

การศึกษาค่าการเชื่อมต่อร่วมของสายอากาศ ที่วัสดุตัวกลางเป็นมันแกว

A Study of Mutual Coupling of Antenna at Intermediate
materials in the yam

ชาตวิรุทธิ์ ภัทรสุเมธี¹

¹คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม

chatwiruut_2525@hotmail.com

บทคัดย่อ

บทความฉบับนี้นำเสนอการศึกษาค่าการเชื่อมต่อร่วมของสายอากาศแถวลำดับร่องบนโพรงทรงกระบอกซ้อนกันที่มีวัสดุตัวกลางเป็นมันแกว เพื่อศึกษาอิทธิพลของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจากการใช้ท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมพื้นผ้าและแถวลำดับร่องป้อนกำลังงานให้แก่โพรงทรงกระบอกและวัสดุเป็นมันแกว โดยการปรับพารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่ รัศมีชั้นใน รัศมีชั้นนอก และความยาวทั้งโพรงและแถวลำดับร่อง กระบวนการศึกษาจะเริ่มจากการนำค่าตอบสนองแม่เหล็กไฟฟ้ามาคำนวณหาค่าการเชื่อมต่อร่วมและค่าการสูญเสียย้อนกลับ โดยอาศัยทฤษฎีภาวะย้อนกลับและทฤษฎีปฏิกิริยาที่อยู่ในรูปการทำปริพันธ์สนามแม่เหล็กไฟฟ้า และอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างแอดมิตแตนซ์กับพารามิเตอร์กระจัดกระจาย ซึ่งจะช่วยให้สามารถทราบค่าการเชื่อมต่อร่วมและการสูญเสียย้อนกลับได้ทั้งภายในโพรงทรงกระบอกและในวัสดุที่เป็นมันแกว

คำสำคัญ: สายอากาศ, ทฤษฎีภาวะย้อนกลับ, ทฤษฎีปฏิกิริยา, มันแกว

ABSTRACT

This article presents A Study of Mutual Coupling of Antenna mutual coupling analysis of a concentric cylindrical cavity-backed slots array applicator at Intermediate materials in the yam. The objective of this work is study to influence of electromagnetic fields from rectangular waveguide and slot employing to exciting the cavity and yam. Study process, first is using the electromagnetic fields calculate to mutual coupling and return loss by applying the reciprocity and reaction theorems in term of integral form. Finally, the relationship between admittance and scattering parameters can be achieve to the mutual coupling and return loss in cavity,yam.

Keywords: Antenna, Reciprocity theorem, Reaction theorem, yam

1. บทนำ

สายอากาศ (Antenna) เป็นอุปกรณ์แปลงสัญญาณกลับไปมาระหว่างสัญญาณไฟฟ้ากับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เพื่อสามารถส่งผ่านอากาศได้ระยะทางไกลและครอบคลุมพื้นที่ได้เป็นบริเวณกว้าง หากต้องการปรับปรุงคุณสมบัติบางประการของสายอากาศได้แก่แบบรูปการแผ่พลังงาน (Radiation pattern) ค่าเฉพาะเจาะจงทิศทาง (Directivity) หรืออัตราขยาย (Gain) เป็นต้น สามารถกระทำได้ด้วยการนำสายอากาศตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไปมาทำงานร่วมกันแบบแถวลำดับ (Array antenna) ถึงแม้ว่าการนำสายอากาศมาวางเป็นแถวลำดับจะสามารถปรับปรุงพารามิเตอร์บางประการให้ดีขึ้นได้ แต่มักมีข้อจำกัดเรื่องค่าการเชื่อมต่อร่วม (Mutual coupling) ซึ่งหมายถึงปรากฏการณ์ส่งผ่านทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นกับสายอากาศแถวลำดับด้วยตัวเอง ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของแหล่งกำเนิดสัญญาณที่ป้อนให้แก่สายอากาศแต่ละตัว [3] ปัจจุบันได้มีการทำวิจัยเกี่ยวกับค่าการเชื่อมต่อร่วมของสายอากาศแถวลำดับกันอย่างกว้างขวางได้แก่ การลดค่าการเชื่อมต่อร่วมสายอากาศไมโครสตริบสี่เหลี่ยมแถวลำดับ (Rectangular Microstrip antenna array) ด้วยการปรับเปลี่ยนโครงสร้างแต่ละด้านให้เว้าเข้า (Concave) ผลทำให้สามารถลดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับและค่าการเชื่อมต่อร่วมลงได้ [4] การลดค่าการเชื่อมต่อร่วมของสายอากาศรีโซเนเตอร์ไดอิเล็กตริก (Dielectric resonator antenna) ด้วยการป้อนสัญญาณให้สายอากาศทำงานที่โหมดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแตกต่างกัน (และ Quasi-) สามารถลดค่าการเชื่อมต่อร่วมได้ถึง -15 dB [5] หรือคำนวณค่าการเชื่อมต่อร่วมของสายอากาศรีโซเนเตอร์ไดอิเล็กตริกสี่เหลี่ยมแถวลำดับแบบวงกลม โดยการปรับเปลี่ยนรัศมีแถวลำดับวงกลมตั้งแต่ 0.25 ถึง 0.75 แล้วคำนวณค่าการเชื่อมต่อร่วมด้วยวิธีผลต่างสี่เหลี่ยมเชิงเวลา (Finite-Difference Time Domain ; FDTD) ได้ผลสรุปว่ารัศมี 0.75 จะมีค่าการเชื่อมต่อร่วมน้อยที่สุด [6] และศึกษาผลกระทบต่อค่าการเชื่อมต่อร่วมที่มีต่อสัญญาณรบกวนเชิงความร้อน (Thermal noise) ของสายอากาศไดโพลแถวลำดับ (Dipole array) จากการปรับเปลี่ยนระยะห่าง [7] เป็นต้น C.Sangdao และ M.Krairiksh [8] ได้วิเคราะห์สนามไฟฟ้าโดยการปรับเปลี่ยนค่าความหนาแน่นเมล็ดข้าวเปลือกตั้งแต่ 10-100% ซึ่งเป็นวัสดุที่ไหลผ่านโพรงกระบอกซ้อนกันสองชั้นที่ป้อนคลื่นด้วยท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าในการให้ความร้อนแก่เมล็ดข้าวเปลือกด้วยคลื่นไมโครเวฟ ซึ่งค่าสนามไฟฟ้าที่ได้จะบ่งบอกถึงความหนาแน่นที่เหมาะสมที่สุด เพื่อที่จะนำไปประยุกต์ใช้ในงานเกษตรกรรมสำหรับการลดความชื้นของข้าวเปลือกได้อย่างมีประสิทธิภาพ โชคชัย แสงดาว [1] ได้ทดสอบวัดการกระจายอุณหภูมิในวัสดุตัวกลางเช่น อากาศ มันแกว ไม้ และ แอลกอฮอล์โดยการให้ความร้อนแล้วใช้แผ่นฟิล์มผลึกเหลวทาบบาพื้นที่สนามประสิทธิผล จากกรณีนี้ เจาะร่องที่ละร่องและเจาะเป็นแถวลำดับร่องของสายอากาศโพรงทรงกระบอกที่ทำงานในโหมดสนามไฟฟ้าตามขวางและสนามแม่เหล็กตามขวาง แล้วจึงทดสอบกับสายอากาศที่พัฒนาขึ้นจำนวน 1 ตัวและจำนวน 2 ตัววางเรียงให้แถวลำดับร่องเยื้องกันตามลำดับ ผลการทดสอบทำให้ทราบว่าประสิทธิภาพผลมีค่าน้อยหากสายอากาศทำงานที่โหมดใดโหมดหนึ่งเพียงอย่างเดียว และเมื่อออกแบบให้สายอากาศทำงานได้ทั้งสองโหมดพร้อมกันทำให้พื้นสนามประสิทธิผลเพิ่มขึ้นและยิ่งจะเพิ่มขึ้นหากนำมาวางเรียงให้แถวลำดับร่องเยื้องกันแต่ยังไม่สม่ำเสมอทั่วถึงได้ จึงได้อาศัยลมเย็นและลมร้อนมาช่วยเสริมบริเวณแถวลำดับร่องและบริเวณตรงกลางสายอากาศ ซึ่งทำให้พื้นที่สนามประสิทธิผลมีความสม่ำเสมอทั่วถึงได้ตามต้องการ โชคชัย แสงดาว [2] ได้พัฒนาสายอากาศเพื่อนำไปใช้กับการลด

