

การสร้างกัณน้อสซิลเลเตอร์ย่านความถี่ X เพื่อการศึกษา

นัฐชยพงศ์ อีรัชตระกูล

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์ลำปาง อำเภอห้างฉัตร จังหวัดลำปาง 52190

อีเมลของผู้ประพันธ์บรรณกิจ: natchayapong@hotmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างกัณน้อสซิลเลเตอร์ (Gunn oscillator) ย่านความถี่ X ที่ปรับความถี่ได้ สำหรับการศึกษาและทดลองทางไมโครเวฟ อุปกรณ์ทำงานบนหลักการปรับโพรงเรโซแนนซ์ (resonant cavity perturbation) โดยใช้วัสดุไดอิเล็กทริกเป็นตัวเปลี่ยนสนามไฟฟ้าในโพรง ผลการทดสอบแสดงว่าอุปกรณ์ต้นแบบสามารถปรับความถี่ได้ในช่วง 11.1034 ถึง 13.0345 GHz (จากการทดลองเลื่อนหาจุดต่ำสุดของคลื่นนิ่ง) และช่วงการปรับด้วยวัสดุไดอิเล็กทริกหลักอยู่ที่ 11.865 ถึง 12.355 GHz วัสดุที่ใช้ทดสอบได้แก่ Polytetrafluoroethylene (PTFE, เทฟลอน), Polyvinyl chloride (PVC, พีวีซี) และ Polymethyl methacrylate (PMMA, อะคริลิก) โดยอะคริลิกแสดงความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างตำแหน่งการแทรกกับความถี่ได้ดีที่สุด อุปกรณ์นี้จึงมีศักยภาพสูงสำหรับการประยุกต์เป็นชุดทดลองด้านทัศนศาสตร์ไมโครเวฟและเทคโนโลยีการสื่อสารคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

คำสำคัญ: ไมโครเวฟ, ย่านความถี่ X, กัณน้อสซิลเลเตอร์, วัสดุไดอิเล็กทริก, โพรงเรโซแนนซ์

Design and Construction of an X-band Gunn Oscillator for Education

Natchayapong Teerachtragoon

Thammasat University, Lampang Center, Hang Chat District, Lampang 52190, Thailand

Corresponding author's e-mail: natchayapong@hotmail.com

Abstract

This study aims to develop a tunable X-band Gunn oscillator for microwave education and experimental purposes. The device operates based on the principle of resonant cavity perturbation, using dielectric materials to modify the electric field within the cavity. Test results show that the prototype can be tuned over the range of 11.1034 - 13.0345 GHz (based on the experiment of moving to the minimum point of the standing wave), with the main dielectric tuning range between 11.865 and 12.355 GHz. The tested materials include Polytetrafluoroethylene (PTFE, Teflon), Polyvinyl chloride (PVC), and Polymethyl methacrylate (PMMA, Acrylic), with PMMA showing the best linear relationship between insertion position and frequency. Therefore, this device has high potential for application as a laboratory setup in microwave optics and electromagnetic wave communication technologies.

Keywords: Microwave, X-band, Gunn oscillator, Dielectric materials, Resonant cavity

บทนำ

กัณน้อสซิลเลเตอร์เป็นอุปกรณ์สำคัญในการสร้างสัญญาณไมโครเวฟในย่านความถี่ X-band (8 ถึง 12 GHz) ซึ่งนิยมใช้ในงานสื่อสารและการทดลองทางฟิสิกส์ อย่างไรก็ตาม อุปกรณ์เชิงพาณิชย์มีราคาสูงและไม่สามารถปรับความถี่ได้ ทำให้การใช้งานในห้องปฏิบัติการศึกษาเกิดข้อจำกัด

งานวิจัยจำนวนมากจึงมุ่งพัฒนาต้นแบบราคาประหยัด โดยใช้วัสดุทั่วไปพร้อมกับแนวคิดวิศวกรรมย้อนรอย (reverse engineering) (Lüy, 2007) เพื่อส่งเสริมการเรียนรู้เกี่ยวกับโพรงเรโซแนนซ์และการปรับความถี่ในระบบไมโครเวฟ (Hayt & Buck, 2012) นอกจากนี้ยังมีงานของ Solano et al. (2002) ซึ่งได้พัฒนากัณน้อสซิลเลเตอร์เพื่อการเรียนการสอนระดับมหาวิทยาลัย แสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ของการออกแบบต้นแบบราคาประหยัดสำหรับการศึกษา

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งออกแบบและสร้างกัณน้อสซิลเลเตอร์ที่สามารถปรับความถี่ได้ โดยใช้เทคนิคการปรับโพรงเรโซแนนซ์ด้วยวัสดุไดอิเล็กทริก เพื่อเพิ่มศักยภาพในการเรียนการสอนและการทดลองทางไมโครเวฟ

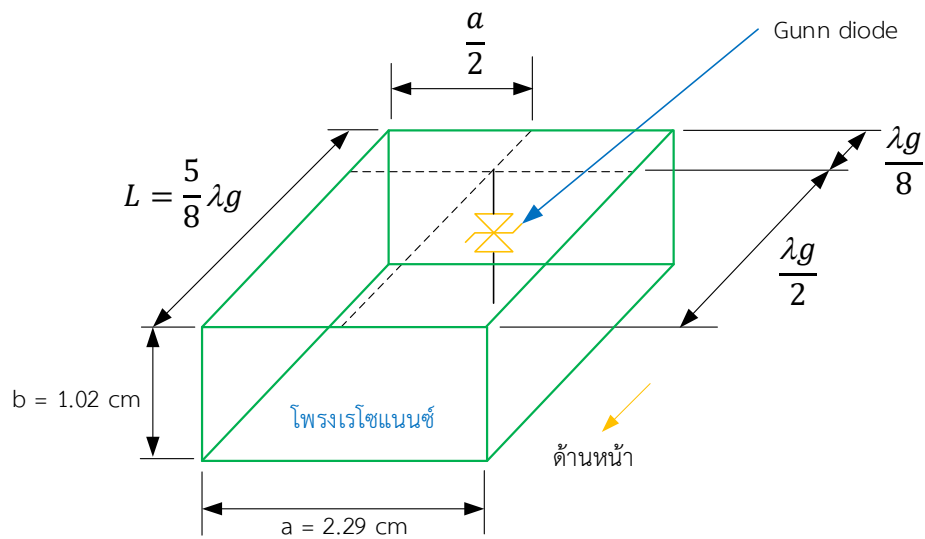
หลักการพื้นฐาน

กัณน้อสซิลเลเตอร์ (Gunn oscillator)

กัณน้อไดโอด (Gunn Diode) เป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำชนิด N-type แม้จะไม่มีรอยต่อแบบ PN เหมือนไดโอดทั่วไป แต่จัดอยู่ในกลุ่มอุปกรณ์สองขั้วที่แสดงคุณสมบัติความต้านทานเชิงลบ (Negative Differential Resistance) หรือที่รู้จักกันในชื่อ Transferred Electron Device (อุปกรณ์อิเล็กตรอนถ่ายโอน) (Butts & El-Ghazaly, 2023) คุณสมบัติเหล่านี้ทำให้กัณน้อไดโอดเป็นส่วนประกอบสำคัญของกัณน้อสซิลเลเตอร์ ซึ่งทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดคลื่นไมโครเวฟ ด้วยโครงสร้างที่เรียบง่ายและต้นทุนต่ำ กัณน้อสซิลเลเตอร์จึงเหมาะสำหรับใช้ในงานวิจัยและการศึกษาในห้องปฏิบัติการ โดยทั่วไปสามารถทำงานในช่วงความถี่ตั้งแต่ 1 ถึง 100 GHz และให้กำลังส่งเอาต์พุตอยู่ในช่วงประมาณ 1 mW ถึง 5 W ซึ่งเหมาะสมกับการใช้งานที่ต้องการสัญญาณไมโครเวฟพลังงานต่ำ (Hasan et al., 2022)

