# การวิเคราะห์การแผ่พลังงานจากแหล่งกำเนิดบนวัสดุพื้นผิวอิมพีแดนซ์โค้งทรงกระบอกโลหะสำหรับระบบอาร์เอฟไอดีย่านความถี่ยูเอชเอฟ

# Radiation Analysis from Sources on Cylindrical Curved Impedance Surface for UHF RFID Systems

พิชชานันท์ วงศ์ศิริธร[1] ชูวงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์[1] กิตติศักดิ์ แพบัว[2] ฐิติพงษ์ เลิศวิริยะประภา[2]

[1]สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

[2]ภาควิชาครุศาสตร์ไฟฟ้า คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

**บทคัดย่อ**

บทความวิจัยนี้นำเสนอการวิเคราะห์แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นโดยใช้ฟังก์ชันไอเกนของแหล่งกำเนิดบนพื้นผิวโค้ง ทรงกระบอกโลหะที่เคลือบด้วยชั้นวัสดุไดอิเล็กตริก ผลการวิเคราะห์จะถูกนำมาประยุกต์ใช้งานกับระบบอาร์เอฟไอดี ในกรณีที่แท็กถูกนำไปติดกับโครงสร้างทรงกระบอกโลหะที่เคลือบด้วยชั้นไดอิเล็กตริกเช่นถังแก๊ส หรือถังน้ำมัน สายอากาศแท็กที่นำเสนอมีขนาดเล็กและสร้างง่ายและสามารถใช้งานได้ตามมาตรฐานภายในประเทศ (920-925 MHz) สายอากาศที่นำเสนอเหมาะสำหรับนำไปประยุกต์ใช้งานจริงในการลงทะเบียนในภาคอุตสาหกรรม

**คำสำคัญ** : พื้นผิวโค้ง พื้นผิวอิมพีแดนซ์ แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ระบุลักษณะทางคลื่นความถี่วิทยุ สายอากาศแท็ก

**Abstract**

Radiation pattern analysis using eigen function of source located on cylindrical curved surface coated with dielectric layers is presented in this paper. The analysis results will be used for UHF RFID applications in case of the tag is affixed on cylindrical curved structure with the coated dielectric layer such as gas tank or oil tanks. The proposed tag antenna is relatively small with easy fabrication and can be used for Thailand standard (920-925 MHz). The proposed antenna is suitable for the actual identification of industrial applications.

**Keywords:** Curve Surface, Impedance Surface, Radiation Pattern, RFID, Tag Antenna

## 1. บทนำ

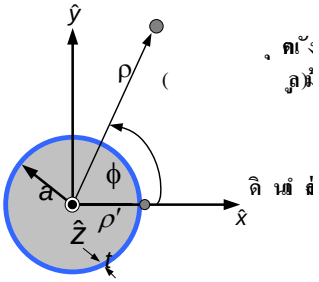
ระบบบอาร์เอฟไอดีหรือระบบระบุลักษณะทางคลื่นความถี่วิทยุ (RFID: Radio Frequency Identification) เป็นเทคโนโลยีที่ได้รับการกล่าวถึงเป็นอย่างมากในปัจจุบัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งระบบอาร์เอฟไอดีย่านความถี่ยูเอชเอฟ (UHF RFID) เนื่องจากความสามารถในการติดต่อสื่อสารโดยไม่ต้องใช้การสัมผัส ความสะดวกในการอ่านและเขียนข้อมูลมีความรวดเร็ว ทนต่อสภาวะความเสียหายอันเนื่องมาจากการขนส่งและสิ่งสกปรกและความสามารถสื่อสารได้ในระยะไกลในทุกทิศทาง [1]-[2] ทำให้อุตสาหกรรมหลายประเภทเช่นการขนส่งสินค้า การจัดเก็บสินค้า หรือแม้กระทั่งอุตสาหกรรมการค้าปลีก ได้สนใจนำเทคโนโลยีดังกล่าวมาประยุกต์ใช้งาน