ความชื้นในข้าวเปลือกอย่างต่อเนื่อง โดยระบบให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟนี้จะประกอบด้วยสายอากาศปล่อยคลื่นที่เหมาะสมกับข้าวเปลือก สายอากาศปล่อยคลื่นที่ได้ต้องนำวัสดุเคลื่อนที่ผ่านตัวมันด้วยและหากใช้แหล่งกำเนิดกำลังงานที่มีกำลังสูงด้วยก็จะเป็นการดี แต่หากใช้เป็นแหล่งกำเนิดกำลังงานต่ำก็เป็นทางเลือกหนึ่ง สิ่งที่ต้องคำนึงถึงนอกเหนือจากการใช้สายอากาศปล่อยคลื่นที่มีประสิทธิภาพแล้ว การป้องกันการรั่วไหลของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ต้องคำนึงถึงเป็นสิ่งสำคัญเพื่อความปลอดภัยซึ่งมีมาตรฐานกำหนด ผู้วิจัยพยายามศึกษาสายอากาศปล่อยคลื่นที่มีโครงสร้างเป็นตัวนำรูปทรงกระบอกซ้อนกันสองชั้นมีจุดศูนย์กลางร่วมกัน ที่ปลายทั้งสองด้านระหว่างทรงกระบอกชั้นในและทรงกระบอกชั้นนอกถูกปิดด้วยแผ่นตัวนำ การป้อนกำลังงานให้แก่สายอากาศชนิดนี้ทำได้โดยใช้ท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้ามุมฉาก ป้อนกำลังงานที่ตำแหน่งบริเวณตรงกลางของทรงกระบอกชั้นนอก ในโหมดที่ต่างกันเพื่อลดผลกระทบการเชื่อมต่อร่วมกำลังงานซึ่งกันและกันคือโหมดสนามแม่เหล็กกับสนามไฟฟ้าตามขวางแยกจากกันที่ละกรณี จากนั้นจะนำการป้อนกำลังงานทั้งสองโหมดเข้าที่โพรงเดียวกันพร้อมกันและใช้แหล่งกำเนิดกำลังงานเป็นหลอดแมกนีตรอน (Magnetron) สองแหล่งร่วมกัน ในการนี้จะเจาะแฉก ลำตัวร่องที่บริเวณตรงกลางผนังของทรงกระบอกชั้นใน เพื่อให้คลื่นไมโครเวฟเดินทางเข้าสู่เนื้อของวัสดุที่เคลื่อนที่ผ่านตัวสายอากาศอย่างต่อเนื่อง นอกจากนี้ยังสามารถจะควบคุมกำหนดตำแหน่งบริเวณความร้อนเพื่อให้เกิดความสม่ำเสมอของอุณหภูมิในทุกๆ ตำแหน่ง ได้ด้วยการปรับเปลี่ยนขนาดของโพรงและปรับเปลี่ยนขนาดความยาวของแฉก ลำตัวร่องทั้งสอง โดยท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้ามุมฉากยังสามารถใช้ได้เหมือนเดิมและการป้องกันการรั่วของคลื่นก็สามารถทำได้โดยการนำท่อนำคลื่นรูปทรงกระบอกเจาะร่องด้านในปิดที่ปลายทั้งสองด้านของตัวสายอากาศดังกล่าวนี้ จะเห็นว่าสายอากาศดังกล่าวมีโครงสร้างที่ง่ายต่อการออกแบบและสะดวกต่อการนำไปใช้งานในการให้ความร้อนแก่วัสดุที่เป็นเมล็ดธัญพืชอย่างต่อเนื่อง โดยงานวิจัยชิ้นนี้ยังไม่ได้ทำการวิเคราะห์หาค่าการเชื่อมต่อร่วม ซึ่งมีความสำคัญอย่างยิ่งกับการยืดอายุการใช้งานหลอดแมกนีตรอนและการรักษาประสิทธิภาพของระบบบอบแห้ง

