# การทดลองที่ 8 การวัดคลื่นนิ่ง

## 8.1. วัตถุประสงค์ในการทดลอง

1. เพื่อให้นักศึกษามีความเข้าใจเกี่ยวกับคลื่นนิ่ง (standing wave) และคลื่นสะท้อน (reflected wave)

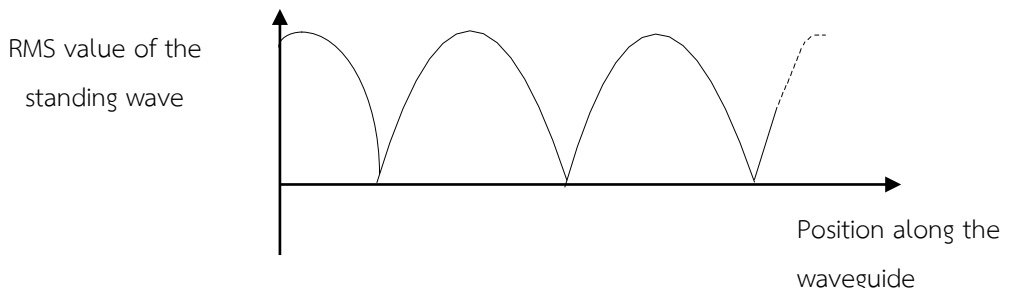
2. เพื่อให้นักศึกษาสามารถวัดขนาดของคลื่นนิ่งโดยการใช้

3. นักศึกษาสามารถอธิบายการเกิดของคลื่นนิ่งได้

## 8.2. หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

เมื่อทำการป้อนสัญญาณไซนูซอยด์ (sinusoid) ให้กับท่อนำคลื่น (waveguide) คลื่นแรงดันและกระแสจะแพร่กระจายไปตามท่อนำคลื่นโดยที่ค่าของแรงดันและกระแสขึ้นอยู่กับอิมพิแดนซ์คุณลักษณะ (characteristic impedance) ของท่อนำคลื่นและโหลดที่นำมาต่อ ถ้าโหลดที่นำมาต่อนั้นแมทช์ (match) กับท่อนำคลื่นคืออิมพีแดนซ์ของโหลดเท่ากับค่าอิมพิแดนซ์คุณลักษณะของท่อนำคลื่น ทำให้โหลดสามารถดูดกลืนเอาพลังงานที่ส่งมาจากแหล่งจ่ายไว้ได้ทั้งหมดโดยไม่เกิดการสะท้อนกลับ (reflected) ดังนั้นคลื่นในท่อนำคลื่นสามรถเดินทางจากแหล่งจ่ายไปยังโหลดทั้งหมด สำหรับกรณีที่โหลดไม่แมทช์ (mismatch) กับท่อนำคลื่นโหลดจะไม่สามารถดูดกลืนเอาพลังงานที่ส่งมาไว้ได้ทั้งหมดและมีพลังงานบางส่วนสะท้อนกลับไปยังแหล่งจ่าย โดยที่การเดินทางของคลื่นทั้งสองมีทิศทางตรงกันข้ามและเมื่อคลื่นทั้งสองรวมกันจะถูกเรียกว่า**คลื่นนิ่ง** (standing wave) ในรูปที่ 1 แสดงผลรวมของคลื่นจากแหล่งจ่ายกับคลื่นที่สะท้อนกลับจากโหลดซึ่งประกอบด้วยแอมพลิจูดต่ำสุด (minimum amplitude) กับแอมพลิจูดสูงสุด (maximum amplitude)

สัญญาณคลื่นนิ่งที่ใช้สามารถเป็นได้ทั้งสองสัญญาณคือสัญญาณแรงดังหรือสัญญาณกระแส รูปแบบของคลื่นนิ่งที่เป็นแรงดันถูกแสดงด้วยค่าเฉลี่ยกำลังสอง (rms: root mean squared) ของแรงดันหรือกระแสที่กระจายไป ณ ตำแหน่งต่างๆ ภายในท่อนำคลื่น




**รูปที่ 1** สัญญาณคลื่นนิ่ง

ค่าแอมพลิจูดสูงสุดของคลื่นนิ่งเกิดขึ้นเมื่อแรงดันของคลื่นที่ถูกส่งจากแหล่งจ่ายไปรวมกับคลื่นที่สะท้อนกลับจากโหลดนั้นมี**เฟสตรงกัน** (in phase) ส่วนแอมพลิจูดต่ำสุดของคลื่นนิ่งเกิดขึ้นเมื่อแรงดันของคลื่นที่ถูกส่งจากแหล่งจ่ายรวมกับคลื่นที่สะท้อนกลับจากโหลดนั้นมี**เฟสต่างกัน 180 องศา** (out of phase) ซึ่งคลื่นนิ่งจะมีลักษะของสัญญาณคาบโดยมีระยะห่างระหว่างแอมพลิจูดต่ำสุดเท่ากับระยะห่างระหว่างแอมพลิจูดสูงสุดจะเท่ากับครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่นของสัญญาณที่ออกมาจากแหล่งจ่าย