โครงสร้างพื้นฐานของเทคโนโลยีอาร์เอฟไอดีประกอบด้วย เครื่องอ่านข้อมูล(Reader) แท็ก (Tag) และอุปกรณ์ควบคุม (Controller) โดยเครื่องอ่านข้อมูลจะเชื่อมต่อกับส่วนควบคุมซึ่ง ส่วนมากจะเป็นคอมพิวเตอร์เพื่อใช้ในการอ่านและเก็บข้อมูลที่รับมาจากแท็ก โดยแท็กประกอบไปด้วยสายอากาศแท็กและชิปวงจรรวม โดยระบบอาร์เอฟไอดีย่านความถี่ยูเอชเอฟสามารถใช้หลักการคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในการรับและส่งข้อมูล โดยใช้การติดต่อสื่อสารในสนามระยะไกล ซึ่งอยู่บนพื้นฐาน การกระจัดกระจายย้อนกลับ [3]

จากความต้องการในการใช้งานระบบบอาร์เอฟไอดีมีการใช้งานที่หลากหลาย เช่นการนำไปติดกับกล่องสินค้า ตู้คอนเทนเนอร์ ลังไม้และถังแก๊สเป็นต้น [4-5] ซึ่งส่วนมากสายอากาศแท็กจะถูกสร้างโดยใช้หลักการพื้นฐานของสายอากาศไดโพล สายอากาศขดวกวน [6-7] ซึ่งทำงานเสมือนเป็นแหล่งกำเนิดไฟฟ้า [8] แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นด้านหลังของสายอากาศแท็กดังกล่าวจะถูกลดทอนเป็นอย่างมากเมื่อนำไปติดกับวัสดุโลหะพื้นผิวโค้งที่เคลือบด้วยพื้นผิวอิมพีแดนซ์ไดอิเล็กตริก เช่น ถังน้ำมันหรือถังแก๊ส ดังนั้นการทำนายสนามแพร่กระจายจากแหล่งกำเนิดบนพื้นผิวโค้งที่ประกอบไปด้วยพื้นผิวอิมพีแดนซ์ไดอิเล็กตริก [10] นั้นมีความจำเป็นอย่างมากในการออกแบบสายอากาศแท็ก นอกจากนั้นสำหรับปัญหาการจำลองเมื่อสายอากาศติดอยู่บนวัสดุที่มีขนาดใหญ่ มักจะใช้เวลาในการประมวลผลที่นานมาก ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงนำเสนอการวิเคราะห์แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นโดยใช้วิธีฟังก์ชันไอเกน จากนั้นคำนวณการแพร่กระจายจากแหล่งกำเนิด ไฟฟ้าและแม่เหล็กที่วางอยู่บนผิวตัวนำทรงกระบอกโลหะที่เคลือบด้วยอิมพีแดนซ์ไดอิเล็กตริกเพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบสายอากาศแท็กที่มีความเหมาะสมกับการใช้งานจริงต่อไป

## 2. การวิเคราะห์การแพร่กระจายคลื่นจากแหล่งกำเนิดเชิงเส้นที่วางอยู่บนพื้นผิวไดอิเล็กตริก

จากโจทย์วิจัยของสายอากาศแท็กที่ติดกับถังโลหะหรือถังน้ำมันขนาดใหญ่ ถังน้ำมันหรือถังโลหะจะพิจารณาให้เป็นวัสดุตัวนำทรงกระบอกขนาดใหญ่ที่เคลือบด้วยวัสดุไดอิเล็กตริก โดยในขั้นตอนแรกนี้จะพิจารณาในรูปแบบสองมิติ การวิเคราะห์แท็กสามารถกำหนดให้เป็นแหล่งกำเนิดเชิงเส้นยาวอนันต์ที่วางบนพื้นผิวไดอิเล็กตริก ($Z_s$) ดังแสดงในรูปที่ 1 ดังนั้นสนามรวม$\left(E_z^t\right)$เกิดจากสนามตกกระทบ$\left(E_z^i\right)$ และสนามกระจัดกระจาย$\left(E_z^s\right)$