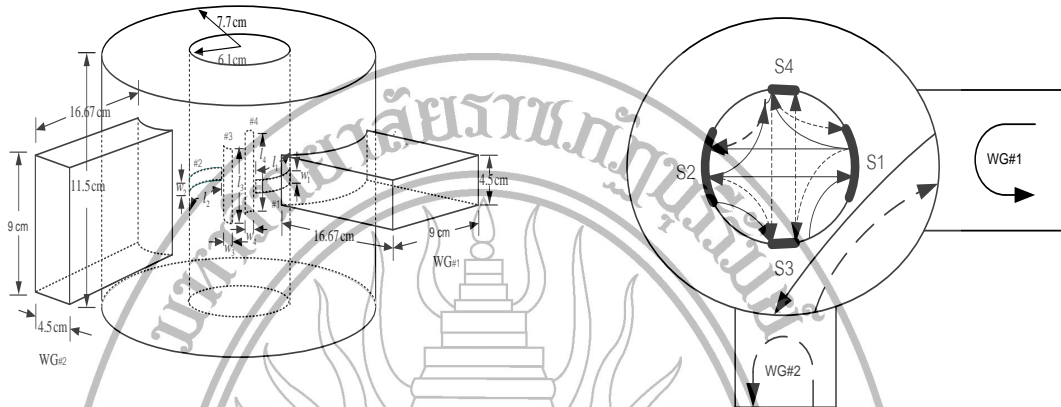
สำหรับงานนี้จะศึกษาค่าการเชื่อมต่อร่วมของโพรงทรงกระบอกซ้อนกันโดยอาศัยสนามไฟฟ้าภายในโพรงทรงกระบอกและในวัสดุมาคำนวณค่าการเชื่อมต่อร่วมแล้วอาศัย ทฤษฎีภาวะย้อนกลับ (Reciprocity theorem) และทฤษฎีปฏิกิริยา (Reaction theorem) ด้วยการปรับเปลี่ยนรัศมีชั้นในรัศมีชั้นนอก ความยาวโพรงและแฉก ลำตัวร่อง ตลอดจนปรับเปลี่ยนวัสดุตัวกลางได้แก่ มันแกว โดยแสดงผลในรูปแบบการสูญเสียย้อนกลับและการเชื่อมต่อร่วมตามลำดับ

2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 2.1 นักวิจัยสามารถออกแบบสายอากาศที่เหมาะสมกับวัสดุตัวกลางต่างๆ
- 2.2 ทำความเข้าใจในการหาค่าอิมพีแดนซ์ของตัวสายอากาศ
- 2.3 คำนวณสมการแอดมิตแตนซ์
- 2.4 หาค่าการเชื่อมต่อร่วมได้อย่างมีประสิทธิภาพ

3. วิธีการดำเนินการวิจัย

จากการออกแบบการทดลองที่เจาะแฉะแล้วลำดับร่องทั้ง 4 แฉะ ซึ่งสามารถหาค่าการเชื่อมต่อร่วมที่มีผลกระทบที่ออกจากแฉะทั้ง 4 แฉะได้โดยการวัดทดลองวัดผลและสามารถเปรียบเทียบได้จากการทดลองคำนวณดังแสดงในภาพที่ 1

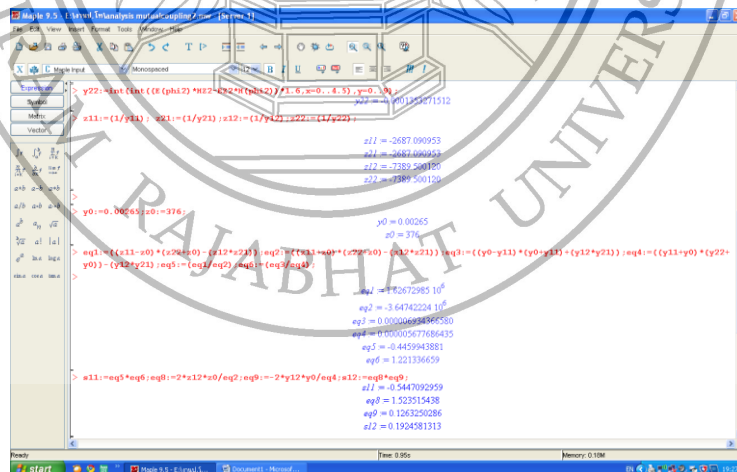


$$\lambda_g / 4 = l_1 = l_2 = l_3 = l_4 = 4.16 \text{ cm} \quad ; \lambda_g = 16.67 \text{ cm}$$

$$w_1 = w_2 = w_3 = w_4 = 3 \text{ mm}$$

ภาพที่ 1 โครงสร้างกระบอกซ้อนกันซ้อนด้วยท่อนำคลื่น 2 โมด

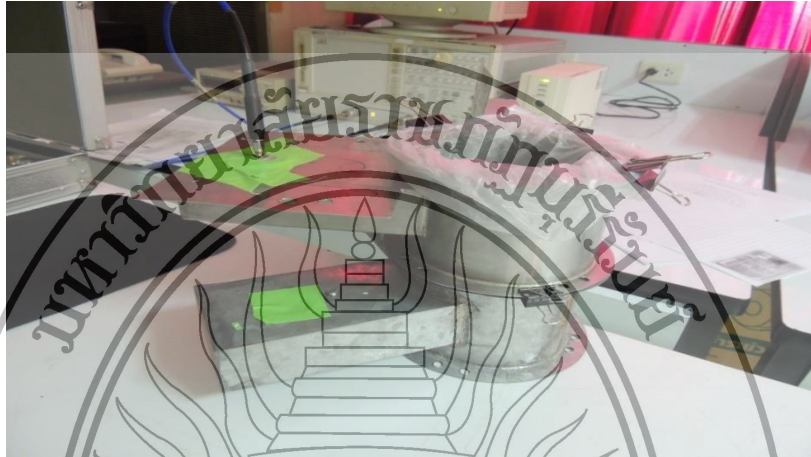
เมื่อทำการศึกษาทฤษฎีและทำการตั้งสมการจะใช้โปรแกรม maple9 เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ เช่น ค่าแอดมิตแตนซ์ ค่าอิมพีแดนซ์ ค่าเชื่อมต่อร่วม เพื่อที่จะได้ค่าที่มีประสิทธิภาพที่ถูกต้องและแม่นยำให้บทความฉบับนี้สมบูรณ์มากขึ้น