การออกแบบโพรงเรโซแนนซ์

โพรงเรโซแนนซ์ (resonant cavity) มีบทบาทสำคัญในการดึงพลังงานไมโครเวฟจากกัณน้อไดโอดได้อย่างมีประสิทธิภาพ เมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่เหมาะสมจะส่งผลต่อประสิทธิภาพและความเสถียรของสัญญาณ (Hasan et al., 2022) งานวิจัยนี้เลือกใช้โพรงเรโซแนนซ์รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าในโหมด TE₁₀ ขนาด $a = 2.29$ cm และ $b = 1.02$ cm ตามมาตรฐานท่อนำคลื่น WR90 ที่รองรับย่านความถี่แถบ X (Solano et al., 2002) โดยติดตั้งกัณน้อไดโอดบริเวณกึ่งกลางโพรงและกำหนดระยะห่างจากผนังให้สัมพันธ์กับความยาวคลื่นในท่อนำคลื่น ดังแสดงในภาพที่ 1 ซึ่งคำนวณจากสมการพื้นฐานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในโพรงเรโซแนนซ์



ภาพที่ 1 แสดงตำแหน่งของกันนำไดโอดและขนาดของโพรงเรโซแนนซ์

เมื่อกำหนดความถี่ที่ 11 GHz จะคำนวณความยาวคลื่นในอากาศ (λ_0 , free-space wavelength)

$$\lambda_0 = \frac{C}{f} = \frac{3 \times 10^{10} \text{ cm/s}}{11^{10} \text{ Hz}} = 2.72727 \text{ cm} \quad (1)$$

ความยาวคลื่นคัตออฟ (λ_c , cutoff wavelength) หาได้จาก

$$\lambda_c = \frac{2ab}{(n^2 b^2 + m^2 a^2)^{1/2}}$$

ในโหมด TE₁₀ นั้น $m = 0$ และ $n = 1$ ดังนั้น

$$\lambda_c = 2a = 2(2.29 \text{ cm}) = 4.58 \text{ cm}$$

ความถี่ตัดขาด (f_c , Cutoff frequency) หาได้จาก

$$f_c = \frac{C}{\lambda_c} = \frac{3 \times 10^{10} \text{ cm/s}}{4.58 \text{ cm}} = 6.550 \text{ GHz}$$

ความยาวคลื่นในท่อนำคลื่น (λ_g , wavelength in waveguide) หาได้จาก

$$\begin{aligned}\lambda_g &= \frac{\lambda_o}{[1 - (\frac{\lambda_o}{\lambda_c})^2]^{1/2}} \\ &= \frac{2.72727 \text{ cm}}{[1 - (\frac{2.72727 \text{ cm}}{4.58 \text{ cm}})^2]^{1/2}} \\ &= 3.3948 \text{ cm}\end{aligned}\tag{2}$$

เพราะฉะนั้น ความยาวของโพรงเรโซแนนซ์ (Resonance Cavity Length, L) คือ

$$L = \frac{5}{8} \lambda_g = \frac{5}{8} (3.3948 \text{ cm}) = 2.12175 \text{ cm}$$

วัตถุประสงค์การวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและสร้างก้านออสซิลเลเตอร์ย่านความถี่ X ที่สามารถปรับความถี่ได้ โดยใช้เทคนิคการรบกวนโพรงเรโซแนนซ์ด้วยวัสดุไดอิเล็กทริกสำหรับใช้เป็นเครื่องมือการเรียนรู้ในวิชาทัศนศาสตร์ ไมโครเวฟและการสื่อสารด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

ระเบียบวิธีวิจัย

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัยนี้

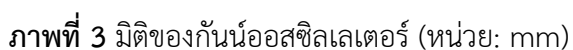
1. ก้านไดโอด ความถี่กลางประมาณ 10.5 GHz และกำลังส่งออกเฉลี่ย 20 mW เช่น MA49006-28 ของ M/A-COM
2. ดิจิทัลมัลติมิเตอร์ (digital multimeter) ยี่ห้อ SANWA รุ่น PC700 สำหรับวัดค่าแรงดันไฟฟ้า

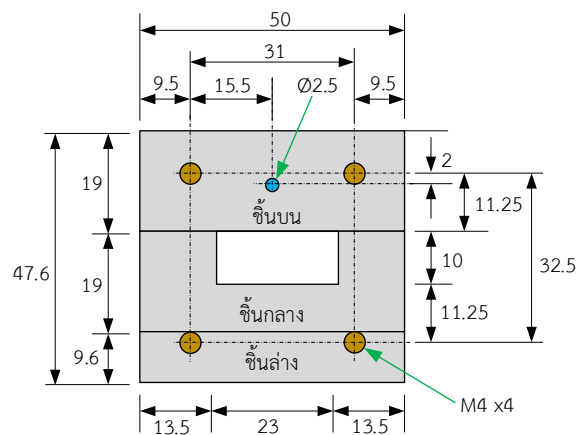
การออกแบบและสร้างก้านออสซิลเลเตอร์ย่านความถี่ X

ก้านออสซิลเลเตอร์ที่ออกแบบและสร้างขึ้นในงานวิจัยนี้ประกอบด้วยโพรงเรโซแนนซ์และชุดฝาปิดอุปกรณ์ตามตำแหน่งต่าง ๆ ดังภาพที่ 2 ก้านไดโอดถูกติดตั้งในระยะ $\lambda_g/2$ หรือ 17 mm ส่วนประกอบย่อยต่าง ๆ แสดงรายละเอียดไว้ในภาพที่ 3 ถึง 15

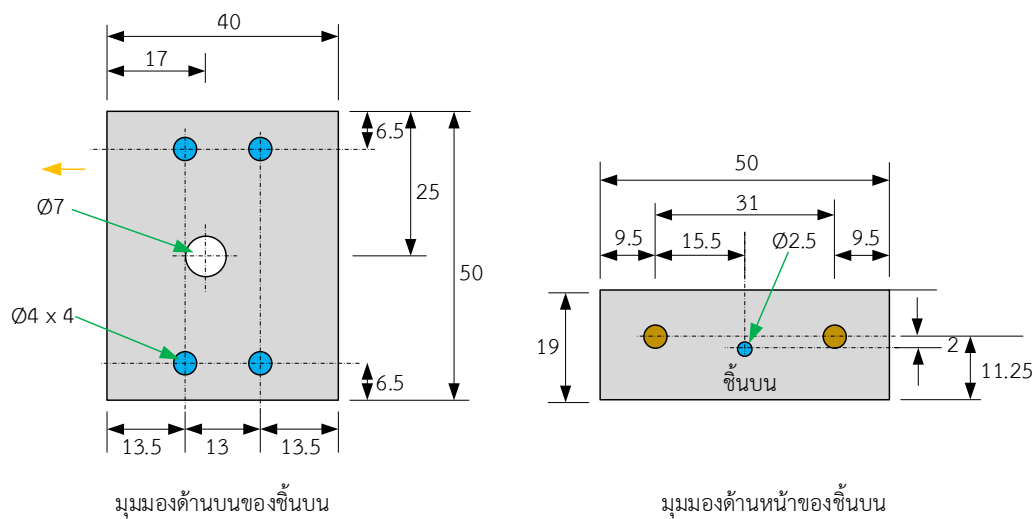


โพรงเรโซแนนซ์สำหรับสร้างสัญญาณไมโครเวฟย่านความถี่ X มีรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาดช่องโพรง 10 mm x 23 mm ออกแบบมาเพื่อรองรับการทำงานในโหมด TE₁₀ โพรงเรโซแนนซ์นี้ผลิตจากอะลูมิเนียม โดยส่วนประกอบอะลูมิเนียมขึ้นบนและขึ้นกลางมีความหนา 19 mm ขณะที่อะลูมิเนียมขึ้นล่างมีความหนา 9.6 mm รายละเอียดด้านมิติและส่วนประกอบต่าง ๆ ของโพรงเรโซแนนซ์สามารถได้จากภาพที่ 3 ถึง 7