ขนาดของแอมพลิจูดสูงสุดและต่ำสุดของคลื่นนิ่งขึ้นอยู่กับขนาดของคลื่นที่สะท้อนกับและขนาดของคลื่นที่สะท้อนกลับขึ้นอยู่กับโหลด อัตราส่วนของแอมพลิจูดสูงสุดต่อแอมพลิจูดต่ำสุดของคลื่นนิ่งนี้ถูกเรียกว่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (SWR: standing wave ratio) ค่า SWR จะขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของโหลดตัวอย่างเช่น ถ้าโหลดเป็นแบบลัดวงจร (short circuit) คลื่นที่ส่งไปจะสะท้อนกลับมาได้ทั้งหมด นั่นคือขนาดแอมพลิจูดสูงสุดจะเท่ากับ 2 เท่าขอขนาดคลื่นที่ส่งในขณะเดียวกัน ในส่วนของแอมพลิจูดต่ำสุดจะมีค่าเป็นศูนย์

นอกจากนี้แล้วคุณสมบัติของคลื่นนิ่งยังสามารถใช้ในการหาค่าความยาวคลื่น (wavelength) ของสัญญาณไมโครเวฟได้ ทั้งนี้ต้องรู้ค่าระยะห่างระหว่างแอมพลิจูดต่ำสุดหรือแอมพลิจูดสูงสุดของคลื่นนิ่งก่อน โดยที่ความยาวคลื่นสามารถคำนวณได้จากการคูณระยะห่างระหว่างแอมพลิจูดต่ำสุดหรือแอมพลิจูดสูงสุดของคลื่นนิ่งด้วยค่า 2 ความถี่ของสัญญาณสามารถคำนวณได้โดยใช้สมการต่อไปนี้

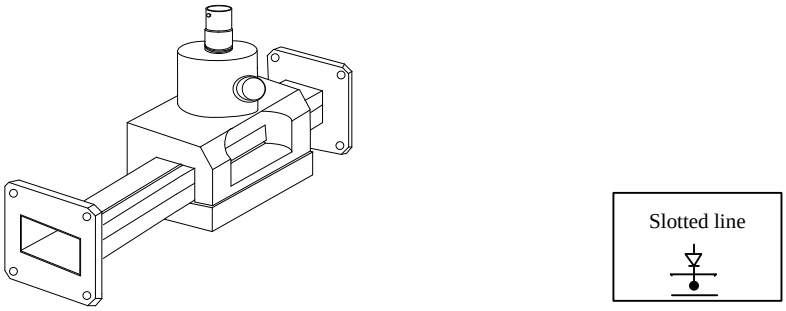
$$f = 3\text{x}10^8 \sqrt{\left(\frac{1}{\lambda_g}\right)^2 + \left(\frac{1}{2a}\right)^2} \qquad (1)$$

เมื่อ $3\text{x}10^8$ คือค่าความเร็วแสง มีหน่วยเป็น เมตร/วินาที, $a$ คือค่าความกว้างของท่อนำคลื่นมีหน่วยเป็นเมตร และ $\boldsymbol{\lambda}_g$ คือความยาวคลื่นในท่อนำคลื่นมีหน่วยเป็นเมตร

โดยทั่วไปแล้วการวัดระยะห่างระหว่างแอมพลิจูดต่ำสุดให้ผลที่ดีกว่าการวัดจากระยะห่างระหว่างแอมพลิจูดสูงสุด เนื่องจากขนาดที่เปลี่ยนแปลงของแอมพลิจูดต่ำสุดมีความคงที่มากกว่า ดังนั้นคลื่นที่สะท้อนกลับจากโหลดจะมีประโยชน์มากสำหรับการใช้กับโหลดแบบลัดวงจร (short circuit) เนื่องจากโหลดแบบลัดวงจรไม่สามารถดูดกลืนพลังงานใดๆ ได้ นั่นคือขนาดของคลื่นที่สะท้อนกลับจะมีขนาดเท่ากับขนาดของคลื่นที่ส่งจากแหล่งจ่าย ค่าที่วัดมีความผิดพลาดประมาณ 1% เมื่อนำมาใช้คำนวณหาความยาวคลื่นด้วยวิธีนี้ ในทางกลับกันวิธีการนี้ไม่สามารถนำไปใช้วัดความยาวคลื่นและความถี่ของสัญญาณไมโครเวฟได้เมื่อท่อนำคลื่นกับโหลดแมทช์กัน เนื่องจากในกรณีนี้จะไม่เกิดคลื่นนิ่ง