ภาพที่ 2 โปรแกรม maple9 ใช้ในการคำนวณค่าพารามิเตอร์

เมื่อทำการหาค่าโดยใช้โปรแกรม maple9 เป็นที่เรียบร้อย ขั้นตอนต่อไปคือการนำมันแควที่เตรียมทดลองในโพรงของทรงกระบอกซ้อนกันสองชั้นเพื่อหาค่าเชื่อมต่อร่วมด้วยการวัดในอุปกรณ์

สายอากาศที่ได้ออกแบบโดยจะใช้เครื่องวัด network analyzer เป็นเครื่องวัดค่าพารามิเตอร์และนำมาเปรียบเทียบกับค่าคำนวณเพื่อที่จะให้ชิ้นงานออกมาสมบูรณ์และพัฒนาอย่างต่อเนื่อง



ภาพที่ 3 สายอากาศในการทดลองโดยมีสายโพรบเป็นสายวัดที่ต่อเข้ากับ network analyzer

4. ผลการวิจัย

การวิเคราะห์เบื้องต้นสำหรับโพรงตัวนำทรงกระบอกซ้อนกันสองชั้นปิดปลายในเงื่อนไขที่ไม่มีแหล่งกำเนิดสนาม (Source-free) สามารถแบ่งออกได้เป็นสองกรณีคือ กรณีที่ป้อนกำลังงานด้วยโหมดสนามแม่เหล็กตามขวางและป้อนกำลังงานด้วยโหมดสนามไฟฟ้าตามขวาง เมื่ออาศัยเงื่อนไขขอบเขตสนามไฟฟ้าจะทำให้ได้สมการโพรงตัวนำทรงกระบอกซ้อนกันสองชั้นปิดปลายเป็น

$$f_{r_{mnp}}^{TM^z} = \frac{\sqrt{\left(\frac{x_{mn}}{a}\right)^2 + \left(\frac{x_{mn}}{b}\right)^2 + \left(\frac{p\pi}{L}\right)^2}}{2\pi\sqrt{\mu\epsilon}} \quad (1)$$

$$f_{r_{mnp}}^{TE^z} = \frac{\sqrt{\left(\frac{x'_{mn}}{a}\right)^2 + \left(\frac{x_{mn}}{b}\right)^2 + \left(\frac{p\pi}{L}\right)^2}}{2\pi\sqrt{\mu\epsilon}} \quad (2)$$

$f_{r_{mnp}}^{TM^z}$ คือความถี่เรโซแนนซ์โหมดสนามแม่เหล็กตามขวางใด ๆ

$f_{r_{mnp}}^{TE^z}$ คือความถี่เรโซแนนซ์โหมดสนามไฟฟ้าตามขวางใด ๆ

x_{mn} คือค่ารากของฟังก์ชันเบสเซล

x'_{mn} คืออนุพันธ์ค่ารากของฟังก์ชันเบสเซล

a คือรัศมีของตัวนำทรงกระบอกชั้นใน

b คือรัศมีของตัวนำทรงกระบอกชั้นนอก

L คือความยาวของโพรงตัวนำทรงกระบอก

ϵ คือเพอร์มิตติวิตี (Permittivity) เท่ากับ 8.854×10^{-12} F/m

μ คือเพอร์เมียบิลิตี (Permeability) เท่ากับ $4\pi \times 10^{-7}$ H/m

m, n และ p คือโหมดใด ๆ ของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าภายในโพรง

สมการที่ (1) และ (2) แสดงให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างความถี่เรโซแนนซ์ ค่ารากของฟังก์ชันเบสเซล โมด รัศมีชั้นใน รัศมีชั้นนอก และความยาว เมื่อพิจารณาโพรงทรงกระบอกซ้อนกันปิดปลายในโหมดสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าตามขวางมีโมดเป็นใหญ่คือ TM_{010} และ TE_{111} ทำงานที่ความถี่ 2.45 GHz จะทำให้ได้ค่ารากของฟังก์ชันเบสเซล x'_{mn} และ x''_{mn} เท่ากับ 2.4049 และ 1.8412 ตามลำดับ

ค่าการเชื่อมต่อยุบรวมเกิดจากการส่งผ่านสนามแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งกันและกันของท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมผืนผ้ามุมฉาก WG#1 และ WG#2 ผ่านมาทางโพรงทรงกระบอกซ้อนกัน ขณะเดียวกันยังผนวกกับค่าการสูญเสียย้อนกลับของท่อนำคลื่นแต่ละตัวอีกด้วย การคำนวณค่าการเชื่อมต่อยุบรวมจึงจำเป็นที่จะต้องทราบคำตอบสนามแม่เหล็กไฟฟ้าภายในโพรง เพื่อใช้สำหรับการคำนวณแอดมิตแตนซ์เชื่อมโยง (Mutual admittance; y_{ij}) ได้จากการอาศัยทฤษฎีภาวะย้อนกลับและทฤษฎีปฏิบัติการ [6] ที่แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าตามแนวมุม ϕ และแนวแกน z ของท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมผืนผ้ามุมฉากทั้งสองโมดที่ใช้อันกำลังงานให้แก่โพรงทรงกระบอกซ้อนกันปิดปลายคือสมการแอดมิตแตนซ์จากแถวลำดับร่องที่ s_1 ที่ส่งผลต่อแถวลำดับร่องในโพรงทรงกระบอก ดังสมการต่อไปนี้

$$y_{11}(s_1) = \int_{z_1}^{z_2} \int_{\phi_1}^{\phi_2} (E_{\phi s_1} H_{z s_1} - E_{z s_1} H_{\phi s_1}) \rho d\phi dz \quad (3)$$

$$y_{21}(s_1 \rightarrow s_2) = \int_{z_1}^{z_2} \int_{\phi_1}^{\phi_2} (E_{\phi s_1} H_{z s_2} - E_{z s_1} H_{\phi s_2}) \rho d\phi dz \quad (4)$$

$$y_{31}(s_1 \rightarrow s_3) = \int_{z_1}^{z_2} \int_{\phi_1}^{\phi_2} (E_{\phi s_1} H_{z s_3} - E_{z s_1} H_{\phi s_3}) \rho d\phi dz \quad (5)$$

$$y_{41}(s_1 \rightarrow s_4) = \int_{z_1}^{z_2} \int_{\phi_1}^{\phi_2} (E_{\phi s_1} H_{z s_4} - E_{z s_1} H_{\phi s_4}) \rho d\phi dz \quad (6)$$