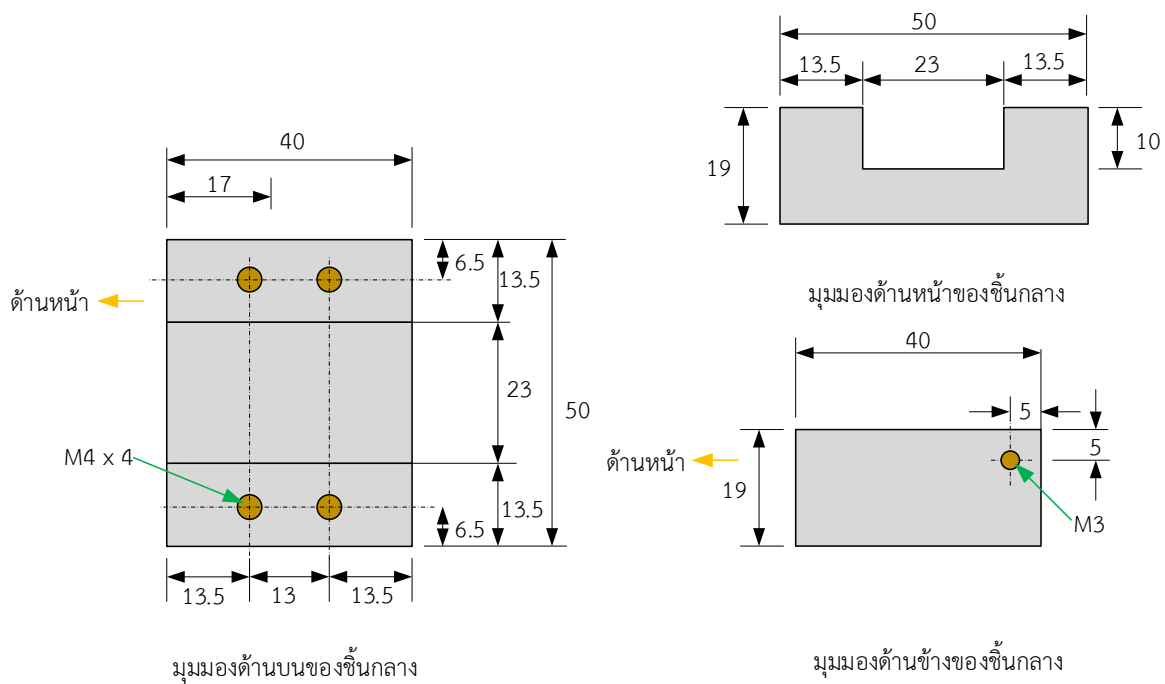




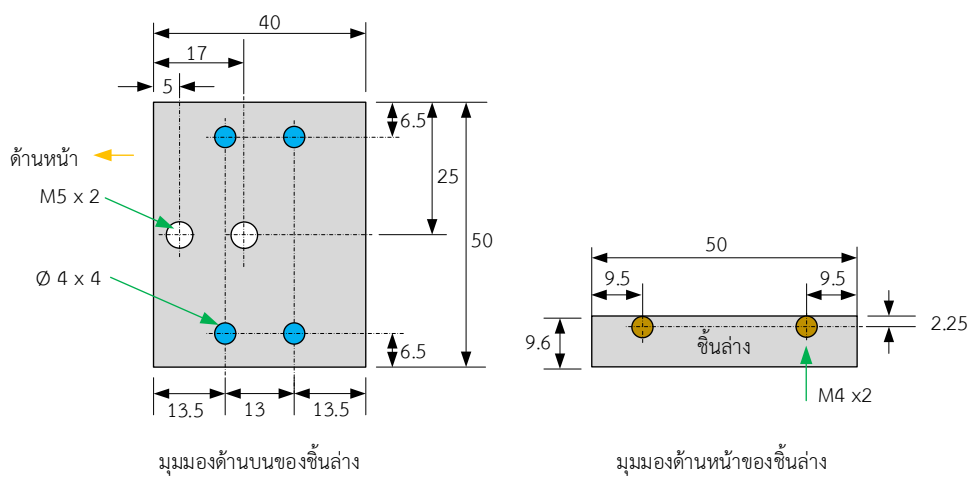
ภาพที่ 4 มิติและลักษณะก้านน้อสซิลเลเตอร์ด้านหน้า (หน่วย: mm)



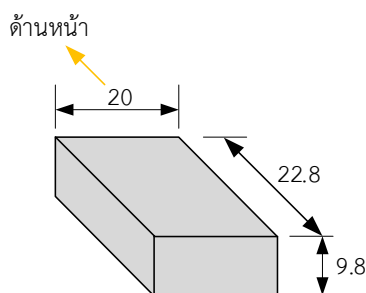
ภาพที่ 5 มิติและลักษณะอะลูมิเนียมชั้นบน (หน่วย: mm)



ภาพที่ 6 มิติและลักษณะอะลูมิเนียมชิ้นกลาง (หน่วย: mm)



ภาพที่ 7 มิติและลักษณะอะลูมิเนียมชิ้นล่าง (หน่วย: mm)



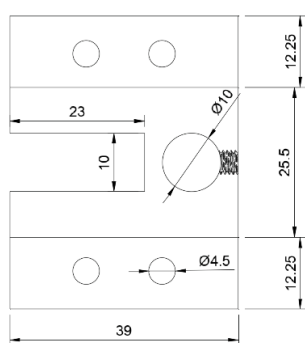
ภาพที่ 8 มิติและลักษณะแผ่นสะท้อนคลื่นแบบเลื่อน (reflector plate) (หน่วย: mm)

การออกแบบฝาปิด

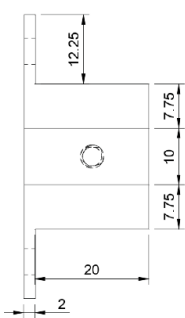
ส่วนฝาครอบโครงเรโซแนนซ์ประกอบด้วยฝาล่าง ฝาหลังและฝาด้านข้าง ซึ่งพิมพ์ขึ้นด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ รายละเอียดมิติของแต่ละชิ้นแสดงไว้ในภาพที่ 9 ถึง 11

1. ฝาด้านล่าง

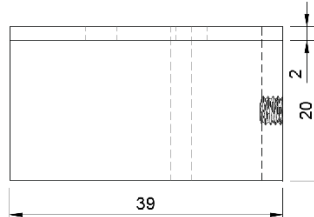
ฝาด้านล่างมีขนาด $39 \times 50 \times 22$ mm (กว้าง $\times$ ยาว $\times$ สูง) ทำหน้าที่เป็นฐานรองรับและยึดตัวถังของกันัน์ ออสซิลเลเตอร์ ออกแบบให้มีช่องสำหรับชั้นสกรูทองเหลืองและสกรูที่ทำจากวัสดุไดอิเล็กทริก รวมถึงสามารถยึดติดกับชุดทดลองไมโครเวฟได้อย่างแข็งแรง นอกจากนี้ ยังสามารถเชื่อมต่อกับก้านเหล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 mm สำหรับปรับตำแหน่งในแนวตั้ง



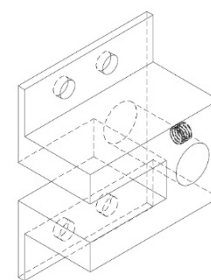
(ก) มุมมองด้านบน



(ข) มุมมองด้านหลัง



(ค) มุมมองด้านข้าง

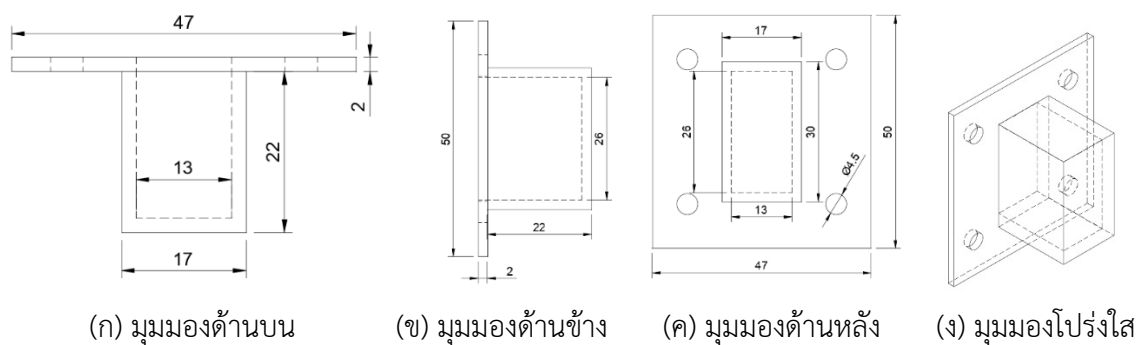


(ง) มุมมองโปร่งใส

ภาพที่ 9 แสดงมิติและลักษณะฝาด้านล่างที่ออกแบบ (หน่วย: mm)