**รูปที่ 1** แหล่งกำเนิดเชิงเส้นที่วางตัวบนพื้นผิวทรงกระบอกโลหะ

สนามกระจัดกระจายเกิดจากกระแสเหนี่ยวนำบนพื้นผิวของทรงกระบอกโลหะซึ่งประพฤติตัวเสมือนเป็นตัวแพร่กระจายคลื่นอีกตัวหนึ่ง เมื่อกำหนดให้แหล่งกำเนิดเชิงเส้นเป็นแหล่งกำเนิดไฟฟ้ามีโพลาไรซ์ของแม่เหล็กตามขวางในแนวแกน Z ($TM^z$ polarization) วางบนพื้นผิวทรงกระบอกโลหะตามแนวแกน Z สนามกระจัดกระจายจะมีเพียงองค์ประกอบในทิศ Z ($E_z$) ซึ่งจะไม่มีองค์ประกอบที่เป็นโพลาไรซ์ไขว้เกิดขึ้น ซึ่งแสดงได้ดัง

สมการที่ (1) สนามตกกระทบแสดงในสมการที่ (2) และสนามรวมแสดงในสมการที่ (3) ตามลำดับ

$$E_z^s = -\frac{\beta^2 I_e}{4\omega\varepsilon}\sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n H_n^{(2)}\left(\beta\rho\right) \quad (1)$$

$$E_z^i = -\frac{\beta^2 I_e}{4\omega\varepsilon}\sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n\left(\beta\rho\right)H_n^{(2)}\left(\beta\rho'\right)e^{jn\left(\phi-\phi'\right)} \quad (2)$$

$$E_z^t = -\frac{\beta^2 I_e}{4\omega\varepsilon}\sum_{n=-\infty}^{\infty}\left[\begin{matrix} J_n\left(\beta a\right)H_n^{(2)}\left(\beta\rho'\right)e^{jn\left(\phi-\phi'\right)} \\ +c_n H_n^{(2)}\left(\beta a\right)\end{matrix}\right] \quad (3)$$

$\rho'$ คือ ระยะจากจุดกำเนิดถึงแหล่งกำเนิดในทิศ $\hat{\rho}$ (m)

$\rho$ คือ ระยะจากจุดกำเนิดถึงจุดสังเกตในทิศ $\hat{\rho}$ ( (m)

$\phi$ คือ มุมอซิมุทของจุดสังเกต (rad)

$\phi'$ คือ มุมอซิมุทของแหล่งกำเนิด (rad)

$a$ คือ รัศมีทรงกระบอกโลหะ (m)

$\beta$ คือ ค่าคงที่เฟส (rad/m) เมื่อ $\beta^2 = \omega^2\mu\varepsilon$

$\omega$ คือ ความเร็วเชิงมุม (rad/s)

$I_e$ คือค่ากระแสไฟฟ้าคงที่ (A)

$\varepsilon$ คือค่าสภาพยอม (F/m)

$\mu$ คือค่าความซึมซาบได้ (H/m)

$J_n\left(\beta\rho\right)$ คือ ฟังชันเบสเซลชนิดที่หนึ่งอันดับที่ $n$

$H_n^{(2)}\left(\beta\rho\right)$ คือ ฟังชันแฮงเกิลชนิดที่สองอันดับที่ $n$

โดยค่าอิมพีแดนซ์พื้นผิวจะขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของสนามที่มาตกกระทบ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะมีความสัมพันธ์กับค่าอิมพีแดนซ์ของพื้นผิวที่รอยต่อนั้นๆ ซึ่งเป็นไปตามเงื่อนไขขอบเขตที่รอยต่อนั้นๆ ดังสมการ

$$\hat{n}\times\hat{n}\times\bar{E} = -Z_s\hat{n}\times\bar{H} \quad (4)$$

เมื่อ $\hat{n}$ เป็นเวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่ตั้งฉากกับพื้นผิวทรงกระบอกโลหะ สำหรับวัสดุใดๆ ที่เคลือบอยู่บนพื้นผิวตัวนำ นั้นสามารถประมาณค่าอิมพีแดนซ์ของพื้นผิว ($Z_s$)[10] ดังสมการที่ (5)

$$Z_s \approx -jZ_0\beta t\left[\frac{1-\varepsilon_r\mu_r}{\varepsilon_r}\right]\left[1+\frac{\left(\beta t\right)^2}{2}\left(1-\varepsilon_r\mu_r\right)\right]^{-1} \quad (5)$$