$E_{\phi s_1}, E_{z s_1}$ คือสนามไฟฟ้าในวัสดุตามแนวมุม ϕ และแนวแกน z ของแถวลำดับร่องที่ s_1

$H_{z s_1}, H_{\phi s_1}$ คือสนามแม่เหล็กในวัสดุตามแนวมุม z และแนวแกน ϕ ของแถวลำดับร่องที่ s_1

$H_{z s_2}, H_{\phi s_2}$ คือสนามแม่เหล็กในวัสดุตามแนวมุม z และแนวแกน ϕ ของแถวลำดับร่องที่ s_2

$H_{z s_3}, H_{\phi s_3}$ คือสนามแม่เหล็กในวัสดุตามแนวมุม z และแนวแกน ϕ ของแถวลำดับร่องที่ s_3

$H_{z s_4}, H_{\phi s_4}$ คือสนามแม่เหล็กในวัสดุตามแนวมุม z และแนวแกน ϕ ของแถวลำดับร่องที่ s_4

$y_{11}(s_1)$ แสดงถึงแอดมิตแตนซ์บริเวณแถวลำดับร่อง s_1 ที่เกิดจาก $E_{\phi s_1}, E_{z s_1}, H_{z s_1}, H_{\phi s_1}$

$y_{21}(s_1 \rightarrow s_2)$ แสดงถึงแอดมิตแตนซ์เชื่อมโยงไปข้างหน้าระหว่างแถวลำดับร่อง s_1 กับ s_2

ที่เกิดจาก $E_{\phi s_1}, E_{z s_1}, H_{z s_2}, H_{\phi s_2}$

$y_{31}(s_1 \rightarrow s_3)$ แสดงถึงแอมิติตแดนซ์เชื่อมโยงไปข้างหน้าระหว่างแวลลำดับร่อง s_1 กับ s_3 ที่เกิดจาก $E_{\phi_{s1}}, E_{Z_{s1}}, H_{Z_{s3}}, H_{\phi_{s3}}$

$y_{41}(s_1 \rightarrow s_4)$ แสดงถึงแอมิติตแดนซ์เชื่อมโยงไปข้างหน้าระหว่างแวลลำดับร่อง s_1 กับ s_4 ที่เกิดจาก $E_{\phi_{s1}}, E_{Z_{s1}}, H_{Z_{s4}}, H_{\phi_{s4}}$

ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่ป้อนด้วยท่อนำคลื่น ทั้ง 2 โมดที่เจาะแวลลำดับร่อง จะทำให้ความยาวร่องแต่ละขนาดไม่เท่ากันจากการทดลองได้ศึกษาขนาดของแวลลำดับร่อง 3 ขนาดคือ $\lambda, \lambda/2, \lambda/4$ ซึ่งจะทำให้สนามแม่เหล็กที่ออกมาจากแวลลำดับร่องไม่เท่ากันทำให้ค่าแอมิติตแดนซ์แตกต่างกัน ทำให้เกิดผลกับค่าอิมพีแดนซ์ที่แตกต่างกันเช่นกันเนื่องจากค่าอิมพีแดนซ์เป็นส่วนกลับของแอมิติตแดนซ์และค่าแอมิติตแดนซ์ก็เปลี่ยนแปลงตามสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ออกมาจากแวลลำดับร่องที่ต่างขนาดกัน สมการที่ได้คือสมการ(3-6) แอมิติตแดนซ์เชื่อมโยงที่ออกมาจากแวลลำดับร่องที่ s_1 ไปยังแวลลำดับร่องที่ s_2, s_3, s_4 เมื่อมีขอบเขตที่ออกมาจากแวลลำดับร่องแนวมุม ϕ และแนวแกน z บริเวณปากแวลลำดับร่อง

สมการแอมิติตแดนซ์จากแวลลำดับร่องที่ s_2 ที่ส่งผลต่อแวลลำดับร่องในโพรงทรงกระบอก ดังสมการต่อไปนี้

$$y_{22}(s_2) = \int_{\phi_2}^{\phi_1} \int_{z_2}^{z_1} (E_{\phi_{s2}} H_{Z_{s2}} - E_{Z_{s2}} H_{\phi_{s2}}) \rho d\phi dz \quad (7)$$

$$y_{12}(s_2 \rightarrow s_1) = \int_{\phi_2}^{\phi_1} \int_{z_2}^{z_1} (E_{\phi_{s2}} H_{Z_{s1}} - E_{Z_{s2}} H_{\phi_{s1}}) \rho d\phi dz \quad (8)$$

$$y_{32}(s_2 \rightarrow s_3) = \int_{\phi_2}^{\phi_1} \int_{z_2}^{z_1} (E_{\phi_{s2}} H_{Z_{s3}} - E_{Z_{s2}} H_{\phi_{s3}}) \rho d\phi dz \quad (9)$$

$$y_{42}(s_2 \rightarrow s_4) = \int_{\phi_2}^{\phi_1} \int_{z_2}^{z_1} (E_{\phi_{s2}} H_{Z_{s4}} - E_{Z_{s2}} H_{\phi_{s4}}) \rho d\phi dz \quad (10)$$

$E_{\phi_{s2}}, E_{Z_{s2}}$ คือสนามไฟฟ้าในวัสดุตามแนวมุม ϕ และแนวแกน z ของแวลลำดับร่องที่ s_2

$H_{Z_{s2}}, H_{\phi_{s2}}$ คือสนามแม่เหล็กในวัสดุตามแนวมุม z และแนวแกน ϕ ของแวลลำดับร่องที่ s_2

$H_{Z_{s1}}, H_{\phi_{s1}}$ คือสนามแม่เหล็กในวัสดุตามแนวมุม z และแนวแกน ϕ ของแวลลำดับร่องที่ s_1

$H_{Z_{s3}}, H_{\phi_{s3}}$ คือสนามแม่เหล็กในวัสดุตามแนวมุม z และแนวแกน ϕ ของแวลลำดับร่องที่ s_3

$H_{Z_{s4}}, H_{\phi_{s4}}$ คือสนามแม่เหล็กในวัสดุตามแนวมุม z และแนวแกน ϕ ของแวลลำดับร่องที่ s_4

$y_{22}(s_2)$ แสดงถึงแอมิติตแดนซ์บริเวณแวลลำดับร่อง s_2 ที่เกิดจาก $E_{\phi_{s2}}, E_{Z_{s2}}, H_{Z_{s2}}, H_{\phi_{s2}}$

