจำลองนี้ทำงานภายใต้ฟังก์ชัน GUI (Graphic User Interface) ของโปรแกรม MATLAB® เพื่อเป็นส่วนในการติดต่อระหว่างผู้ใช้งานและส่วนของการคำนวณ โดยขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมจำลองแสดงตามไดอะแกรม แสดงดังรูปที่ 2

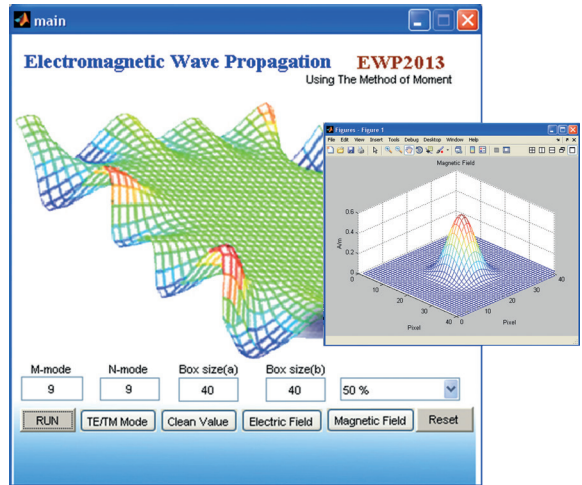
จากรูปที่ 2 เป็นแผนผัง (Flowchart) การทำงานของโปรแกรมจำลองการแพร่กระจายคลื่นในโพรงตัวนำ (EWP) โดยเริ่มจากโปรแกรมรับข้อมูลหรือพารามิเตอร์



รูปที่ 2 ไตอะแกรมการทำงานของโปรแกรมจำลอง

จากผู้ใช้ได้แก่ M-Mode, N-Mode, Box Size(a), Box Size(b) และ Conductor Ratio ที่มีรายละเอียดดังนี้

ก) M-Mode, N-Mode หมายถึงจำนวนโหมดของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าทั้งหมดที่ใช้ในการคำนวณโดยใช้วิธีของโมเมนต์ เช่น M-Mode เท่ากับ 5, N-Mode เท่ากับ 5



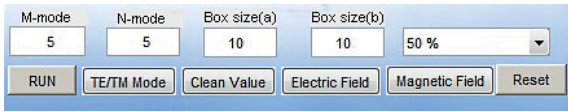
รูปที่ 3 เมนูหลักและหน้าต่างการป้อนข้อมูล

เป็นต้น จะมีจำนวนโหมดทั้งหมด  $5 \times 5 = 25$  โหมด กรณีจำนวนโหมดน้อยๆ ผลที่ได้มีค่าผิดพลาดสูง ถ้าใช้จำนวนโหมดมากๆ จะให้ค่าที่แม่นยำมากขึ้นแต่เวลาการประมวลผลจะช้าลง

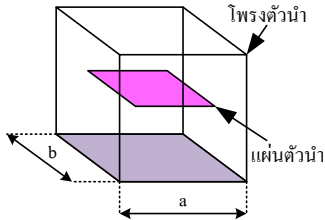
ข) Box Size(a), Box Size(b) หมายถึงขนาดของโพรงตัวนำซึ่งมีลักษณะเป็นกล่องสี่เหลี่ยมจัตุรัส หรือผืนผ้ามีหน่วยเป็นมิลลิเมตร

ค) Conductor Ratio เป็นอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ของแผ่นกับขนาดของโพรงตัวนำ เช่น 50% หมายถึงพื้นที่ของแผ่นตัวนำเป็นครึ่งหนึ่งของโพรงตัวนำ หรือ 30% หมายถึงพื้นที่ของแผ่นตัวนำเป็น 30% ของโพรงตัวนำ เป็นต้น