$Z_s$ = อิมพีแดนซ์พื้นผิว ($\Omega$)

$Z_0$ = อิมพีแดนซ์ของช่องว่างอิสระ ($\Omega$)

$t$ = ความหนาวัสดุเคลือบ (m)

$\varepsilon_r$ = ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์

$\mu_r$ = ค่าความซึมซาบได้สัมพัทธ์

$c_n$ คือค่าสัมประสิทธิ์ที่สามารถหาได้จากการประยุกต์ใช้เงื่อนไขขอบเขตดังแสดงในสมการที่ (2) เมื่อพิจารณาในระบบพิกัดทรงกระบอก โดยมีเวกเตอร์หนึ่งหน่วยตั้งฉาก ($\hat{n}$) อยู่ในแนวรัศมี กล่าวคือ $\hat{n} = \hat{\rho}$ องค์ประกอบสนามแม่เหล็กสามารถหาได้จากความสัมพันธ์ของสมการแมกซ์เวลล์ โดยองค์ประกอบสนามแม่เหล็กสามารถเขียนในรูปดังสมการที่ (6)

$$\mathrm{H}^t = -\hat{\rho}\frac{1}{j\omega\mu}\frac{1}{\rho}\frac{\partial E_z^t}{\partial\phi} + \hat{\phi}\frac{1}{j\omega\mu}\frac{\partial E_z^t}{\partial\rho} \quad (6)$$

จากสมการที่ (6) สามารถหาค่าสนามแม่เหล็กในทิศ $\hat{\phi}$ ได้ จากสนามไฟฟ้าในทิศ $\hat{z}$ โดยการแทนสมการที่ (3) ลงในสมการที่ (6) ซึ่งผลลัพธ์ดังสมการที่ (7) เมื่อ $' = \frac{\partial}{\partial\rho}$

$$\mathrm{H}_\phi^t = \frac{jI_e\beta}{4}\sum_{n=-\infty}^{\infty}\left(\begin{matrix} J_n'\left(\beta\rho\right)H_n^{(2)}\left(\beta\rho'\right)e^{jn\left(\phi-\phi'\right)} \\ +c_n H_n'^{(2)}\left(\beta\rho\right)\end{matrix}\right) \quad (7)$$

ค่าสัมประสิทธิ์ $c_n$ หาจากสมการที่ (4) $E_z\hat{z} = Z_s H_\phi\hat{z}$ ที่พื้นผิว สมการที่ (3) และสมการที่ (6) โดย มีค่าดังสมการที่ (8) ดังนั้นสามารถหาสนามรวมได้ดังสมการที่ (9) เมื่อกำหนดให้ $\eta = 1/Z_s$

$$c_n = -\frac{\left[J_n'\left(\beta a\right) - j\eta^{-1}J_n\left(\beta a\right)\right]}{\left[H_n'^{(2)}\left(\beta a\right) - j\eta^{-1}H_n^{(2)}\left(\beta a\right)\right]} \quad (8)$$

$$E_z^t = -\frac{\beta^2 I_e}{4\omega\varepsilon}\sum_{n=-\infty}^{\infty}\left[\begin{matrix} J_n\left(\beta\rho\right) \\ -\frac{\left[J_n'\left(\beta a\right) - j\eta^{-1}J_n\left(\beta a\right)\right]}{\left[H_n'^{(2)}\left(\beta a\right) - j\eta^{-1}H_n^{(2)}\left(\beta a\right)\right]} \\ \times H_n^{(2)}\left(\beta\rho\right) \\ \times H_n^{(2)}\left(\beta\rho'\right)e^{jn\left(\phi-\phi'\right)}\end{matrix}\right] \quad (9)$$