$y_{12}(s_2 \rightarrow s_1)$ แสดงถึงแอมิติตแดนซ์เชื่อมโยงไปข้างหน้าระหว่างแวลลำดับร่อง s_2 กับ s_1 ที่เกิดจาก $E_{\phi_{s2}}, E_{Z_{s2}}, H_{Z_{s1}}, H_{\phi_{s1}}$

$y_{32}(s_2 \rightarrow s_3)$ แสดงถึงแอมิติตแดนซ์เชื่อมโยงไปข้างหน้าระหว่างแวลลำดับร่อง s_2 กับ s_3 ที่เกิดจาก $E_{\phi_{s2}}, E_{Z_{s2}}, H_{Z_{s3}}, H_{\phi_{s3}}$

$y_{42}(s_2 \rightarrow s_4)$ แสดงถึงแอดมิตแดนซ์เชื่อมโยงไปข้างหน้าระหว่างแวลวลำดับร่อง s_2 กับ s_4 ที่เกิดจาก $E_{\phi_{s_2}}, E_{Z_{s_2}}, H_{Z_{s_4}}, H_{\phi_{s_4}}$

สมการที่ได้คือสมการ(7-10) แอดมิตแดนซ์เชื่อมโยงที่ออกจากแวลวลำดับร่องที่ s_2 ไปยังแวลวลำดับร่องที่ s_1, s_3, s_4 เมื่อมีขอบเขตที่ออกจากแวลวลำดับร่องแนวมุม ϕ และแนวแกน z บริเวณปากแวลวลำดับร่องและสมการของ s_3, s_4 จะมีลักษณะคล้ายกันกับ s_1, s_2 เปลี่ยนแค่การพิจารณาต้นทางและปลายทางเท่านั้น

สมการที่ (3)-(10) คือสมการแอดมิตแดนซ์เชื่อมโยงระหว่างท่อนำคลื่นโหมดสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าตามขวาง โดย y_{11} หมายถึงแอดมิตแดนซ์ที่บริเวณท่อนำคลื่น WG#1 ส่วน y_{21} หมายถึงแอดมิตแดนซ์เชื่อมต่อจากท่อนำคลื่น WG#1 ไปยัง WG#2 ส่วน y_{12} หมายถึงแอดมิตแดนซ์เชื่อมต่อจากท่อนำคลื่น WG#2 กลับมายัง WG#1 และ y_{22} หมายถึงแอดมิตแดนซ์ที่บริเวณท่อนำคลื่น WG#2 ซึ่งอยู่ในรูปของการอินทิกรัลตลอดพื้นที่ผิวบริเวณปากท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมผืนผ้ามุมฉากทั้งสองโหมด ดังนั้นค่าการเชื่อมต่อร่วมและค่าการสูญเสียย้อนกลับสามารถทราบได้จากพารามิเตอร์การจัดกระจายที่มีความสัมพันธ์กับแอดมิตแดนซ์เหล่านี้ตามลำดับ ย้อนกลับของท่อนำคลื่นโหมดสนามแม่เหล็กตามขวาง WG#1 และสนามไฟฟ้าตามขวาง WG#2 ค่าการเชื่อมต่อร่วมไปข้างหน้า (Forward mutual coupling) จากท่อนำคลื่น WG#1 ไปยัง WG#2 และค่าการเชื่อมต่อร่วมย้อนกลับ (Reverse mutual coupling) จากท่อนำคลื่น WG#2 มายัง WG#1 ตามสมการที่ (3)-(10) ผลปรากฏว่าการสูญเสียย้อนกลับของท่อนำคลื่นดังกล่าวที่ 2 เป็นผลของการคำนวณดังต่อไปนี้

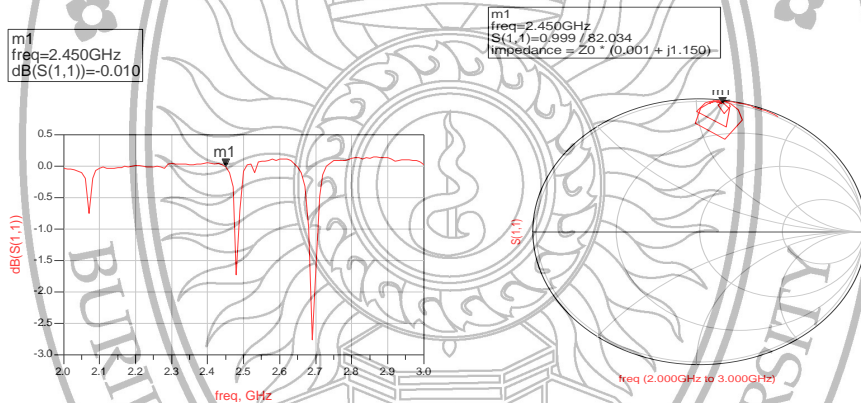
5. อภิปรายผล

ตารางที่ 1 ค่าการเชื่อมต่อร่วมและค่าการสูญเสียย้อนกลับเมื่อวัสดุตัวกลางเป็นมันแกว

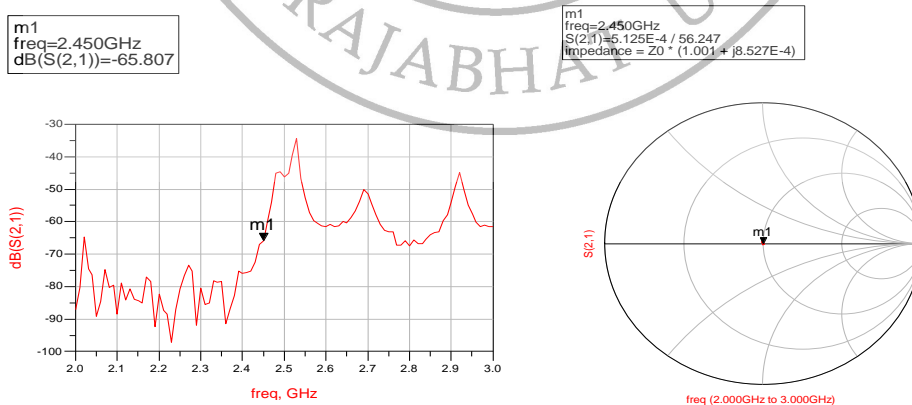
เมื่อตัวกลางเป็นมันแกว $\epsilon_r = 82$				
ความยาวร่อง	Return loss S(11)	Insertion loss S(13)	Insertion loss S(14)	Insertion loss S(12)
λ	-1.8	-51.7	-51.2	-1.4
$\lambda/2$	-3.5	-40.9	-40.5	-3.3
$\lambda/4$	-4.7	-37.26	-37.26	-4.69
ความยาวร่อง	Return loss S(22)	Insertion loss S(23)	Insertion loss S(24)	Insertion loss S(21)
λ	-1.82	-51.5	-51	-1.45
$\lambda/2$	-3.52	-40	-40	-3.32
$\lambda/4$	-4.73	-37.2	-37.2	-4.69