หลังจากที่ป้อนค่าพารามิเตอร์แล้วผู้ใช้งานรูปแบบการคำนวณที่มี 4 ตัวเลือก ได้แก่ Electric Field, Magnetic Field, TE Mode, TM Mode, โดย Electric Field และ Magnetic Field จะแสดงลักษณะของรูปร่างสนามไฟฟ้า (Electric Field) หรือสนามแม่เหล็ก (Magnetic Field) บนพื้นที่แผ่นตัวนำ สำหรับ TE Mode และ TM Mode เป็นคลื่นโหมด TE และโหมด TM ที่แสดงค่าของขนาดของคลื่นในที่ปรากฏในระนาบของแผ่นตัวนำในรูปของ 2.5 มิติ



รูปที่ 4 หน้าต่างการป้อนข้อมูลและเมนูหลัก



รูปที่ 5 แผ่นตัวนำในโพรงตัวนำ

#### 4. ผลการวิจัย

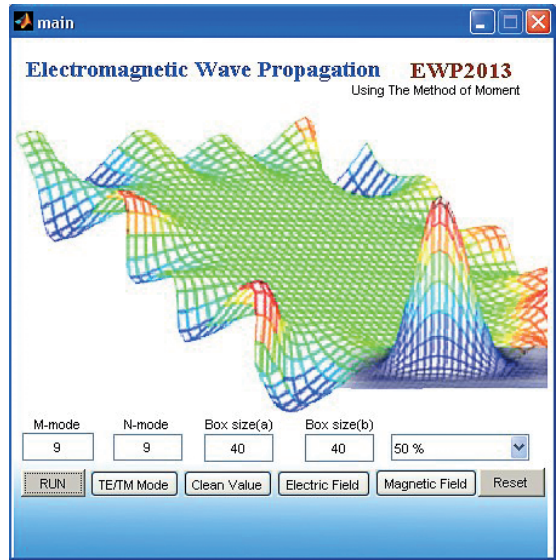
การดำเนินงานวิจัยในการพัฒนาโปรแกรมจำลองการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในโพรงตัวนำมีผลการวิจัยแบ่งเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ผลของโปรแกรมจำลอง EWP2013 และผลของการประเมินคุณภาพและการใช้งานโปรแกรมจำลอง โดยมีรายละเอียด ดังนี้

##### 4.1 ผลของโปรแกรมจำลอง EWP 2013

การพัฒนาโปรแกรมจำลองการแพร่กระจายคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในโพรงตัวนำซึ่งพัฒนาโดยใช้โปรแกรม MATLAB® นี้มีหน้าต่างสำหรับใช้งาน 3 ส่วนหลักๆ ดังนี้

1) ส่วนอินพุต (Input) เพื่อให้ผู้ใช้ใส่ข้อมูลหรือพารามิเตอร์แสดงดังรูปที่ 4 ให้กับโปรแกรมจำลองซึ่งผู้ใช้จะต้องป้อนข้อมูลของจำนวนโหมดที่ใช้คำนวณ (M-Mode, N-Mode) ขนาดของโพรงตัวนำ (Box Size : a, Box Size : b) และขนาดของแผ่นตัวนำ (Conductor Ratio) แสดงดังรูปที่ 5

2) ส่วนของการคำนวณ (Run) เป็นการกำหนดให้โปรแกรมคำนวณและวิเคราะห์การแพร่กระจายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าภายในโพรงตัวนำโดยใช้วิธีของโมเมนต์ (Method of Moments) ร่วมกับทฤษฎีของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ด้วยสมการอินทิกรัลที่สามารถหาค่าขนาดของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในระนาบของแผ่น