ในการพิจารณาแหล่งกำเนิดแม่เหล็กเชิงเส้นด้วยกระแสแม่เหล็ก $I_m$ เราสามารถหาค่าสนามได้จากการประยุกต์ใช้ทฤษฎีคู่ [11] จากแหล่งกำเนิดไฟฟ้า โดยสนามแม่เหล็กรวมมีค่าดังสมการที่ (10)

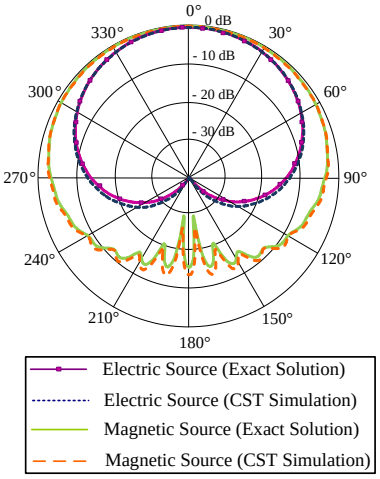
$$H_z^t = -\frac{\beta^2 I_m}{4\omega\varepsilon}\sum_{n=-\infty}^{\infty}\left[\begin{array}{l} J_n(\beta a)H_n^{(2)}(\beta\rho')e^{jn(\phi-\phi')} \\ +d_n H_n^{(2)}(\beta a)\end{array}\right] \tag{10}$$

ค่าสัมประสิทธิ์ $d_n$ สามารถหาได้โดยใช้หลักการเช่นเดียวกับการหาค่าสัมประสิทธิ์ $c_n$ โดยค่าสัมประสิทธิ์ $d_n$ จะแสดงดังสมการที่ (11) และสนามรวมจะแสดงในสมการที่ (12) โดยแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (9) และ (12) โดยพิจารณาความแม่นยำจากการเปรียบเทียบกับผลการจำลองโดยโปรแกรม CST Microwave Studio ดังแสดงในรูปที่ 2 และเวลาในการคำนวณเทียบกับการจำลองแสดงในตารางที่ 1 ตามลำดับ

$$d_n = -\frac{\left[J_n(\beta a)+j\eta^{-1}J_n'(\beta a)\right]}{\left[H_n^{(2)}(\beta a)+j\eta^{-1}H_n'^{(2)}(\beta a)\right]} \tag{11}$$

$$H_z^t = -\frac{\beta^2 I_m}{4\omega\varepsilon}\sum_{n=-\infty}^{\infty}\left[\begin{array}{l} J_n(\beta\rho') \\ -\dfrac{\left[J_n(\beta a)+j\eta^{-1}J_n'(\beta a)\right]}{\left[H_n^{(2)}(\beta a)+j\eta^{-1}H_n'^{(2)}(\beta a)\right]} \\ \times H_n^{(2)}(\beta\rho') \\ \times H_n^{(2)}(\beta\rho)e^{jn(\phi-\phi')}\end{array}\right] \tag{12}$$

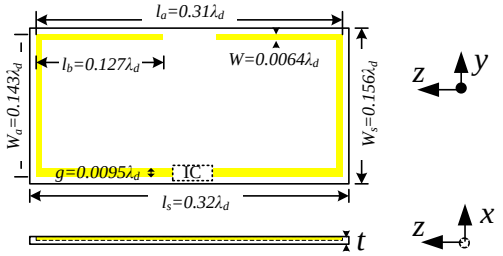
เมื่อเปรียบเทียบระหว่างแบบรูปแพร่กระจายคลื่นในระนาบ XY ($a=2\lambda, \varepsilon_r=2.1, \mu=1$) ของแหล่งกำเนิดไฟฟ้าและแม่เหล็กที่วางบนตัวนำทรงกระบอกสามารถยืนยันว่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของแหล่งกำเนิดแม่เหล็กมีการแพร่กระจายด้านหลังที่มีการถูกลดทอนน้อยกว่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้า ดังนั้นจึงสามารถนำข้อดีของการใช้แหล่งกำเนิดแม่เหล็กที่วางอยู่บนตัวนำทรงกระบอกที่เคลือบด้วยวัสดุไดอิเล็กตริกไปใช้เป็นแนวทางในการพิจารณาเอาสายอากาศไปติดกับวัสดุตัวนำทรงกระบอกขนาดใหญ่ที่เคลือบด้วยวัสดุไดอิเล็กตริกเช่นชั้นสีที่ทาลงบนตัวถัง เป็นต้น