ตารางที่ 1 (ต่อ)

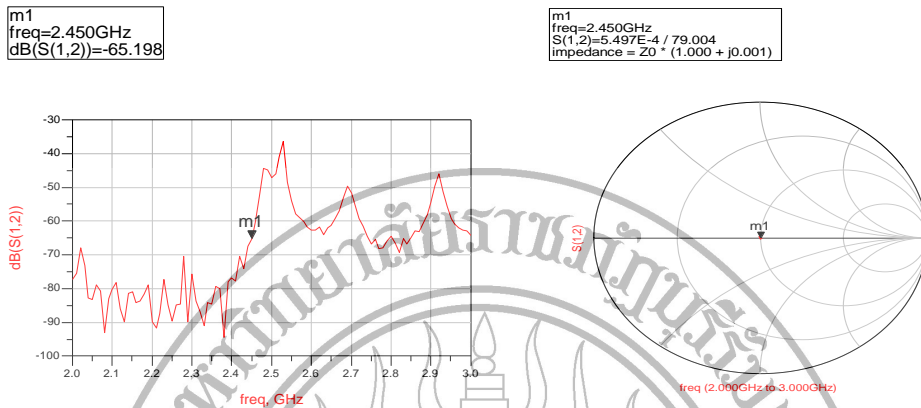
ความยาว ร่อง	Return loss S(33)	Insertion loss S(31)	Insertion loss S(32)	Insertion loss S(34)
λ	-1.8	-51	-51.2	-0.6
$\lambda/2$	-3.5	-39.9	-39	-3.2
$\lambda/4$	-4.7	-36	-36.26	-4.34
ความยาว ร่อง	Return loss S(44)	Insertion loss S(41)	Insertion loss S(42)	Insertion loss S(43)
λ	-1.8	-51.3	-51.1	-0.65
$\lambda/2$	-3.5	-40.7	-40.9	-3
$\lambda/4$	-4.7	-37.2	-37	-4



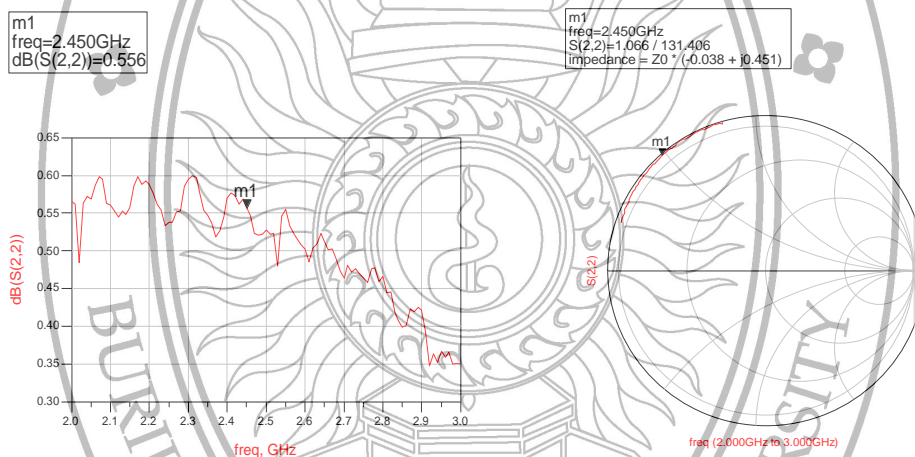
ภาพที่ 4 ผลการทดลองหาค่า s11 ที่ตัวกลางเป็นมันแกว



ภาพที่ 5 ผลการทดลองหาค่า s21 ที่ตัวกลางเป็นมันแกว



ภาพที่ 6 ผลการทดลองหาค่า s_{12} ที่ตัวกลางเป็นมันแกว



ภาพที่ 7 ผลการทดลองหาค่า s_{22} ที่ตัวกลางเป็นมันแกว

จากการทดลองหาค่าสูญเสียย้อนกลับ (Return loss) และค่าเชื่อมต่อรวมไปข้างหน้า (Insertion loss) ในวัสดุตัวกลาง มันแกว ในการเจาะแหว่ลำดับร่องทั้ง 4 แหว่ได้ผลการทดลองดังต่อไปนี้ มันแกว (-0.01, -65.807, -65.198, 0.556) ซึ่งค่าที่ได้มาจะสามารถบ่งบอกว่าสายอากาศในชุดการทดลองนี้สามารถทำงานได้แต่ไม่ถึงกับดีมากเนื่องจากค่า s_{22} ยังมีค่าสูญเสียย้อนกลับที่ค่อนข้างจะสูง ซึ่งอาจจะเกิดจากปัจจัยเช่น การออกแบบสายอากาศอาจจะคลาดเคลื่อน ความชำนาญในการใช้เครื่องมืออุปกรณ์

6. สรุปผล

วิจัยฉบับนี้ได้แสดงหลักการหาค่าเชื่อมต่อรวมของ สายอากาศปล่อยคลื่นรูปทรงโพรงทรงกระบอกซ้อนกันสองชั้น การศึกษาได้แสดงการคำนวณหาค่าการเชื่อมต่อรวมภายในโพรงที่ถูกป้อนกำลังงานด้วยท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมผืนผ้ามุมฉากโหมดสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าตามขวาง โดย

อาศัยทฤษฎีภาวะย้อนกลับและทฤษฎีปฏิกริยา ตลอดจนได้ปรับพารามิเตอร์พื้นฐานของโพรงได้แก่ รัศมีชั้นใน รัศมีชั้นนอกและความยาว ตลอดจนความยาวแวลลุ่มดัดบร่งและวัสดุตัวกลางขนาดของ โพรงทรงกระบอกที่เหมาะสมที่ได้จากการคำนวณของโครงสร้างโพรงจนได้ปรับจนละเอียดจึงได้ โครงสร้างที่เหมาะสมคือรัศมีชั้นใน 6.1 เซนติเมตร ขนาดที่รัศมีชั้นนอกเป็น 7.7 เซนติเมตร ความยาว ของโพรง 11.5 เซนติเมตร