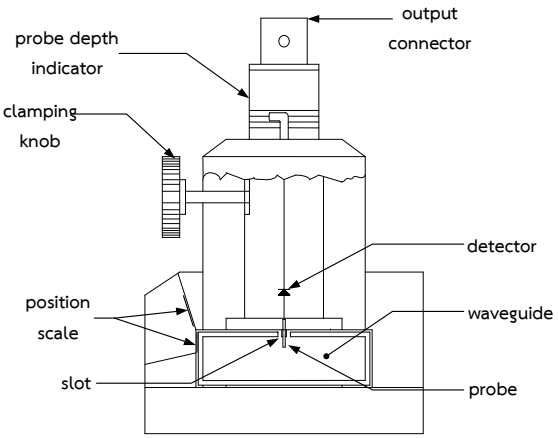
ระยะระหว่างแอมพลิจูดต่ำสุดและแอมพลิจูดสูงสุดของคลื่นนิ่งสามารถวัดได้โดยการใช้สล็อตไลน์ (slotted line) ซึ่งเป็นท่อนำคลื่นชนิดหนึ่งแบบแคบๆ ที่มีการสูญเสียต่ำ โดยด้านบนจะเป็นร่องตามแนวยาวมีโพรบ (probe) ที่สามารถปรับระยะลึกถูกใส่เข้าไว้ในร่องเพื่อทำให้เกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าภายในท่อนำคลื่น โพรบนี้จะต่อกับตัวตรวจหาแบบคริสตัล (crystal detector) ซึ่งติดตั้งให้สามารถเคลื่อนที่ไปมาได้ รูปที่ 2 แสดงสล็อตไลน์และสัญญาณลักษณ์ที่ใช้รูปที่ 3 แสดงภาพตัดด้านข้างของสล็อตไลน์

คลื่นไมโครเวฟทำให้เกิดการเหนี่ยวนำที่เอาท์พุตของโพรบทำให้เกิดแรงดันไฟตรงที่เอาท์พุทของตัวตรวจหาแบบคริสตัล ถ้าคลื่นไมโครเวฟมอดูเลท (modulate) เชิงขนานกับความถี่ 1 kHz และนำสัญญาณเอาท์พุทจากตัวตรวจหาแบบคริสตัลไปจ่ายเข้าที่ SWR มิเตอร์ ค่าที่อ่านได้นี้เป็นค่าแรงดันไมโครเวฟที่เอาท์พุทของโพรบ นั้นคือค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในท่อนำคลื่นเพราะว่าตำแหน่งของโพรบ สามารถปรับได้โดยการเลื่อนสล็อตไลน์ ทำไว้สำหรับวัดขนาดของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงในท่อนำคลื่นและสล็อตไลน์ยังนำไปใช้ในกรณีอื่นๆ ที่สำคัญได้อีกด้วย




(ก) (ข)

**รูปที่ 2** (ก) สล็อตไลน์ และ (ข) สัญลักษณ์



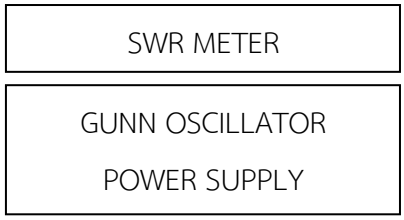

**รูปที่ 3** ภาพตัดด้านข้างของสล็อตไลน์

| **8.3. อุปกรณ์ในการทดลอง** | **ชื่อโมเดล** |
|---|---|
| 1. Gunn Oscillator Power Supply | 9501 |
| 2. SWR Meter | 9502 |
| 3. Gunn Oscillator | 9510 |
| 4. Slotted Line | 9520 |
| 5. Matched Load | 9531 |
| 6. Variable Attenuator | 9532 |
| 7. Fixed Attenuator | 9532 |
| 8. Microwave accessories | 9536 |
| 9. Connection leads and Accessories | 9590 |
| 10. Waveguide Support (2) | 9591 |

**8.4. ขั้นตอนการทดลอง**

ในการทดลองนี้นักศึกษาจะได้ทำการศึกษาวิธีการใช้งานสล็อตไลน์สำหรับการหาคลื่นนิ่งจากโหลดทั้ง 3 แบบคือ โหลดแบบลัดวงจร ตัวลดทอนและโหลดแบบลัดวงจร (attenuator and short circuit) และโหลดแบบแมทช์ ซึ่งมีขั้นตอนการทดลองดังต่อไปนี้

1. ปิดสวิทช์พาวเวอร์ให้อยู่ในตำแหน่ง 0 (off) ทุกตัว และติดตั้งเครื่องมือตามรูปที่ 4