($a=2\lambda, \varepsilon_r=2.1, \mu=1$)

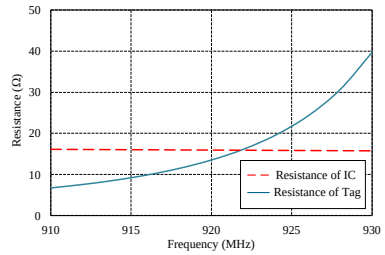
**รูปที่ 2** ผลการคำนวณเปรียบเทียบผลจากการจำลอง แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ XY ของแหล่งกำเนิดแม่เหล็กและไฟฟ้าเชิงเส้น เมื่อแหล่งกำเนิดวางตัวอยู่บนวัสดุทรงกระบอกโลหะที่เคลือบด้วยสารไดอิเล็กตริก

## 3. การออกแบบและจำลองสายอากาศแท็กชนิดช่องเปิดขนาดเล็ก

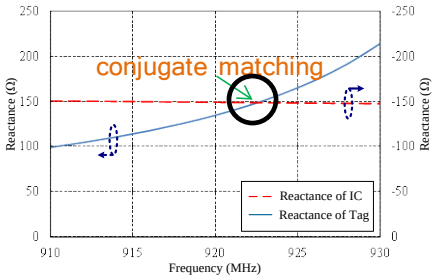



**รูปที่ 3** โครงสร้างของสายอากาศแท็กชนิดช่องเปิดขนาดเล็ก

โครงสร้างของสายอากาศที่นำเสนอคือ สายอากาศชนิดช่องเปิดเนื่องจากสายอากาศดังกล่าวสามารถที่จะสมมูลย์ให้เป็นแหล่งกำเนิดชนิดแม่เหล็ก [9] โดยการออกแบบจะมุ่งเน้นให้สายอากาศมีโครงสร้างไม่ซับซ้อนเหมาะสมกับการนำไปใช้ร่วมกับชิปวงจรรวมรุ่น NXP G2XL [12] โดยพิจารณาความถี่กลางตามมาตรฐานในประเทศ (920-925 MHz) คือ 922.5 MHz ชิปวงจรรวมจะมีอิมพีแดนซ์เท่ากับ 15.87-j148.7 โอห์ม วัสดุฐานรองที่ใช้ในการออกแบบเป็นชนิด FR-4 หนา 1.6 มิลลิเมตร