เมื่อทราบขนาดโพรงที่เหมาะสมจึงได้ทำการเจาะร่องบนผนังรัศมีชั้นในที่ใกล้กับท่อนำคลื่น หรือตรงข้ามกัน แล้วคำนวณหาค่าการเชื่อมต่อกันในวัสดุตัวกลางเช่น อากาศ มันแกว แอลกอฮอล์ และข้าวเปลือก เมื่อปรับความยาวร่องเท่ากับหนึ่งความยาวคลื่น (λ) ความยาวคลื่นส่วนสอง ($\lambda/2$) และความยาวคลื่นส่วนสี่ ($\lambda/4$) พบว่าค่าสูญเสียย้อนกลับและค่าเชื่อมต่อกันไปข้างหน้าในงานวิจัย ครั้งนี้จะแตกต่างกันไปแล้วแต่วัสดุตัวกลางที่มีความแตกต่างกันทางไฟฟ้า ซึ่งสามารถใช้ความยาวร่อง ตามความเหมาะสมของแต่ละวัสดุที่ป้อนเข้าไปในโพรงของทรงกระบอกซ้อนกันสองชั้น เมื่อได้ สายอากาศที่พัฒนาขึ้นอย่างเหมาะสมแล้ว จึงได้คำนวณหาค่าเชื่อมต่อกันในวัสดุตัวกลางที่มีค่าทาง ไฟฟ้าที่เป็น มันแกว ในงานวิจัยชิ้นนี้จะทดลองวัสดุตัวกลางที่เป็นมันแกว

จากงานวิจัยที่ได้แสดงมาทั้งหมดอาจมีข้อผิดพลาดอยู่บ้างทั้งการคำนวณ เนื่องจากสมมุติฐาน การคำนวณเช่น การสมมุติสนามไฟฟ้าในท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ยกมา การเลือกใช้ฟังก์ชันต่างๆ ในการคำนวณ การหาค่าโมดของสนามไฟฟ้า การผิดพลาดจากวิธีเขียนโปรแกรมคำนวณ หรือ กระบวนการคำนวณหาค่าเช่น การกำหนดตำแหน่งที่ใส่สมการการแอมิตแดนซ์และสมการ พารามิเตอร์การจัดกระจาย แต่จากที่กล่าวมาทั้งหมดสามารถที่อธิบายความสัมพันธ์ของสายอากาศ และค่าการเชื่อมต่อกันทั้งในโพรงและในวัสดุตัวกลางไหลผ่านจากสายอากาศที่พัฒนาขึ้นให้เข้าใจได้

7. ข้อเสนอแนะ

ในงานที่จะพัฒนาการหาค่าการเชื่อมต่อกัน ผู้วิจัยจะได้ศึกษาถึง

1. ศึกษาขนาดของโพรงทรงกระบอกที่แตกต่างกัน
2. ค่าการเชื่อมต่อกันที่มีผลกระทบต่อสายอากาศทั้ง 2 โมด
3. ค่าการเชื่อมต่อกันอย่างละเอียด เนื่องจากระบบได้ใช้หลอดแมกนีตรอนจำนวน 4 ตัว

เป็นแหล่งกำเนิดคลื่นไมโครเวฟป้อนผ่านท่อนำคลื่น ซึ่งแหล่งกำเนิดแต่ละตัวอาจส่งผ่านกำลังงานถึง กันได้มาก อันอาจก่อให้เกิดการเสียหายต่อแหล่งกำเนิดนี้ได้ การคำนวณจะอาศัยทฤษฎีปฏิกริยาและ ทฤษฎีภาวะย้อนกลับ

4. สายอากาศที่ถูกป้อนกำลังงานด้วยท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมผืนผ้ามุมฉากโมดสนามแม่เหล็กตาม ขวางและสนามไฟฟ้าตามขวาง ที่หาค่าการเชื่อมต่อกันโดยพิจารณาวัสดุตัวกลางที่ชนิดต่างกัน

เอกสารอ้างอิง

โชคชัย แสงดาว, “การวิเคราะห์การให้ความร้อนในท่อนำคลื่นทรงกระบอกโดยใช้สายอากาศแวล ลุ่มดัดบร่งที่เป็นโพรงทรงกระบอกซ้อนกัน,” วิทยานิพนธ์ปริญญาเอก, ภาควิชาวิศวกรรม โทรคมนาคมคณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร, 2548

- โชคชัย แสงดาว, “ได้ทดสอบวัดการกระจายอุณหภูมิในวัสดุตัวกลาง,” วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคมคณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร, 2544
- H. T. Hui, M. E. Bialkowski and H. S. Lui, “Mutual Coupling in Antenna,” International Journal of Antennas and Propagation, Vol. 2010, Article ID 736701, pp. 2-3, 2010.
- S. Mohanna, A. Farahbakhsh and S. Tavakoli, “Mutual Coupling Reduction in Two-Dimensional Array of Microstrip Antennas Using Concave Rectangular Patches,” Journal of Telecommunications, Vol. 2, Issue 2, pp. 64-69, May 2010.
- L. Zou and C. Fumeaux, “Mutual Coupling Reduction in a Multi-mode Multi-function Dielectric Resonator Antenna,” IEEE Antenna and Propagation Society International Symposium, pp. 1-2, Chicago, United State of America, July 8-14, 2012.
- S. Jarchi, J. Rashed-Mohassel and M. H. Neshati, “Mutual Coupling of Rectangular DRA in a Four Element Circular Array,” PIER Online, Vol. 3, No. 1, pp. 114-117, 2007.
- S. Krusevac, P. B. Rapajic, R. A. Kennedy and P. Sadeghi, “Mutual Coupling Effect on Thermal Noise in Multi-antenna Wireless Communication Systems,” 6 th Proceeding of Communication Theory Workshop, Brisban Old., Australian, pp. 209-214, Feb 2-4, 2005.
- C. A. Balanis, “Advanced Engineering Electromagnetics,” John Wiley & Sons, Inc., New York, United State of America, 1989.