**รูปที่ 4** การจัดวางเครื่องมือ

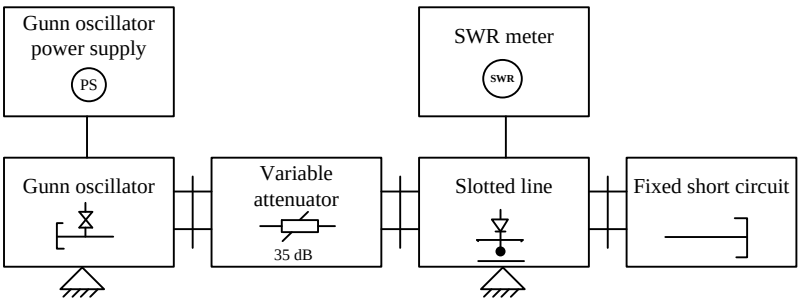
2. ประกอบด้วยอุปกรณ์ตามรูปที่ 5 โดยให้คลายสกรูของสล็อตไลน์ออกแล้วดึงโพรบขึ้นมาให้อยู่ในตำแหน่งสูงสุดแล้วขันสกรูเข้าไปให้แน่นเพื่อให้โพรบอยู่ในตำแหน่งนี้

3. ปรับกันน์ออสซิลเลเตอร์พาวเวอร์ซัพพลาย (Gunn oscillator power supply) ดังนี้

แรงดัน (VOLTAGE) .....MIN (มีค่าต่ำสุด)

โหมด (MODE) .....1 KHz

ย่านมิเตอร์ (METER RANGE) .....10 V




**รูปที่ 5** การจัดวางเพื่อหาคลื่นนิ่งโดยใช้โหลดแบบลัดวงจร

4. ให้ปรับเคลื่อนย้ายสล็อตไลน์ไปอยู่ตำแหน่ง 40 มม. ใช้เส้นเทียบมาตรฐาน (Calibration curve) ที่ได้จากการทดลองที่ 1 ปรับตัวลดทอนแบบปรับค่าได้ให้ค่าการลดทอนเท่ากับ 6 dB

ตำแหน่ง Blade ของตัวลดทอนแบบปรับค่าได้ = ..... มม.

5. ปรับ SWR มิเตอร์ ดังนี้

ย่าน (RANGE) ..... 0 dB

สเกล (SCALE) ..... NORMAL

อัตราการขยาย (GAIN) ..... ครึ่งหนึ่ง (mid range)

ความถี่ (Center Frequency) ..... ครึ่งหนึ่ง (mid position)

แบนด์วิดธ์ (BANDWIDTH) ..... 100 Hz

6. ที่สล็อตไลน์ให้ปรับความลึกของโพรบประมาณ 1/3 ของตำแหน่งสูงสุด โดยเข็มจะชี้ในตำแหน่งแนวนอนของตัววัด

7. เปิดสวิตช์ power ของกันน์ออสซิลเลเตอร์พาวเวอร์ซัพพลายและ SWR มิเตอร์รอประมาณ 1-2 นาที หลังจากนั้นทำให้ปรับกันน์ออสซิลเลเตอร์พาวเวอร์ซัพพลายให้มีแรงดันเท่ากับ 8 โวลต์

8. ที่สล็อตไลน์ให้ปรับโพรบอย่างช้าๆ ตามความยาวคลื่นท่อนำคลื่นจนกระทั่งได้ค่าสูงสุด

**หมายเหตุ** ถ้าเข็มวัดค่าของ SWR มิเตอร์เลยไปจากค่าสูงสุดของย่านวัด ให้ทำการลดความลึกของโพรบลงจากสล็อตไลน์ จะทำให้เข็มมิเตอร์จะต่ำกว่าย่านวัดสูงสุด (ซึ่งอ่านค่าระหว่าง -2 ถึง -3 dB) เสร็จแล้วให้ทำการเคลื่อนย้ายโพรบจนกระทั้งได้สัญญาณสูงสุด ถ้าไม่มีการเบนของเข็มให้สังเกตจาก SWR มิเตอร์เมื่อเคลื่อนที่โพรบอย่างช้าๆ ตามท่อนำคลื่นเสร็จแล้วให้เลือกย่านวัดที่ต่ำกว่าบน SWR มิเตอร์

**หมายเหตุ** เมื่อเลือกย่านวัด -40 dB บน SWR มิเตอร์และถ้ายังไม่มีผลต่อเข็มมิเตอร์ให้ทำการเพิ่มความลึกของโพรบ

9. ที่ SWR มิเตอร์ให้เลือกแบนด์วิดธ์ที่ 20 Hz และค่อยๆ ปรับค่าความถี่ให้เข็มชี้ที่ไปที่ ณ ตำแหน่งสูงสุด

**<u>หมายเหตุ</u>** ในกรณีที่เข็มมิเตอร์เลยค่าสูงสุดของย่านวัดของ SWR มิเตอร์ ให้ทำการเพิ่มอัตราการขยายของ SWR มิเตอร์ เพื่อให้เข็มต่ำกว่าย่านวัดสูงสุดและค่อยปรับแรงดันให้ชุดทดลอง

10. ที่ SWR มิเตอร์ ให้ทำการปรับอัตราการขยายเพื่อให้เข็มชี้ที่ตำแหน่ง 0 dB (SWR = 1.0) เพื่อเป็นการตั้งค่าระดับอ้างอิง