2. ฝาปิดหลัง

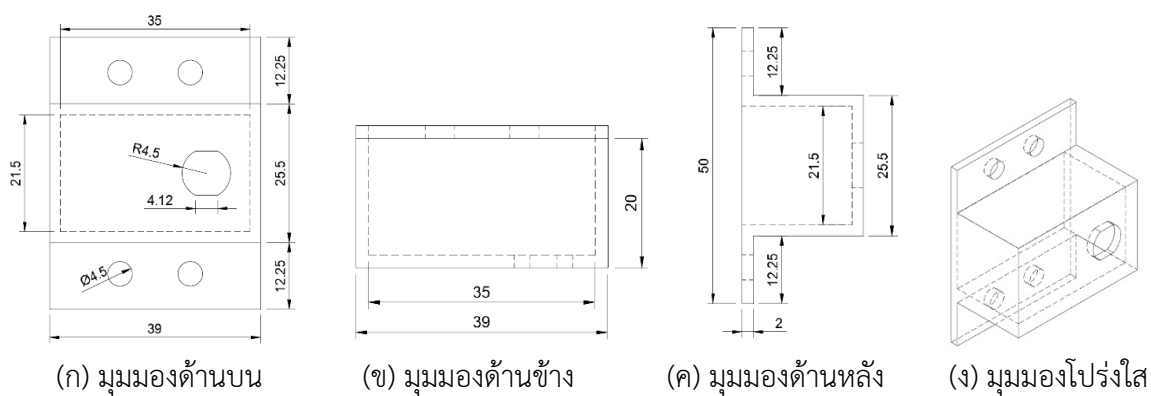
ฝาปิดหลังมีขนาด $47 \times 50 \times 24$ mm (กว้าง $\times$ ยาว $\times$ สูง) ทำหน้าที่ป้องกันการเลื่อนของแผ่นสะท้อนคลื่น มีลักษณะเป็นกล่องทรงกลวงยื่นออกมาจากฐาน



ภาพที่ 10 แสดงมิติและลักษณะฝาปิดหลังที่ออกแบบ (หน่วย: mm)

3. ฝาปิดบน

ฝาปิดบนมีขนาด $39 \times 50 \times 20$ mm (กว้าง $\times$ ยาว $\times$ สูง) ออกแบบเพื่อกันน้ำและฝุ่นจากตัวเครื่อง

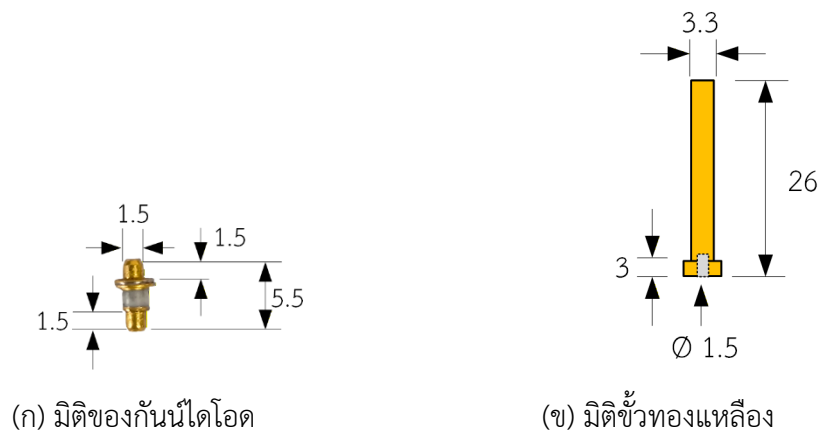


ภาพที่ 11 แสดงมิติและลักษณะฝาปิดบนที่ออกแบบ (หน่วย: mm)

การออกแบบส่วนอื่นๆ

1. ฉนวนและขั้วทองเหลือง

เลือกใช้เทฟลอนเป็นฉนวน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7 mm ยาว 19 mm โดยเจาะรูขนาด 3.3 mm สำหรับใส่ขั้วทองเหลือง ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 ถึง 3.5 mm และความยาวประมาณ 25 ถึง 30 mm ปลายขั้วทองเหลืองมีลักษณะเป็นหลุมเจาะขนาด 1.5 mm ลึก 3 mm ดังแสดงในภาพที่ 12



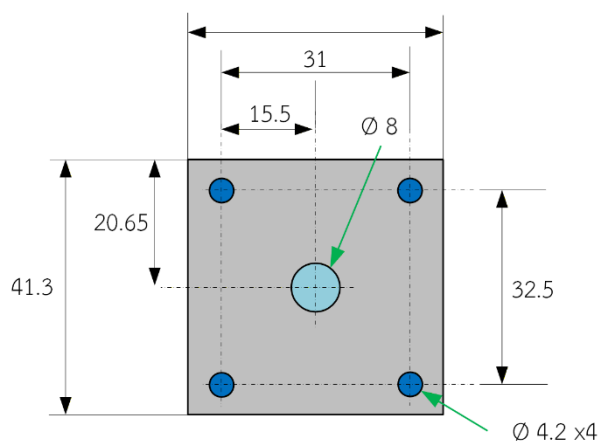
ภาพที่ 12 มิติและลักษณะกันน้ำไดโอดและหัวทองเหลืองสำหรับใส่กันน้ำไดโอด (หน่วย: mm)

2. สกรูทองเหลืองสำหรับยึดกันน้ำไดโอด

เลือกใช้สกรูทองเหลืองขนาด M5 (5 mm) ยาว 25 mm โดยเจาะคว้านปลายสกรูเป็นหลุมเพื่อยึดกันน้ำไดโอด

3. แผ่นเหนี่ยวนำคลื่น (Waveguide flange)

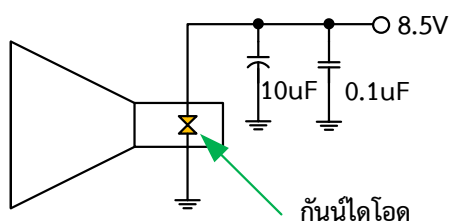
อุปกรณ์นี้มีขนาด $41.3 \times 41.3 \times 2$ mm (กว้าง $\times$ ยาว $\times$ หนา) พร้อมหน้าแปลนตามมาตรฐาน WR-90 (UG-39/U) และมีรูเจาะตรงกลางขนาด 8 mm



ภาพที่ 13 มิติและลักษณะแผ่นเหนี่ยวนำคลื่น (หน่วย: mm)