รูปที่ 6 โปรแกรมจำลอง EWP 2013

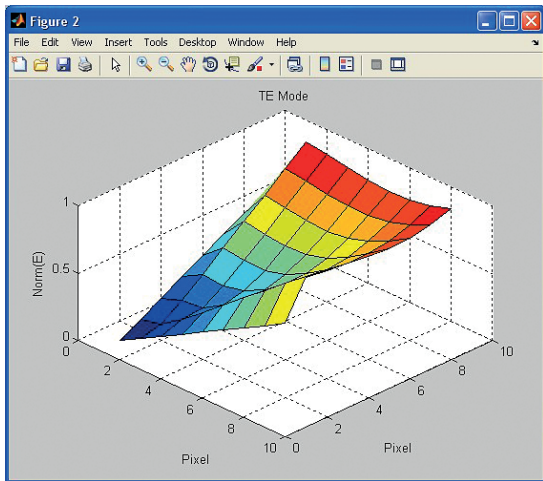
ตัวนำที่มีองค์ประกอบของโหมด  $TE$  และโหมด  $TM$  ภายในโพรงตัวนำ ตลอดจนผู้ใช้สามารถเห็นลักษณะรูปร่างของสนามไฟฟ้าที่แพร่กระจายและปรากฏในระนาบของแผ่นตัวนำได้ หน้าต่างของโปรแกรมจำลอง EWP 2013 ที่พัฒนาขึ้นแสดงดังรูปที่ 6

3) ส่วนของเมนูแสดงผล (Display) เพื่อเลือกรูปแบบของการคำนวณและการแสดงผลที่มีรูปแบบ 2 ลักษณะ ได้แก่ กราฟแท่ง และรูปร่างของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบ่งออกเป็น 4 เมนู ได้แก่ TE/TM Mode, Clean Value, Electric Field และ Magnetic Field

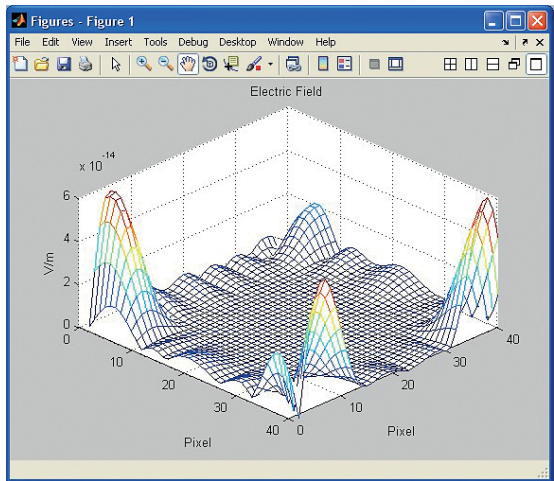
- กรณีเลือกเมนู TE/TM Mode โปรแกรมจำลองจะแสดงภาพกราฟแท่งของขนาดคลื่นในโหมด  $TE$  และ  $TM$  ที่มีค่าเท่ากับจำนวนของโหมดที่ผู้ใช้เลือกสำหรับการวิเคราะห์ข้อมูล ผลของค่าที่ได้รับแสดงดังรูปที่ 7

- กรณีเลือกเมนู Electric Filed โปรแกรมจำลองจะคำนวณโดยใช้หลักการของโมเมนต์ (Moments Theory) ในการแสดงภาพแบบ 2.5 มิติ เพื่อให้เห็นขนาดและรูปร่างของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นรอบๆ แผ่นตัวนำแสดงดังรูปที่ 8

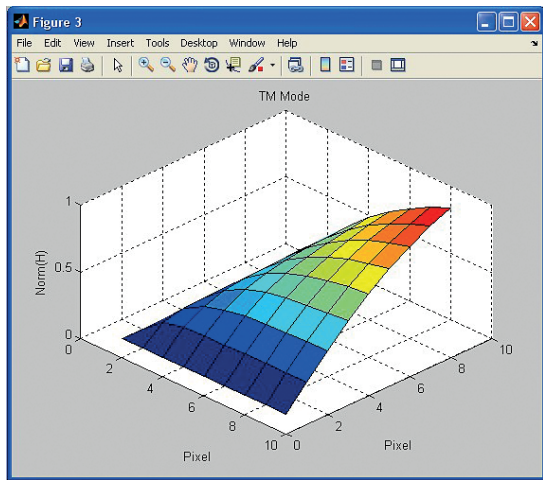
- กรณีเลือกเมนู Magnetic Filed โปรแกรมจำลองจะคำนวณโดยใช้ทฤษฎีของโมเมนต์ (Moment Theory)