11. ให้เคลื่อนปรับโพรบไปตามท่อนำคลื่นของสล็อตไลน์และบันทึกค่าตำแหน่งต่ำสุดและสูงสุดในตาราง 1 เพื่อให้ค่าที่วัดมีความแม่นยำควรทำการปรับย่านของ SWR มิเตอร์ให้เหมาะสมกับค่าที่กำลังวัดอยู่ แต่ไม่ต้องทำการปรับปุ่มควบคุมอัตราการขยาย (Gain control)

12. จากตำแหน่ง Minimum ในตาราง 1 ให้นักศึกษาทำการประเมินค่าความยาวคลื่นของคลื่นไมโครเวฟ ($\lambda_g$) = ..... มม. ใช้สมการที่ (1) ในการคำนวณความถี่ไมโครเวฟ โดยที่ความกว้างของท่อนำคลื่น (a) มีค่าเท่ากับ 22.9 มม. ซึ่งความถี่ไมโครเวฟที่ได้จากการคำนวณมีค่าเท่ากับ ..... GHz

**ตารางที่ 1** ตำแหน่งสูงสุด – ต่ำสุดของแอมพลิจูด เมื่อต่อโหลดแบบลัดวงจร

| ค่าต่ำสุด (มิลลิเมตร) | ค่าสูงสุด (มิลลิเมตร) |
|---|---|
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |

13. ที่สล็อตไลน์ให้ปรับตำแหน่งโพรบ ในตำแหน่งสูงสุดที่เข้าใกล้โหลดให้บันทึกตำแหน่งของโพรบลงในคอลัมน์ตำแหน่งของตารางที่ 2 ถ้าจำเป็นต้องการปรับในระดับอ้างอิงให้ทำการปรับอัตราการขยายของ SWR มิเตอร์ เพื่อให้เข็มชี้ที่ 0 dB และบันทึกอ้างอิง ($E_{max}$) ในแถวแรกของคอลัมน์ E ของตารางที่ 2 ให้เคลื่อนย้ายโพรบไปทางกันน์ออสซิลเลเตอร์ โดยที่เคลื่อนไปที่ละ 2 มิลลิเมตร จนกระทั่งเข้าใกล้ค่าสูงสุด ซึ่งในขั้นตอนนี้ให้ทำการบันทึกตำแหน่งโพรบและแรงดัน SWR มิเตอร์ โดยอ่านค่า E (dB) ในคอลัมน์ตำแหน่งและคอลัมน์ E ของตารางที่ 2 ตามลำดับ เสร็จแล้วให้คำนวณอัตราส่วน $E/E_{max}$ (dB) ในคอลัมน์ dB ในตารางที่ 2 และเราใช้สมการที่ (2) ในการคำนวณค่าอัตราส่วน $E/E_{max}$ และทำการบันทึกผลลงในคอลัมน์สุดท้ายของตารางที่ 2

$$\frac{E}{E_{max}} = 10^{E/E_{max}(\mathrm{dB})} \quad (2)$$

อัตราส่วนของ E/Emax ตามแนวสล็อตไลน์เมื่อโหลดประกอบด้วยตัวลดทอนแบบคงที่ขนาด 6 dB และโหลดแบบลัดวงจร

**<u>หมายเหตุ</u>** เมื่อวัดความสัมพันธ์ของระดับสัญญาณด้วย SWR มิเตอร์ ในการเลือกย่าน ตัวอย่างเช่น ถ้าเลือกย่าน -30 dB ของ SWR มิเตอร์และไปชี้ที่ -4 บนย่านวัด dB เราจะอ่านค่าระดับสัญญาณนี้เท่ากับ -30 dB (-30 - 4 =-34)

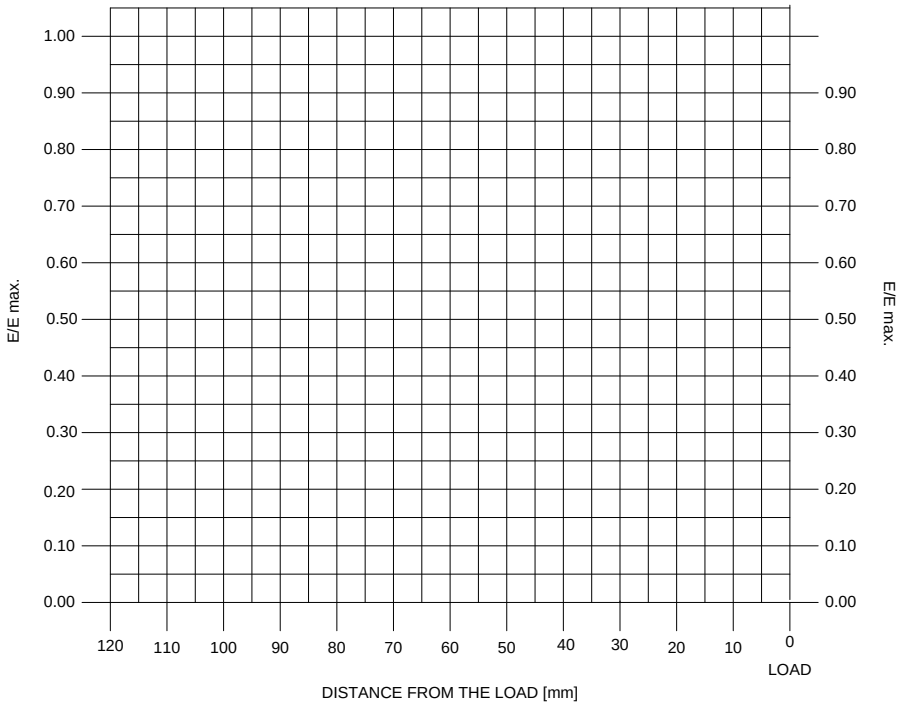
**ตารางที่ 2** อัตราส่วนของ E/Emax ตามแนวสล็อตไลน์เมื่อโหลดประกอบด้วยโหลดแบบลัดวงจร