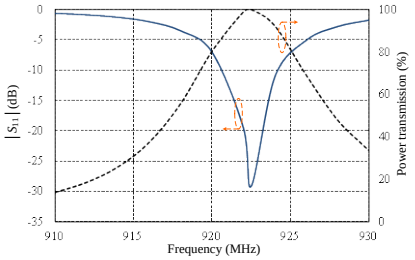



(ก) ความต้านทาน




(ข) รีแอ็กแตนซ์

**รูปที่ 4** ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแท็กชนิดช่องเปิด

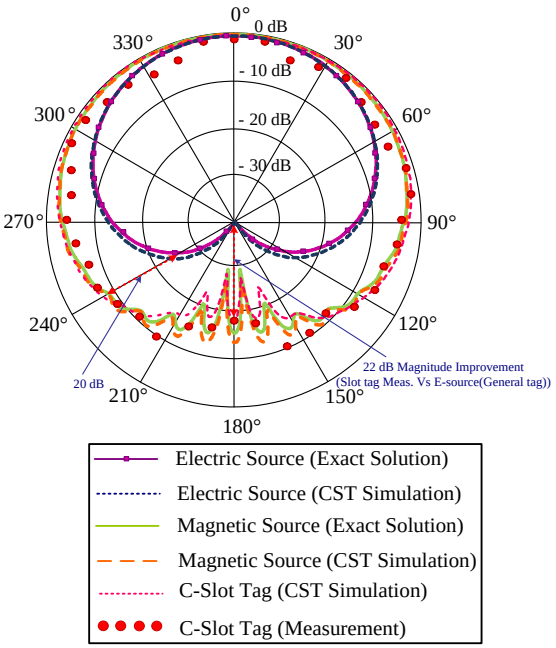



**รูปที่** 5 ค่า $|S_{11}|$ และค่าเปอร์เซ็นต์กำลังงานการส่งผ่านของสายอากาศแท็กชนิดช่องเปิดขนาดเล็ก

โครงสร้างของสายอากาศที่นำเสนอแสดงดังรูปที่ 3 มีค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้าเท่ากับ 17.01+j148.53 โอห์ม ดังแสดงในรูปที่ 4 โดยสายอากาศที่นำเสนอสามารถทำงานได้ครอบคลุมย่านความถี่ภายในประเทศเมื่อพิจารณาที่ค่ากำลังงานลดลงไม่เกินครึ่งหนึ่ง โดยมีค่าอัตราขยายสูงสุดที่ประมาณ -4 dB

## 4. ผลการจำลองและการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น สายอากาศแท็กชนิดช่องเปิดขนาดเล็กบนวัสดุตัวนำทรงกระบอกที่หุ้มด้วยวัสดุไดอิเล็กตริก

สายอากาศแท็กชนิดช่องเปิดขนาดเล็กที่ได้ทำการออกแบบร่วมกับตัวนำทรงกระบอกขนาดใหญ่ รัศมี $1\lambda$ ที่เคลือบด้วยเทฟลอน (Teflon) ($\varepsilon_r = 2.1, \mu_r = 1$) หนา $0.02\lambda$ จำลองด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio และนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลการคำนวณที่ได้จากวิธีฟังก์ชันไอเกนในรูปที่ 6 เพื่อยืนยันว่าสายอากาศแท็กชนิดช่องเปิดขนาดเล็กที่ออกแบบมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นทางด้านหลังที่ไม่ถูกลดทอนจากการนำไปติดบนวัสดุทรงกระบอกตัวนำขนาดใหญ่ที่หุ้มด้วยวัสดุไดอิเล็กตริก โดยแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจะแสดงในระนาบ XY




($\varepsilon_r = 2.1$, $\tan\delta = 0.025$ )

**รูปที่ 6** ผลการคำนวณเปรียบเทียบผลจากการจำลองและผลการทดสอบ

ตัวนำทรงกระบอกที่หุ้มด้วยเทฟลอน ($\varepsilon_r = 2.1, \mu_r = 1$) เปรียบเทียบกับกรณีที่นำเอาแท็กชนิดช่องเปิดขนาดเล็กมาติดกับวัสดุดังกล่าว จะเห็นได้ว่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแท็กที่ออกแบบไม่เกิดการลดทอนที่ด้านหลังมากนัก ซึ่งมีความเหมาะสมกับการนำไปใช้งานเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการนำเอาแท็กดังกล่าวไปใช้กับวัสดุตัวนำที่เคลือบด้วยชั้นวัสดุไดอิเล็กตริกเช่น ถังแก๊สหรือถังน้ำมัน เป็นต้น

## 5. บทสรุป

บทความนี้เสนอการวิเคราะห์การแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของแหล่งกำเนิดไฟฟ้าและแหล่งกำเนิดแม่เหล็กเชิงเส้นที่วางอยู่บนวัสดุอิมพีแดนซ์บนผิวโค้งรูปทรงกระบอก จากการใช้วิธีการคำนวณฟังก์ชันไอเกนและจากการจำลองโดยใช้โปรแกรม CST Microwave Studio ผลการคำนวณและผลการจำลองมีความสอดคล้อง