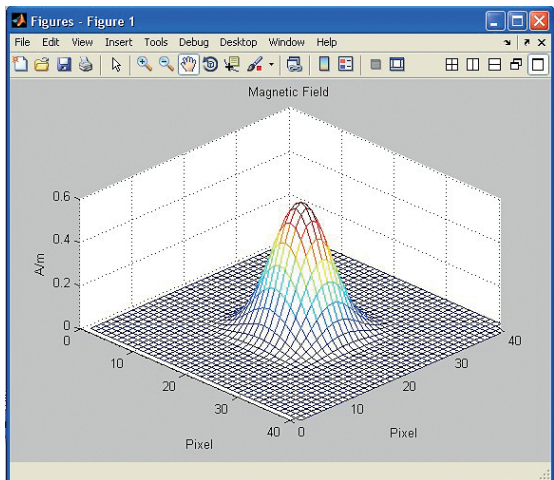
(ก) คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมด TE



รูปที่ 8 รูปร่างของสนามไฟฟ้าที่จำนวน 81 โมด



(ข) คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมด TM



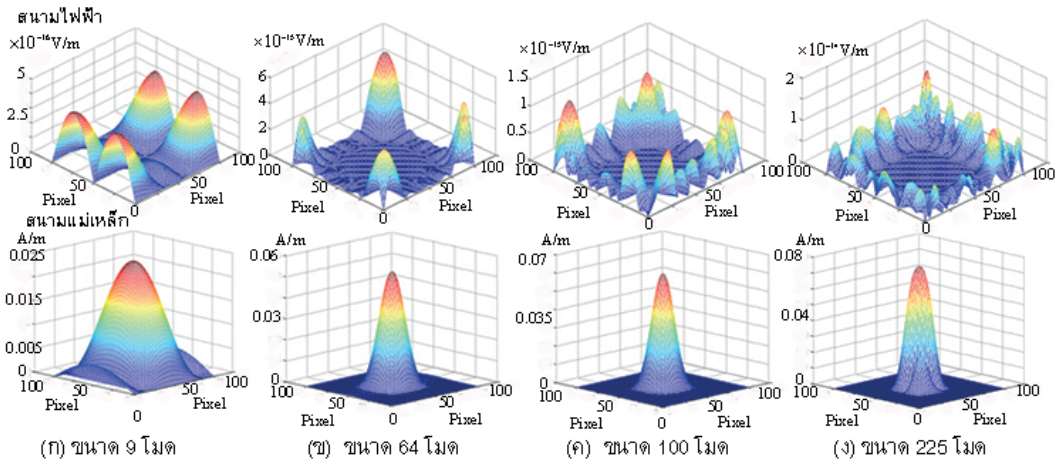
รูปที่ 9 รูปร่างของสนามแม่เหล็กที่จำนวน 81 โมด

รูปที่ 7 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมด TE/TM ที่จำนวน 81 โมด

ในการแสดงภาพแบบ 2.5 มิติ เพื่อให้เห็นขนาดและรูปร่างของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นบนแผ่นตัวนำแสดงดังรูปที่ 9 รูปที่ 10 แสดงรูปร่างของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้น ในกรณีที่มีการกำหนดจำนวนโมดต่ำๆ เช่น M-Mode และ N-Mode มีค่าเท่ากับ 3 (จำนวน  $3 \times 3$  โมด เท่ากับ 9 โมด) สนามไฟฟ้าจะเกิดขึ้นในบริเวณพื้นที่รอบๆ แผ่นตัวนำโดยมีการเปลี่ยนแปลงของรูปร่างสนามไฟฟ้าตามค่าของความยาวคลื่น ในทำนอง

เดียวกัน ค่าความหนาแน่นของสนามแม่เหล็ก จะเกิดขึ้นบนพื้นที่ของแผ่นตัวนำ และมีค่าสูงสุดที่ส่วนกลางของแผ่นตัวนำและมีค่าค่อยๆ ลดลงที่ขอบของแผ่นตัวนำ สำหรับกรณีที่กำหนดจำนวนของ M-Mode และ N-Mode ให้มีจำนวนที่เพิ่มขึ้น เท่ากับ 15 (จำนวน  $15 \times 15$  โมด เท่ากับ 225 โมด) จะพบว่าสนามไฟฟ้าจะเกิดขึ้นที่รอบๆ ของแผ่นตัวนำและมีการเปลี่ยนแปลงของสนามที่มากขึ้นที่สอดคล้องกับค่าความยาวคลื่นที่ความถี่สูงๆ (โมดในลำดับสูงๆ) นั่นเอง