4. วงจรสำหรับกันน้ำไดโอด

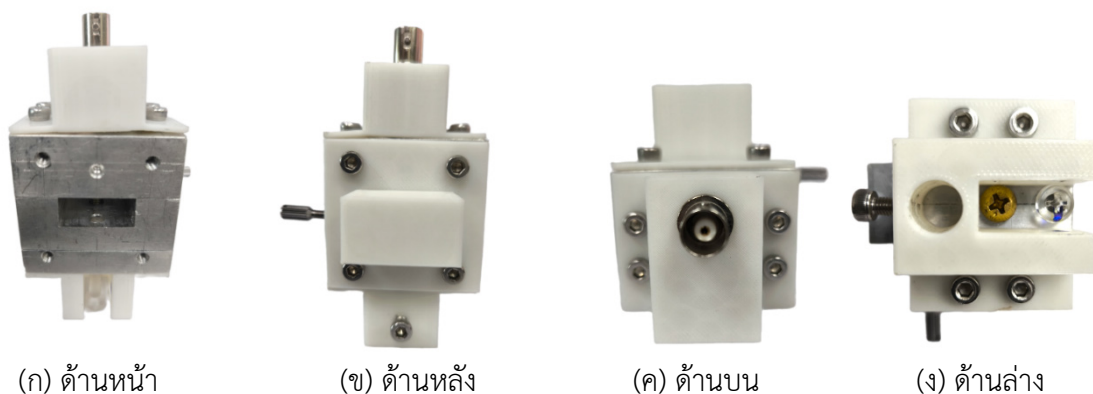
วงจรประกอบด้วยตัวเก็บประจุขนาด $0.1 \mu\text{F}$ และ $10 \mu\text{F}$ (แรงดันใช้งาน 16 V ขึ้นไป) เชื่อมต่อกับขั้วบีเอ็นซีด้วยสายไฟขนาด 24 AWG โดยสายกราวด์จะต่อเข้ากับโครงเรโซแนนซ์และสายไฟบวกต่อเข้ากับหัวทองเหลือง



ภาพที่ 14 วงจรสำหรับกันนไดโอด

การประกอบกันนอสซิลเลเตอร์ต้นแบบ

ทำการประกอบชิ้นส่วนทั้งหมดเข้าด้วยกันเป็นกันนอสซิลเลเตอร์ต้นแบบ ดังแสดงในภาพที่ 15



ภาพที่ 15 ลักษณะกันนอสซิลเลเตอร์ต้นแบบที่ประกอบเสร็จสมบูรณ์แล้ว

การทดลอง

เพื่อประเมินประสิทธิภาพของกันนอสซิลเลเตอร์ที่สร้างขึ้น ผู้วิจัยได้ออกแบบการทดลองไว้ 2 รูปแบบ ได้แก่

- การหาความยาวคลื่น ด้วยวิธีเลื่อนหาจุดต่ำสุด 2 จุด
- การวัดความถี่ด้วยมิเตอร์วัดความถี่ (Frequency Meter)

การหาความยาวคลื่นด้วยวิธีเลื่อนหาจุดต่ำสุด 2 จุด

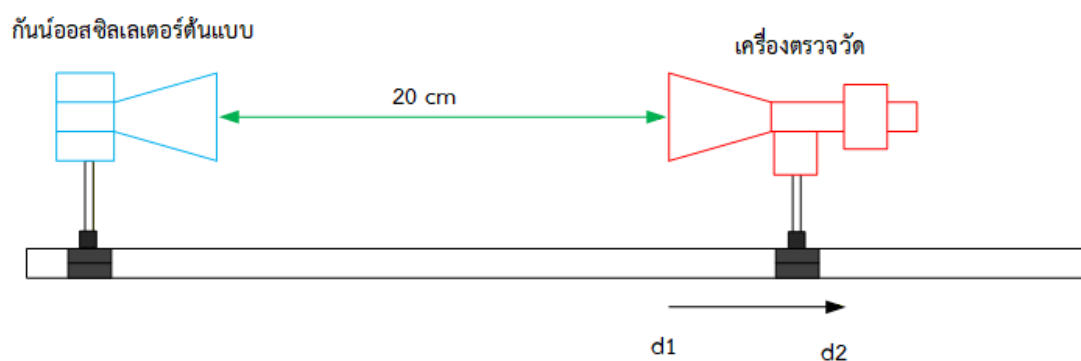
การทดลองหาความยาวคลื่นในอากาศดำเนินไปตามหลักการพื้นฐานของทัศนศาสตร์ไมโครเวฟ โดยอาศัยการวัดระยะระหว่างจุดต่ำสุดของกำลังไฟฟ้า (minimum power point) สองจุดที่ต่อเนื่องกัน ระยะทางระหว่างจุดเหล่านี้เท่ากับครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่นในอากาศ ($\lambda/2$) ตามทฤษฎีคลื่นนิ่ง (standing wave theory) การเลื่อน probe ไปตามท่อไมโครเวฟเพื่อหาจุดต่ำสุดของคลื่นนิ่งช่วยให้สามารถวัดระยะระหว่างจุดต่ำสุดต่อเนื่องกัน ซึ่งสามารถใช้คำนวณความยาวคลื่น λ และความถี่ของสัญญาณ $f = c/\lambda$ ได้อย่างแม่นยำ (Hayt & Buck, 2012)

เครื่องมือและอุปกรณ์

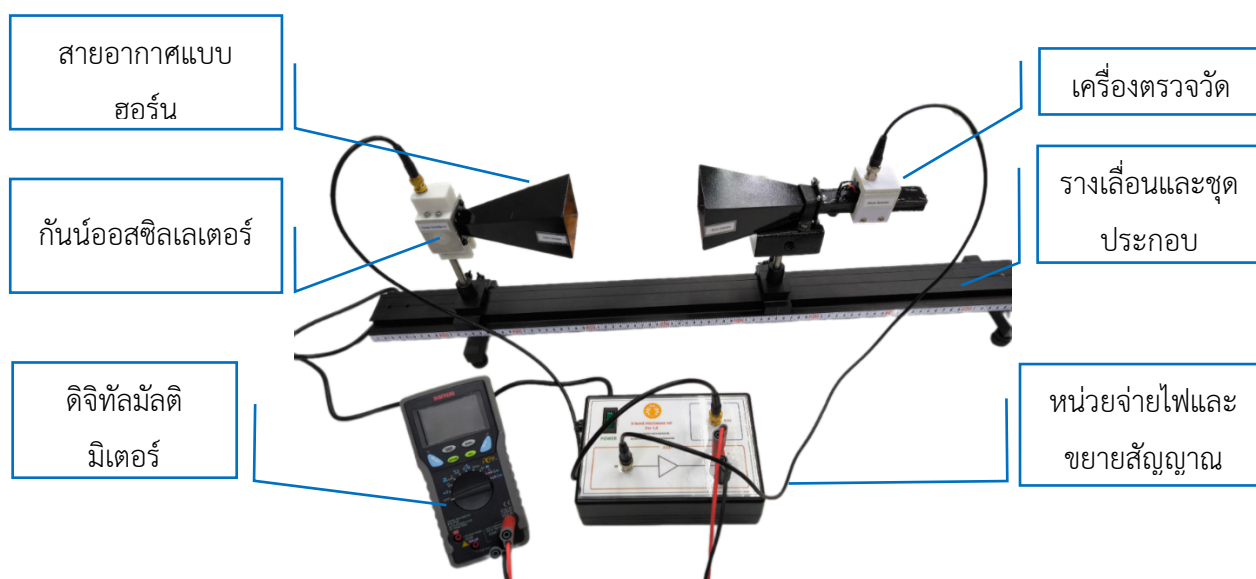
- หน่วยจ่ายไฟและขยายสัญญาณ (Power supply and amplifier unit)	จำนวน 1 ชุด
- ดิจิทัลมัลติมิเตอร์	จำนวน 1 เครื่อง
- กันน้อสซิลเลเตอร์ต้นแบบ	จำนวน 1 ชุด
- เครื่องตรวจวัด (Detector)	จำนวน 1 ชุด
- รางเลื่อนและชุดประกอบ	จำนวน 1 ชุด
- สายอากาศแบบฮอร์น (Horn Antenna)	จำนวน 2 ตัว

การทดลอง

1. จัดเครื่องมือการหาความยาวคลื่นด้วยวิธีเลื่อนหาจุดต่ำสุด 2 จุด ดังภาพที่ 16 และ 17



ภาพที่ 16 แสดงลักษณะการหาความยาวคลื่นด้วยวิธีเลื่อนหาจุดต่ำสุด 2 จุด



ภาพที่ 17 การจัดเครื่องมือทดลองหาความยาวคลื่นด้วยวิธีจุดต่ำสุด 2 จุด

2. เชื่อมต่อวงจรสำหรับวัดแรงดัน จากนั้นเลื่อนแผ่นสะท้อนคลื่นด้านหลังกันน้อสซิลเลเตอร์เข้า-ออกช้าๆ จนได้ตำแหน่งที่ให้แรงดันสูงสุด แล้วจึงขันยึดให้แน่น