| ตำแหน่ง (มม.) | E (dB) | E/Emax. (dB) | E/Emax. |
|---|---|---|---|
| | | 0 | 1 |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |

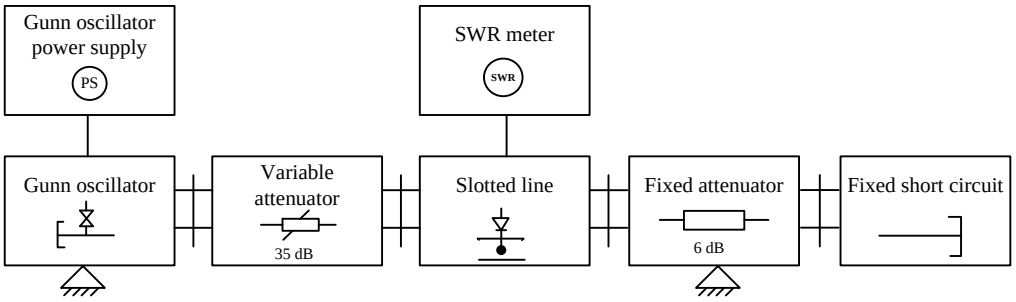
14. จากค่าที่บันทึกในตารางที่ 1 และ 2 ให้วาดสัญญาณของคลื่นนิ่งลงในรูปที่ 6 ขั้นแรกให้พล็อตแอมพลิจูดต่ำสุดและสูงสุดลงบนรูปที่ 6 โดยใช้ค่า $E/E_{max}$ ในตารางที่ 2 และทำการพล็อตค่าแรงดันที่กระจายอยู่ระหว่างต่ำสุดและค่าสูงสุดของคลื่นนิ่ง ซึ่งจะมีค่าเท่ากันทุกๆ ครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่น

15. ถอดสายเคเบิ้ลระหว่างกันน์ออสซิลเลเตอร์กับกันน์ออสซิลเลเตอร์พาวเวอร์ซัพพลายออกประกอบอุปกรณ์ตามรูปที่ 7

16. ต่อสายเคเบิ้ลระหว่างกันน์ออสซิลเลเตอร์กับกันน์ออสซิลเลเตอร์พาวเวอร์ซัพพลายเข้าที่เดิม




**รูปที่ 6** สัญญาณคลื่นนิ่งเมื่อต่อโหลดแบบลัดวงจร




**รูปที่ 7** การติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ สำหรับการพล็อตสัญญาณคลื่นนิ่งเมื่อโหลดประกอบด้วยตัวลดทอดแบบคงที่ขนาด 6 dB และโหลดแบบลัดวงจร

17. เริ่มจากค่าสูงสุดที่อยู่ใกล้โหลดที่สุด ให้เลื่อนโพรบไปตามสล็อตไลน์และบันทึกค่าตำแหน่งของแต่ละค่าต่ำสุดสูงสุดลงในตารางที่ 3