รูปที่ 10 สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่มีจำนวนโมดขนาดต่างๆ

การพิจารณาจำนวนโมดในการคำนวณ พบว่าถ้าใช้จำนวนโมดที่น้อยการวิเคราะห์การแพร่กระจายของคลื่นในระนาบของแผ่นตัวนำจะให้ผลของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ปรากฏไม่ถูกต้องเนื่องจากการคำนวณไม่ได้นำเอาคลื่นที่โมดสูงๆ มาพิจารณาหรืออาจกล่าวได้ว่าผลที่ได้รับเป็นค่าของการประมาณเท่านั้น ดังนั้นถ้าต้องการความถูกต้องของผลลัพธ์จำเป็นต้องกำหนดจำนวนโมดของการคำนวณที่มีค่าที่เหมาะสม (ปกติจำนวนโมดที่เกิดขึ้นทั้งหมดภายในโพรงตัวนำมีค่าอินฟินิตี้) การเปรียบเทียบจำนวนโมดต่างๆ แสดงดังรูปที่ 10 สรุปได้ว่าโปรแกรมจำลองการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในโพรงตัวนำให้ผลการวิเคราะห์ที่สอดคล้องกับทฤษฎีของคลื่นที่สามารถประยุกต์ใช้กับงานวิจัยและการเรียนการสอนได้เป็นอย่างดี

#### 4.2 ผลการประเมินคุณภาพและการใช้โปรแกรมจำลอง

การพัฒนาโปรแกรมจำลองการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในโพรงตัวนำได้มีการประเมิน 3 ส่วน ได้แก่ การประเมินคุณภาพโดยผู้เชี่ยวชาญ และการประเมินการใช้งานโดยกลุ่มตัวอย่างเพื่อวัดความพึงพอใจที่มีต่อโปรแกรมจำลอง

สำหรับการประเมินคุณภาพโดยผู้เชี่ยวชาญ



รูปที่ 11 การประเมินคุณภาพของโปรแกรมจำลอง

แสดงดังรูปที่ 11 โดยนำโปรแกรมจำลองไปให้ผู้ที่มีประสบการณ์ในการสอนรายวิชาสนามแม่เหล็กไฟฟ้าหรือรายวิชาที่เกี่ยวข้อง จำนวน 10 ท่าน เพื่อทำการประเมินความเหมาะสม ซึ่งผลที่ได้แสดงรายละเอียดในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ผลการประเมินโปรแกรมจำลองโดยผู้เชี่ยวชาญ

หัวข้อประเมิน	ค่าเฉลี่ย	S.D.	ความเหมาะสม
1. เหมาะสมกับระดับของผู้เรียน	4.38	0.70	มาก
2. ก่อให้เกิดแรงจูงใจในการเรียน	4.63	0.99	มากที่สุด
3. สะดวกและง่ายต่อการใช้งาน	4.00	1.00	มาก
4. สอดคล้องกับเนื้อหา	4.25	1.09	มาก
5. ส่งเสริมให้เกิดการเรียนรู้ได้ดี	4.38	0.70	มาก
ค่าเฉลี่ย	4.32	0.89	มาก