3. หลังจากจ่ายไฟให้ตัวส่งสัญญาณแล้ว ให้เลื่อนตัวรับครึ่งละ 1 - 2 mm เพื่อหาตำแหน่งแรงดันต่ำสุดแรก (d1) และตำแหน่งแรงดันต่ำสุดถัดไป (d2) บันทึกค่า d1, d2 และค่าแรงดัน ทำซ้ำประมาณ 10 ชุดข้อมูล

การวัดความถี่ด้วยมิเตอร์วัดความถี่

ในการทดลองนี้ได้เลือกใช้วัสดุไดอิเล็กทริก 3 ชนิด ได้แก่

1. เทฟลอน
2. พีวีซี
3. อะคริลิก

โดยวัสดุทั้งหมดถูกแปรรูปเป็นสกรูเกลียวมาตรฐาน M5 ความยาว 30 ถึง 35 mm ใช้สำหรับปรับความถี่ภายในกันน้อสซิลเลเตอร์



(ก) เทฟลอน



(ข) พีวีซี



(ค) อะคริลิก

ภาพที่ 18 ลักษณะสกรูไดอิเล็กทริกทั้ง 3 ชนิด

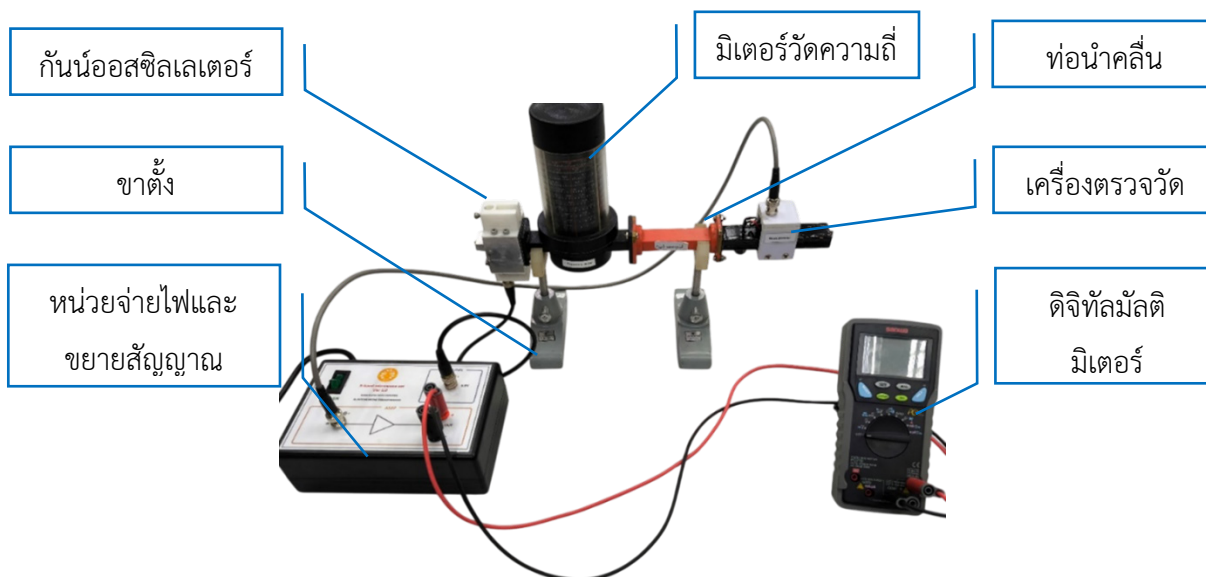
เครื่องมือและอุปกรณ์

- หน่วยจ่ายไฟและขยายสัญญาณ	จำนวน 1 ชุด
- ดิจิทัลมัลติมิเตอร์	จำนวน 1 เครื่อง
- กันน้อสซิลเลเตอร์ต้นแบบ	จำนวน 1 ชุด
- เครื่องตรวจวัด	จำนวน 1 ชุด
- ชุดขาตั้ง (stand set) และท่อนำคลื่น	จำนวน 1 ชุด
- มิเตอร์วัดความถี่	จำนวน 1 ตัว
- ไดอิเล็กทริกสำหรับทดลอง	จำนวน 3 ชนิด

การทดลอง

1. ปรับระดับสกรูเทฟลอนซึ่งทำหน้าที่เป็นไดอิเล็กทริกให้อยู่ในระนาบเดียวกับพื้นผิวก่อนประกอบเข้ากับชุดทดลองและทำเครื่องหมายตำแหน่งบนสกรูเพื่อสะดวกในการนับเกลียว

2. พลิกด้านล่างของก้านออสซิลเลเตอร์ต้นแบบขึ้นด้านบนเพื่อสะดวกในการไขสกรูไดโอดเล็กทริก แล้วติดตั้งเข้ากับเครื่องวัดความถี่, ท่อนำคลื่นและเครื่องตรวจวัด



ภาพที่ 19 การจัดเครื่องมือวัดความถี่ด้วยมิเตอร์วัดความถี่

3. ต่อวงจรเพื่อวัดแรงดันเช่นเดียวกับการใช้งานปกติ
4. หมุนเครื่องวัดความถี่ไปที่ประมาณ 10 GHz และค่อย ๆ เพิ่มความถี่ช้า ๆ จนกระทั่งวัดค่าแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดได้ด้วยดิจิตอลมัลติมิเตอร์ จากนั้นบันทึกค่าความถี่ประมาณการที่ได้จากเครื่องวัดความถี่
5. หมุนเครื่องวัดความถี่ให้มีค่าสูงหรือต่ำกว่าความถี่ประมาณการอย่างน้อย 15 ค่า
6. ทำการบันทึกผลการทดสอบ
7. หมุนสกรูไดโอดเล็กทริกวัสดุเทฟลอนไปที่ตำแหน่ง 2, 4, 6, 8, 10 และ 12 รอบ โดยใช้ไขควงปรับตามเข็มนาฬิกา (หมุนเข้า) ให้เครื่องหมายสับนสกรูตรงกับขอบที่แต้มสีไว้
8. เปลี่ยนวัสดุไดโอดเล็กทริกจากเทฟลอนเป็นพีวีซีและอะคริลิก
9. ทำซ้ำการทดสอบตั้งแต่ข้อ 1 ถึง 7

ผลการวิจัย

ผลการทดลองการหาความยาวคลื่นด้วยวิธีเลื่อนหาจุดต่ำสุด 2 จุด

จากตารางที่ 1 ข้อมูลที่ได้ สามารถคำนวณค่าเฉลี่ยของความถี่ได้ที่ 11.56 ± 0.65 GHz และค่าเฉลี่ยความยาวคลื่นอยู่ที่ 2.61 ± 0.64 cm ค่าเฉลี่ยความถี่ดังกล่าวใกล้เคียงกับเป้าหมายที่ออกแบบไว้และอยู่ในช่วงที่เหมาะสมสำหรับย่านความถี่ X ที่กำหนดในการทดลอง

ตารางที่ 1 แสดงผลการทดลองการหาความยาวคลื่นด้วยวิธีเลื่อนหาจุดต่ำสุด 2 จุด

ตำแหน่งใหม่ d2 (cm)	ตำแหน่งเดิม d1 (cm)	$\Delta d = d2 - d1$ (cm)	$\lambda = 2\Delta d$ (cm)	ความถี่ (GHz)	ความไม่แน่นอน ($\delta\lambda$) (cm)	ความคลาดเคลื่อน สัมพัทธ์ (%)
60.05	61.35	1.30	2.60	11.5305	0.141	5.42
61.35	62.65	1.30	2.60	11.5305	0.141	5.42
62.65	64.00	1.35	2.70	11.1034	0.141	5.22
64.00	65.30	1.30	2.60	11.5305	0.141	5.42
65.30	66.70	1.40	2.80	10.7068	0.141	5.04
66.70	68.00	1.30	2.60	11.5305	0.141	5.42
68.00	69.30	1.30	2.60	11.5305	0.141	5.42
69.30	70.45	1.15	2.30	13.0345	0.141	6.13
70.45	71.70	1.25	2.50	11.9917	0.141	5.64
71.70	73.05	1.35	2.70	11.1034	0.141	5.22