กัน โดยเวลาในการประมวลผลที่ได้จากวิธีฟังก์ชันไอเกนจะใช้เวลาสั้นกว่าการจำลองโดยโปรแกรมสำเร็จรูปเป็นอย่างมาก จากการวิเคราะห์แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของแหล่งกำเนิดไฟฟ้าและแม่เหล็กบนพื้นผิวดังกล่าวแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในขอบเขตเงา(ด้านหลังทรงกระบอกโลหะ) ของแหล่งกำเนิดแม่เหล็กจะมีการลดทอนน้อยกว่าแหล่งกำเนิดไฟฟ้าประมาณ 25 dB ที่มุม $180^{o}$ ดังนั้นสายอากาศแท็กที่ทำการออกแบบจึงควรออกแบบให้สายอากาศมีลักษณะเป็นช่องเปิดซึ่งสามารถสมมูลย์ให้เป็นแหล่งกำเนิดแม่เหล็ก จากนั้นสายอากาศได้ถูกจำลองและทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น โดยจากผลการจำลอง การคำนวณและการทดสอบจะเห็นได้ว่า แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นด้านหลังของแท็กที่นำเสนอมีการลดทอนที่น้อยว่าแท็กที่สร้างอยู่บนพื้นฐานของแหล่งกำเนิดไฟฟ้า พิจารณาที่ $180^{o}$ เท่ากับ 22 dB ซึ่งจะสามารถสรุปได้ว่าหลักการที่นำเสนอมีความสะดวกที่จะนำไปใช้งานและสายอากาศที่ออกแบบมีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้บนวัสดุผิวโค้งรูปทรงกระบอกที่เคลือบด้วยชั้นไดอิเล็กตริก

## 6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) โครงการปริญญาเอกกาญจนาภิเษก สัญญาเลขที่ PHD/0073/2553

## 7. เอกสารอ้างอิง

[1] M. Bolic, D. Simplot-Ryl, I. Stojmenovic, RFID Systems: Research Trends and Challenges, John Wiley& Sons, 2010, Chapter 1.

[2] S. Preradovic, Advanced Radio Frequency Identification Design and Applications, InTech, 2011, Chapter 1.

[3] Z. N. Chen, RFID tag antenna, antennas for portable devices, England, John Wiley & Sons, 2007, Chapter 3.

[4] D. M. Dobkin, The RF in RFID passive UHF in practice, United States of America, Newnes, 2008, Chapter 2.

[5] M.A.Ziai, J.C.Batchelor , "Curved RFID tags for metallic gas cylinders," Electronics Letters , vol.45, no.17, pp.867-869, Aug. 13 2009

[6] G. Marrocco, “The art of UHF RFID antenna design: impedance matching and size-reduction techniques,” IEEE Antennas Propagation Magazine., vol. 50, no. 1, pp. 66-79, 2008. 5

[7] H.M.S Tashi and H.Yu, "Design and simulation of UHF RFID tag antennas and performance evaluation in presence of a metallic surface," Software, Knowledge Information, Industrial Management and Applications (SKIMA), pp.1-5, 8-11 Sept. 2011

[8] Y. Huang, K. Boyle, Antennas from Theory to Practice, John Wiley & Sons, 2008, Chapter 5.

[9] P. Wongsiritorn, T. Lertwiriyaprapa, C. Phongcharoenpanich and K. Phaebua, “Characteristics of RFID C-slot tag antenna on a coated metallic cylindrical surface,” IEEE International Conference on Wireless Information Technology and Systems 2012, pp.1-4, Nov. 2012.

[10] T.B.A. Senior, J.L. Volakis, “Generalized impedance boundary conditions in scattering,” Proceedings of the IEEE, vol. 79, issue 10, pp. 1413-1420, 1991.

[11] C.A. Balanis, Advanced Engineering Electromagnetics (Second edition), John Wiley& Sons, 2012 p.632.

[12] NXP Semiconductors, Ultra High Frequency smart label ICs [online] Available www.nxp.com/ acrobat_ download/ literature/9397/75016225.pdf