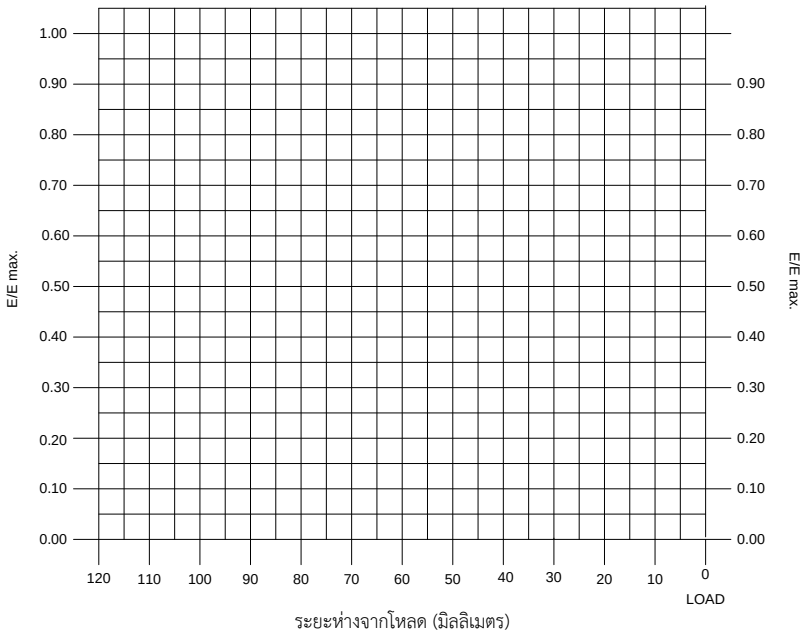
18. ตำแหน่งโพรบที่ได้ค่าสูงสุด และอยู่ใกล้โหลดที่สุด บันทึกค่านี้ลงในช่องแรกของตารางที่ 4 และหากต้องการจะหาระดับอ้างอิงจะทำโดยปรับ Gain ของ SWR มิเตอร์เพื่อที่จะให้เข็มชี้ไปตำแหน่ง 0 dB ให้บันทึกค่าแรงดันอ้างอิงจะทำโดยปรับ ($E_{max}$) ในตารางแรกคือคอลัมน์ E ในตารางที่ 4

ให้นักศึกษาทำการเลื่อนโพรบไปเข้าหากันน์ออสซิลเลเตอร์ครั้งละ 2 มม. จนกระทั้งได้ค่าสูงสุดอีกครั้งอ่านจาก SWR มิเตอร์ คำนวณหาค่า $E/E_{max}$ (dB) ในตารางที่ 4 และใช้สามารถที่ 2 คำนวณหาค่าอัตราส่วน $E/E_{max}$ และบันทึกค่าลงในช่องสุดท้ายของตารางที่ 4

**ตารางที่ 3** ตำแหน่งต่ำสุดและสูงสุดเมื่อใช้โหลดประกอบด้วยตัวลดทอดแบบคงที่ขนาด 6 dB และโหลดแบบลัดวงจร

| ค่าต่ำสุด (มิลลิเมตร) | ค่าสูงสุด (มิลลิเมตร) |
|---|---|
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |

19. จากค่าที่บันทึกลงในตารางที่ 3 และตารางที่ 4 ให้พล็อตสัญญาณคลื่นนิ่งลงในรูปที่ 8



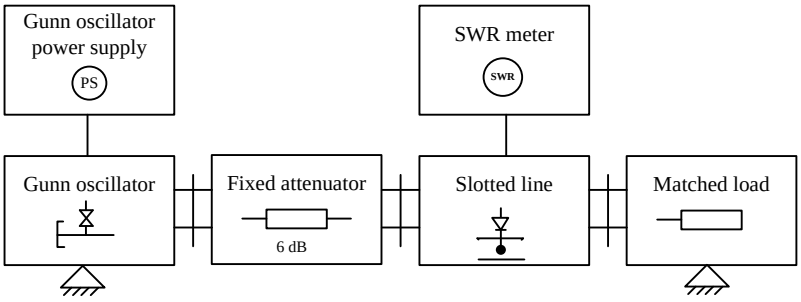

**รูปที่ 8** สัญญาณคลื่นนิ่งที่ได้จากโหลดที่เป็นตัวลดทอนคงที่ขนาด 6 dB และโหลดแบบลัดวงจร

20. ต่อสายเคเบิ้ลที่ต่อระหว่างกันน์ออสซิลเลเตอร์พาวเวอร์ซัพพลายกับกันน์ออสซิลเลเตอร์ประกอบอุปกรณ์ตามรูปที่ 9 เลือก Range ที่ -40 dB บน SWR มิเตอร์

21. ต่อสายเคเบิ้ลที่ต่อระหว่างกันน์ออสซิลเลเตอร์พาวเวอร์ซัพพลายกับกันน์ออสซิลเลเตอร์

**ตารางที่ 4** อัตราส่วนของ E/Emax ตามแนวสล็อตไลน์เมื่อโหลดประกอบด้วยตัวลดทอนแบบคงที่ขนาด 6 dB และโหลดแบบลัดวงจร

| ตำแหน่ง (mm) | E (dB) | E/E max. (dB) | E/E max. |
|---|---|---|---|
| | | 0 | 1 |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |




**รูปที่ 9** การติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ สำหรับการพล็อตสัญญาณคลื่นนิ่งที่ใช้โหลดแบบแมทช์

22. ให้เลื่อนโพรบของสล็อตไลน์ไว้ที่ตำแหน่ง 40 มม. เป็นการเลื่อนตำแหน่งโพรบไปตามท่อนำคลื่น หลังจากนั้นให้ทำการเปิดสวิตช์ SWR มิเตอร์และทำการปรับระดับอ้างอิงโดยการปรับค่า GAIN เพื่อให้เข็มชี้ไปที่ -1 dB เสร็จแล้วทำการบันทึกค่าระดับอ้างอิง ($E_{max}$) ซึ่งจะเป็นค่าแรกของแถวในคอลัมน์ E ในตารางที่ 5