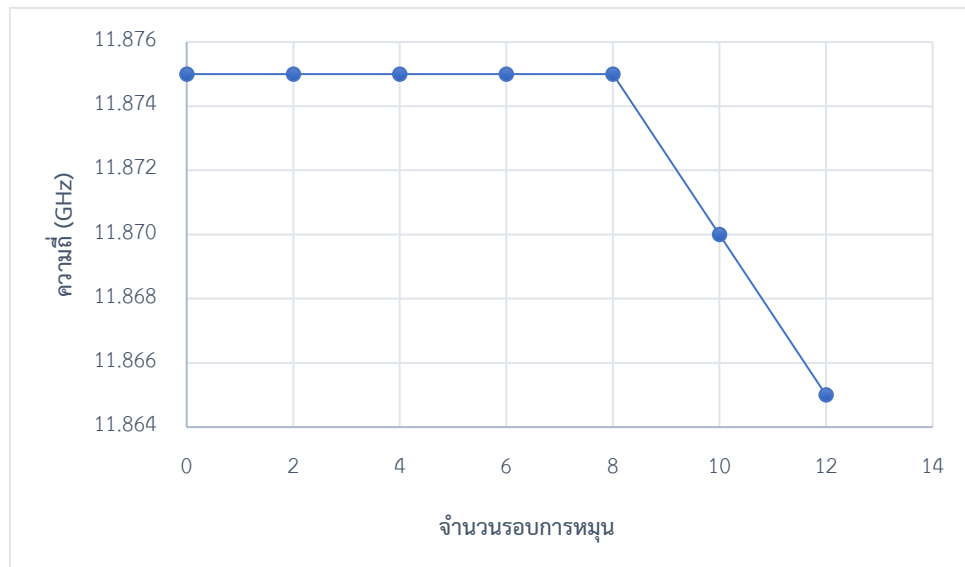
ผลการทดลองการวัดความถี่ด้วยมิเตอร์วัดความถี่

ภาพที่ 20 ถึง 22 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบการหมุนของสกรูไดโอดเล็กทริกกับความถี่ที่วัดได้ สำหรับวัสดุเทฟลอน, พีวีซี และอะคริลิกตามลำดับ จะเห็นได้ว่าแต่ละวัสดุมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงของความถี่ที่แตกต่างกัน โดยเฉพาะกราฟของอะคริลิกแสดงแนวโน้มเชิงเส้นที่เด่นชัดกว่าวัสดุอื่น ๆ

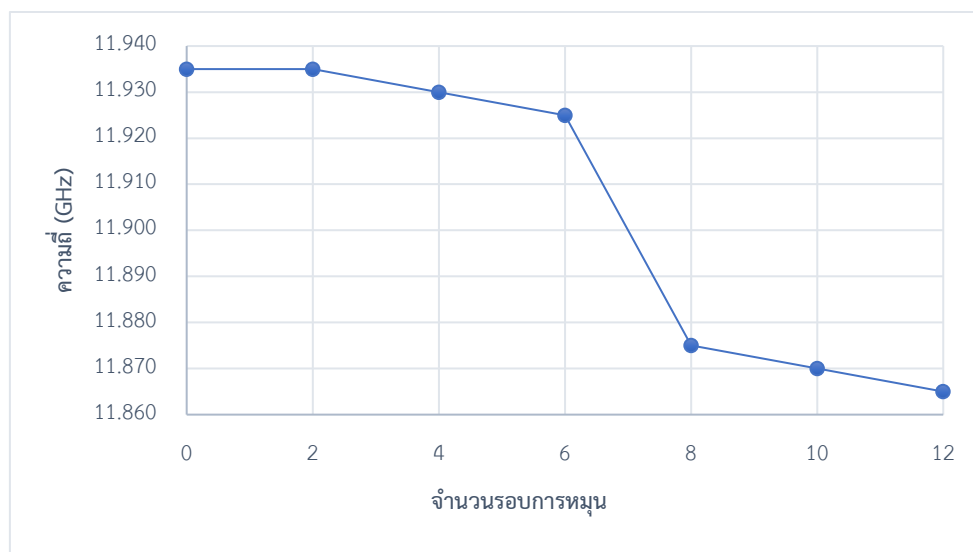
จากผลการทดลองพบว่า ช่วงความถี่ทั้งหมดที่ได้จากการเลื่อนหาจุดต่ำสุดอยู่ระหว่าง 11.1034 ถึง 13.0345 GHz ขณะที่ช่วงการปรับด้วยวัสดุไดโอดเล็กทริกอยู่ในช่วง 11.865 - 12.355 GHz ซึ่งเป็นเพียงช่วงย่อยของย่านดังกล่าว

การปรับความถี่ไม่สามารถทำได้ต่อเนื่องตลอดช่วง เนื่องจากการหมุนสกรูไดโอดเล็กทริกแต่ละชนิดส่งผลต่อปริมาตรโพรงและค่าคงที่ไดโอดเล็กทริกที่ต่างกัน ทำให้การเลื่อนความถี่เกิดขึ้นแบบไม่เชิงเส้นในบางส่วนของกราฟ

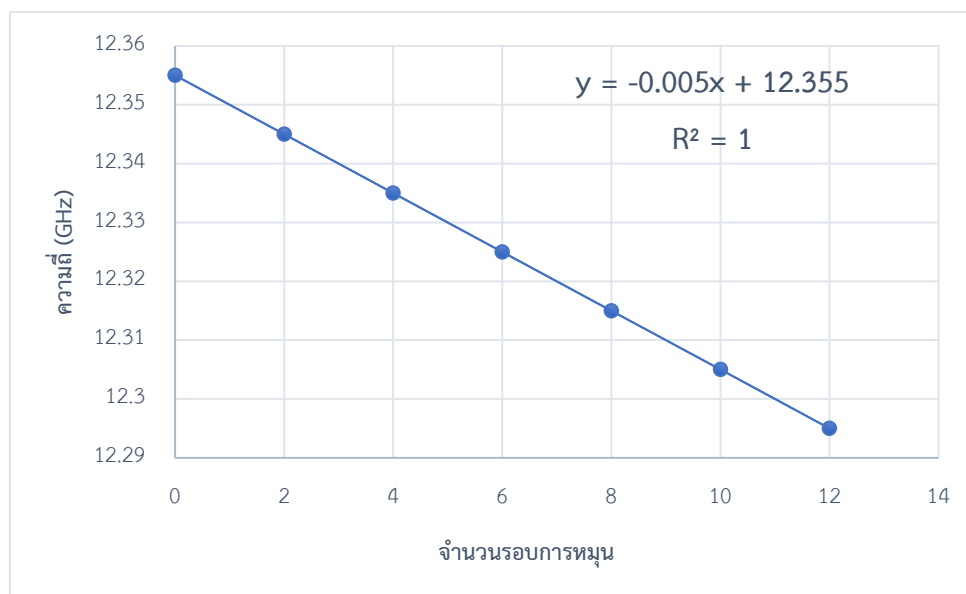
ผลนี้สอดคล้องกับทฤษฎีการปรับโพรงเรโซแนนซ์ (resonant cavity perturbation) ซึ่งอธิบายว่าการแทรกวัสดุไดโอดเล็กทริกในโพรงจะเปลี่ยนแปลงสนามไฟฟ้าและทำให้ความถี่เรโซแนนซ์เลื่อน (Butts & El-Ghazaly, 2023; Hasan et al., 2022)