รูปที่ 12 การประเมินการใช้งานของโปรแกรมจำลอง

ผลการประเมินเพื่อหาคุณภาพของโปรแกรมจำลองที่พัฒนาขึ้นโดยผู้เชี่ยวชาญ 10 ท่าน พบว่าผู้เชี่ยวชาญมีความคิดเห็นว่าโปรแกรมจำลองดังกล่าวก่อให้เกิดแรงจูงใจการเรียนรู้ในระดับมีความเหมาะสมมากที่สุด (ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.63, S.D. เท่ากับ 0.99) และในด้านความสะดวกและง่ายต่อการใช้งานมีความเหมาะสมน้อยที่สุด (ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.00, S.D. เท่ากับ 1.00) จากจำนวนข้อคำถาม 5 ข้อ สำหรับผลการประเมินมีค่าเฉลี่ยรวมทั้งหมดเท่ากับ 4.32 ที่ค่า S.D.=0.89 ซึ่งหมายความว่าโปรแกรมจำลองที่พัฒนาขึ้นนี้มีความเหมาะสมในการใช้งานในระดับมากที่สามารถนำไปใช้ประกอบการเรียนการสอนในรายวิชาสนามแม่เหล็กไฟฟ้าหรือวิชาที่เกี่ยวข้องได้อย่างมีประสิทธิภาพ

การประเมินการใช้งานโดยกลุ่มตัวอย่าง แสดงดังรูปที่ 12 ที่เป็นนักศึกษาระดับปริญญาตรีสาขาวิศวกรรมไฟฟ้าแขนงอิเล็กทรอนิกส์ ชั้นปีที่ 3 ที่ศึกษาในรายวิชาสนามแม่เหล็กไฟฟ้า มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี จำนวน 21 คน ซึ่งผลที่ได้แสดงรายละเอียดในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลการประเมินโปรแกรมจำลองโดยนักศึกษา

หัวข้อประเมิน	ค่าเฉลี่ย	S.D.	ความพึงพอใจ
1. ส่งเสริมให้เกิดการจินตนาการ	4.11	0.34	มาก
2. ก่อให้เกิดแรงจูงใจในการเรียน	4.52	0.45	มากที่สุด
3. สะดวกและง่ายต่อการใช้งาน	4.50	0.67	มาก
4. สอดคล้องและเหมาะสมกับเนื้อหา	4.34	0.55	มาก
5. ผู้เรียนมีส่วนร่วมในการสอน	4.21	0.78	มาก
ค่าเฉลี่ย	4.33	0.55	มาก

ผลการประเมินการใช้งานของโปรแกรมจำลองที่พัฒนาขึ้นโดยกลุ่มตัวอย่างจำนวน 21 คน มีความคิดเห็นว่าโปรแกรมจำลองดังกล่าวก่อให้เกิดแรงจูงใจการเรียนรู้ในระดับมีความเหมาะสมมากที่สุด (ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.52, S.D. เท่ากับ 0.45) และในด้านการส่งเสริมให้ผู้เรียนเกิดการจินตนาการมีความเหมาะสมน้อยที่สุด (ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.11, S.D. เท่ากับ 0.34) จากจำนวนข้อคำถาม 5 ข้อ และผลการประเมินความพึงพอใจโดยค่าเฉลี่ยรวมทั้งหมดมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.33 ที่ค่า S.D.=0.55 ซึ่งหมายความว่านักศึกษามีความพึงพอใจต่อโปรแกรมจำลองที่พัฒนาขึ้นอยู่ในระดับมาก ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าโปรแกรมจำลองการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นมีคุณภาพและความเหมาะสมที่สามารถนำไปใช้ประกอบการเรียนการสอนได้อย่างมีประสิทธิภาพ