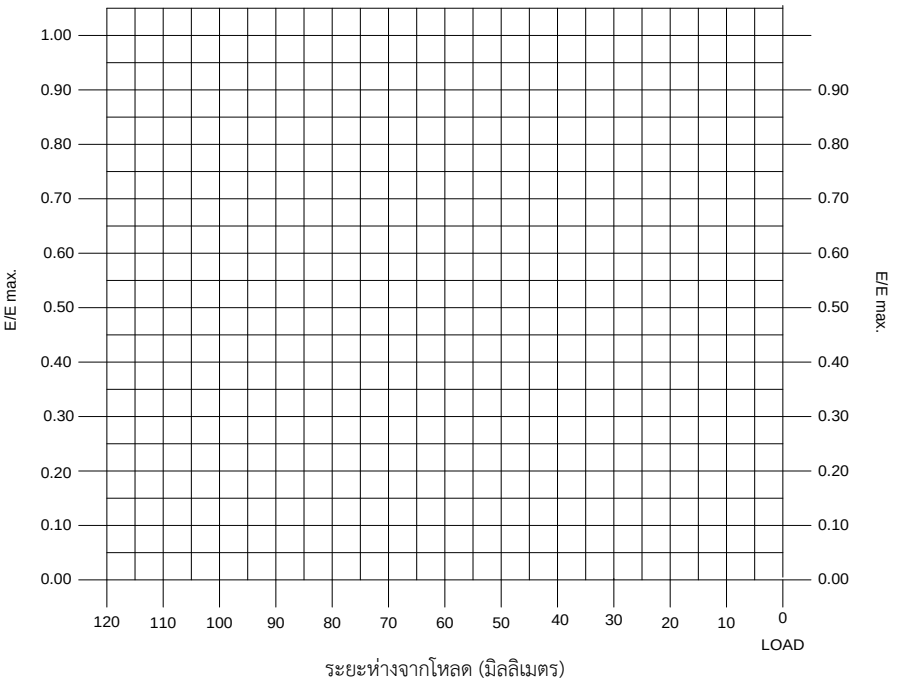
23. แต่ละตำแหน่งของโพรบในตารางที่ 5บันทึกค่าแรงดัน E ในหน่วย dB ที่อ่านจาก SWR มิเตอร์คำนวณหาอัตราส่วน $E/E_{max}$ (dB) และใช้สมการที่ 2 คำนวณหาค่าอัตราส่วนคำนวณหาค่าอัตราส่วน $E/E_{max}$ และบันทึกลงในช่องสุดท้ายของตาราง

**ตารางที่ 5** อัตราส่วน $E/E_{max}$ ตามความยาวของสล็อตไลน์เมื่อใช้โหลดแบบแมทช์

| ตำแหน่ง (มม.) | E | $E/E_{max}$ (dB) | $E/E_{max}$ |
|---|---|---|---|
| 40 | | 0 | 1 |
| 50 | | | |
| 60 | | | |
| 70 | | | |
| 80 | | | |
| 90 | | | |
| 100 | | | |
| 110 | | | |

24. จากค่าที่บันทึกลงในตาราง 5 เขียนคลื่นนิ่งสำหรับโหลดที่แมทช์ลงในรูปที่ 10

25.ปรับแรงดันให้อยู่ที่ตำแหน่งต่ำสุด (Min) หลังจากนั้นให้ทำการปิดสวิทช์ในพาวเวอร์ให้อยู่ตำแหน่ง 0 (off) ทุกตัว และทำการเก็บอุปกรณ์ให้เรียบร้อย




**รูปที่ 10** สัญญาณคลื่นนิ่งเมื่อต่อโหลดแบบแมทช์

**8.5. สรุปผลการทดลอง**

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

**8.6. คำถามท้ายการทดลอง**

1. รูปร่างของคลื่นนิ่งแสดงให้เห็นถึงอะไร

.....

.....

.....

.....

.....

.....

2. ความยาวคลื่นไมโครเวฟมีค่าเท่ากับ

.....

.....

.....

.....

.....

.....

3. จงอธิบายผลที่เกิดขึ้นเนื่องจากการสอดโพรบเข้าไปในท่อนำคลื่นลึกเกินไปขณะทำการวัดค่า SWR

.....

.....

.....

.....

.....

.....

4. จงแสดงวิธีการหาความถี่ไมโครเวฟกับสล็อตไลน์

.....

.....

.....

.....

.....

.....

5. จงคำนวณหาค่า SWR ในท่อนำคลื่นเมื่อโหลดที่นำมาต่อเป็นแบบลัดวงจรที่มีค่าการลดทอนเท่ากับ -3 dB

.....

.....

.....

.....

.....

.....