ภาพที่ 20 แสดงผลของวัสดุเทฟลอน



ภาพที่ 21 แสดงผลของวัสดุพีวีซี



ภาพที่ 22 แสดงของวัสดุอะคริลิก

อภิปรายผล

จากการทดสอบความยาวคลื่นด้วยวิธีเลื่อนหาจุดต่ำสุด 2 จุด (ภาพที่ 17) และคำนวณย้อนกลับเป็นค่าความถี่พบว่ากันน้อสซิลเลเตอร์ต้นแบบสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพในย่านความถี่ X โดยมีความถี่เฉลี่ยเท่ากับ 11.56 ± 0.65 GHz ซึ่ง สอดคล้องกับผลจากการวัดตรงด้วยเครื่องวัดความถี่ โดยมีความคลาดเคลื่อนเพียงร้อยละ 5.09 ถือว่าอยู่ในเกณฑ์ยอมรับได้สำหรับงานวิจัยระดับปริญญาตรี (Hayt & Buck, 2012)

จากการทดลองด้วยวัสดุไดอิเล็กทริกทั้งสามชนิด พบว่าสามารถปรับความถี่ได้ในช่วง 11.865 ถึง 12.355 GHz โดยเฉพาะอะคริลิกซึ่งแสดงความสัมพันธ์เชิงเส้นชัดเจน ($R^2 = 1.00$) แสดงถึงความสามารถในการควบคุมความถี่ได้แม่นยำ เหมาะสำหรับการใช้ในการสอนและการทดลองเบื้องต้น

อย่างไรก็ตาม การปรับความถี่ไม่ได้เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องตลอดย่าน 11.1034 ถึง 13.0345 GHz แต่เกิดเป็นช่วงย่อยตามชนิดของวัสดุไดอิเล็กทริก ซึ่งสอดคล้องกับหลักการการปรับโพรงเรโซแนนซ์ (resonant cavity perturbation) ที่ระบุว่าการเปลี่ยนแปลงความถี่ขึ้นอยู่กับค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (ϵ_r) ของวัสดุและตำแหน่งการแทรก (Hasan et al., 2022; Butts & El-Ghazaly, 2023)

วัสดุแต่ละชนิดจึงให้ช่วงห่างของการปรับความถี่แตกต่างกัน โดยเทฟลอนมีการเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุดในขณะที่อะคริลิกให้ช่วงปรับที่กว้างและมีความสัมพันธ์เชิงเส้นเด่นชัด ซึ่งสอดคล้องกับผลที่แสดงในภาพที่ 20 ถึง 22

สรุปผลการวิจัย

ผลการวิจัยยืนยันว่ากันน้อสซิลเลเตอร์ย่านความถี่ X ที่พัฒนาขึ้นสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีความถี่เฉลี่ย 11.56 ± 0.65 GHz ซึ่งคลาดเคลื่อนจากค่าออกแบบประมาณร้อยละ 5.09 และสอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของงานวิจัย

อุปกรณ์สามารถปรับความถี่ได้ในช่วง 11.1034 ถึง 13.0345 GHz (จากการทดลองเลื่อนหาจุดต่ำสุด) และช่วงย่อย 11.865 ถึง 12.355 GHz (จากการใช้วัสดุไดอิเล็กทริก) ผ่านเทคนิคการปรับโพรงเรโซแนนซ์ (resonant cavity perturbation)

จากการทดลองวัสดุไดอิเล็กทริก 3 ชนิด ได้แก่ เทฟลอน, พีวีซี และอะคริลิก พบว่าอะคริลิกแสดงความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างตำแหน่งการแทรกกับความถี่ได้ชัดเจนที่สุด ($R^2 = 1.00$) โดยสามารถปรับความถี่ได้เฉลี่ยประมาณ 5 MHz ต่อรอบการหมุน

อุปกรณ์ที่พัฒนาขึ้นจึงเหมาะสำหรับใช้เป็นเครื่องมือการเรียนรู้ในวิชาทัศนศาสตร์ไมโครเวฟและการสื่อสารด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เนื่องจากต้นทุนต่ำ ใช้งานง่าย และให้ผลลัพธ์ที่แม่นยำ

ข้อเสนอแนะการวิจัย

เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของกันน้อสซิลเลเตอร์ต้นแบบและความแม่นยำของผลการวัดในการวิจัยเชิงทดลอง งานวิจัยนี้จึงเสนอแนะแนวทางในการปรับปรุงในด้านต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

ด้านการออกแบบและอุปกรณ์

- เพื่อเพิ่มความมั่นคงของโครงสร้าง แนะนำให้รวมชิ้นส่วนอะลูมิเนียมชั้นกลางและล่างขึ้นรูปเป็นชิ้นเดียว ซึ่งจะทำให้ชิ้นงานมีความสูงประมาณ 30 mm เพื่อหลีกเลี่ยงการเจาะรูใกล้รอยต่อระหว่างชิ้นและรองรับการยึดติดอุปกรณ์เสริมได้อย่างมั่นคงยิ่งขึ้น
- พิจารณาใช้เครื่องมือวัดที่มีความละเอียดและเสถียรภาพสูงขึ้น เช่น ระบบควบคุมด้วยสเต็ปเปอร์มอเตอร์ เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการปรับตำแหน่งและลดความคลาดเคลื่อนจากการควบคุมด้วยมือ

ด้านการทดลอง

- พัฒนาระบบบันทึกข้อมูลอัตโนมัติ โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ เช่น Arduino เพื่อช่วยในการวัดและเก็บค่าแรงดันไฟฟ้าหรือตำแหน่งของจุดวัดบนรางเลื่อนอย่างต่อเนื่องและแม่นยำ
- ขยายขอบเขตการทดลอง เพื่อศึกษาปฏิสัมพันธ์ระหว่างคลื่นไมโครเวฟกับวัสดุต่างชนิด เช่น แก้ว, พลาสติก หรือโลหะ ซึ่งจะช่วยให้เข้าใจเกี่ยวกับคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า
- ทดลองปรับความถี่อย่างละเอียด เพื่อศึกษาพฤติกรรมของคลื่นในย่านความถี่แคบ ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการศึกษารอบวงและการส่งผ่านโพรงเรโซแนนซ์

ด้านความปลอดภัยและการใช้งาน

- ควรเพิ่มมาตรการด้านความปลอดภัย เช่น หลีกเลี่ยงการสัมผัสเสาอากาศโดยตรงและไม่วางอุปกรณ์รับสัญญาณไว้ในแนวการแพร่กระจายของคลื่นไมโครเวฟขณะทำการทดลอง เพื่อป้องกันผลกระทบจากการแผ่พลังงาน
- จากการทดลองพบว่าไฟฟ้าสถิตส่งผลต่อความเสถียรของสัญญาณแรงดัน จึงควรติดตั้งสายดินเพิ่มเติมให้กับอุปกรณ์ เพื่อป้องกันสัญญาณรบกวนและเพิ่มความเสถียรของผลการทดลอง

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากงบประมาณรายจ่ายจากรายได้มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2567 ผู้เขียนขอขอบคุณสาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์ลำปาง สำหรับการสนับสนุนสถานที่ ห้องปฏิบัติการและอุปกรณ์ที่จำเป็นต่อการดำเนินงานวิจัย นอกจากนี้ขอขอบคุณแพลตฟอร์มตรวจสอบไวยากรณ์ ได้แก่ ChatGPT, Gemini และ DeepSeek ที่ช่วยในการปรับแก้ถ้อยคำของบทความฉบับนี้

เอกสารอ้างอิง

- Butts, L., & El-Ghazaly, S. M. (2023). The wideband tunability of double Gunn diodes. *AIP Advances*, 13(3), 035322.
- Hasan, M., Nishiyama, E., & Toyoda, I. (2022). Multi-layer approach of polarization agile oscillating-type active integrated array antennas for RF-transmitter front-end. *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, 14(2), 151–158.
- Hayt, W. H., Jr., & Buck, J. A. (2012). *Engineering electromagnetics* (8th ed.). McGraw Hill.
- Lüy, Ü. (2007). *Millimeter wave Gunn diode oscillators* [Master's thesis, Middle East Technical University].
- Solano, M. A., Ipiña, J. S., Zamanillo, J. M., & Pérez-Vega, C. (2002). X-band Gunn diode oscillator for a multiple-frequency continuous-wave radar for educational purposes. *IEEE Transactions on Education*, 45(4), 316–319.