## 5. สรุป

บทความวิจัยนี้เป็นการนำเสนอโปรแกรมจำลองการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในโพรงตัวนำที่เรียกว่า EWP 2013 (Electromagnetic Wave Propagation 2013) ที่พัฒนาขึ้นภายใต้ฟังก์ชัน GUI ของโปรแกรม MATLAB® โดยโปรแกรมจำลองดังกล่าวสามารถวิเคราะห์และคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่างๆ โดยใช้วิธีการของโมเมนต์ร่วมกับทฤษฎีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งให้ผลลัพธ์ในการแสดงรูปร่างของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความสอดคล้องกับหลักการของการแพร่กระจายคลื่น และสามารถประยุกต์ใช้เป็นสื่อการสอนที่อธิบายปรากฏการณ์ของการแพร่กระจายคลื่นในรายวิชาสนามแม่เหล็กไฟฟ้าหรือหัวข้อที่เกี่ยวกับการแพร่กระจายคลื่นได้ ทั้งนี้จากการประเมินคุณภาพของโปรแกรมจำลองโดยผู้เชี่ยวชาญ พบว่าระดับความเหมาะสมมีค่าเฉลี่ยอยู่ในระดับมาก และประเมินการใช้งานโดยนักศึกษาที่ศึกษาในรายวิชาสนามแม่เหล็กไฟฟ้า พบว่าระดับความพึงพอใจมีค่าเฉลี่ยอยู่ในระดับมากเช่นกัน ดังนั้นสรุปได้ว่าโปรแกรมจำลองที่พัฒนาขึ้นมีคุณภาพที่สามารถนำไปใช้ประกอบการเรียนการสอนได้อย่างมีประสิทธิภาพและสามารถใช้ในการศึกษา



วิเคราะห์ และออกแบบวงจรสื่อสารสมัยใหม่ในโอกาสต่อไป

### เอกสารอ้างอิง

- [1] Sommart Khamkleang, Somsak Akatimagool and Mongkol Wangsatidwong, "Development of Student Centered Learning on Microwave Planar Analysis and Design," in *Kasetsart Academic Conference*, no. 47, 2008, pp. 109-116.
- [2] J.W. Bandler, A.S. Mohamed, M.H. Bakr, "TLM-Based Modeling and Design Exploiting Space Mapping," *Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on*, vol. 53, September 2005.
- [3] S. Akatimagool, D. Bajon, and H. Baudrand, "Analysis of multi-layer integrated inductors with wave concept iterative procedure (WCIP)," in *Microwave Symposium Digest, 2001 IEEE MTT-S International*, 2001, vol.3, pp. 1941-1944.
- [4] Seunghyun Song, Hyeong-Seok Kim, Hyun-Kyo Jung, J. Braunstein, Un-Chul Moon, "Frequency Domain Analysis of Microstrip Filters and Antennae using an Adaptive Frequency Sampling Moment Method," *Magnetic IEEE Transactions on*, vol. 42, pp.607-610, April 2006.
- [5] Scott W. Wedge and David B. Rutledge, "Wave Computation for Microwave Education," *IEEE Transaction on Education*, vol.36, no.1, February 1993.
- [6] Z. Stanimirovic, M. Jevtic, and I. Stanimirovic, "Computer Simulation of Thick-Film Resistors Based on 3D Planar RRN Model, Computer as a Tool," in *Inter-national Conference, EUROCON 2005*, vol. 2, 2005.
- [7] Z. Yanjun, C. Aixin, C. Shunfeng, and S. Donglin, "Design of a Circularly Polarized 8×8 Patch Antenna Array Using a New Series-Parallel Feed," *Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technology for Wireless Communications, 3<sup>rd</sup> IEEE International Symposium*, 2009, pp. 411-414.
- [8] Sommart Khamkleang and Somsak Akatimagool, "Microwave Education Supported by Electromagnetic Simulation Tool Using Wave Iterative Method (WIM)," *ECTI2008*, Krabi, Thailand, 2008.
- [9] Sommart Khamkleang and Somsak Akatimagool, "Planar Source Characteristics Analysis for Wave Iterative Method Simulation," *ECTI2007*, Chaing Rai, Thailand, 2007.
- [10] Sommart Khamkleang and Somsak Akatimagool, "Microwave Planar Circuit Design Tool in the Teaching of Microwave Engineering," *ECTI2009*, Pattaya, Thailand, 2009.
- [11] Sarun Chookadee, Somsak Akatimagool, "Development of Simulated Program for Study and Analysis of Wave Guided Filter using Wave Iterative Method," *The Journal of KMUTNB.*, vol.22, no.3, pp. 560-571, September-December 2012.
- [12] Somsak Akatimagool, *Microwave Circuit Analysis and Design*, Bangkok, 2008.
- [13] David M. Pozar, *Microwave Engineering*, 3<sup>rd</sup> Edition, the United States of America: A John Wiley & Sons, Inc., 2005.