วัสดุดูดกลืนคลื่นเรดาร์
(Radar Absorbent Material)

นาวาเอก วัชรินทร์ เครือคำรงค์
อาจารย์กองวิชาฟิสิกส์และเคมี

ในทางทหารถือว่าหากฝ่ายเรามีอาวุธยุทโธปกรณ์ที่ทันสมัย ใช้เทคโนโลยีชั้นสูงที่ได้เปรียบฝ่ายตรงข้าม ย่อมนำชัยชนะมาสู่ฝ่ายเราได้ง่ายขึ้นและรวดเร็ว รวมถึงลดการสูญเสียไม่ว่าจะเป็นกำลังพล หรือ แม้แต่อาวุธยุทโธปกรณ์ สิ่งหนึ่งในหลาย ๆ วิธีที่ได้นำเทคโนโลยีมาใช้ในทางทหารเพื่อลดการสูญเสีย คือการซ่อน หรือพรางตัวเอง โดยไม่ให้ฝ่ายตรงข้ามตรวจจับได้ การป้องกันไม่ให้ฝ่ายตรงข้ามใช้เรดาร์ตรวจจับยุทโธปกรณ์ของฝ่ายเราได้ย่อมทำให้ฝ่ายเราได้เปรียบในการที่จะรุกหรือต่อต้านฝ่ายตรงข้าม เทคโนโลยีที่ใช้ในการซ่อนพรางคือการสร้างวัสดุดูดกลืนคลื่นเรดาร์ (Radar Absorbent Material, RAM) มาประกอบกับอาวุธยุทโธปกรณ์ หรือ การออกแบบให้อาวุธยุทโธปกรณ์มีพื้นผิวราดเอียงเพื่อสะท้อนคลื่นเรดาร์ RAM พึ่งจะนำมาประยุกต์ใช้ในการซ่อนพรางในทางทหารคงไม่ต่ำกว่า ๒๐ ปีมาแล้วโดยที่ก่อนหน้านั้นได้ใช้ในทางอุตสาหกรรม สำหรับในทางทหารท่านคงจะทราบเรื่องการซ่อนพรางโดยใช้ตาข่ายหรือ Camouflage Net เพื่อลดการตรวจจับคลื่นความร้อนและ คลื่นสะท้อนของเรดาร์ ซึ่งCamouflage Net นี้มีลักษณะเป็นตาข่ายติดตั้งวัสดุมันวาวเพื่อสะท้อนคลื่นเรดาร์และเก็บรังสีความร้อน แต่เนื่องจากความไม่สะดวกในการใช้และติดตั้ง ปกติจะเหมาะสำหรับอาวุธยุทโธปกรณ์ประจำที่ จึงได้มีการวิจัยและพัฒนาRAMขึ้นมาใช้ โดยสามารถติดตั้งได้ทั้งเรือ เครื่องบิน และ รถถัง หรือแม้แต่ปืนใหญ่ที่ต้องเคลื่อนย้ายตลอดเวลา ปัจจุบันประสิทธิภาพของ RAM สามารถดูดกลืนคลื่นเรดาร์ได้มากกว่า 99% นอกจากนั้นแล้วยังมีการค้นคว้าวิจัย RAM ที่มีความบางเช่นเดียวกับสีที่ใช้ทาอาคารสถานที่ โดยปัจจุบันได้ใช้ฉาบบนผิวของเครื่องบิน F-117 หรือเครื่องบินทิ้งระเบิด B-52 ซึ่งเครื่องบินทั้งสองแบบเป็นเครื่องบินล่องหน (Stealth Technology) ในบทความนี้จะได้กล่าวถึงเทคนิคการผลิต RAM เสียก่อน และในตอนหน้าจะกล่าวถึง วิธีนำ RAM ไปใช้ประโยชน์และการประยุกต์ใช้กับอาวุธยุทโธปกรณ์ การวัดประสิทธิภาพของ RAM และการต่อต้านฝ่ายตรงข้ามด้วย RAM และฝ่ายที่ใช้ RAM

กรมวิทยาศาสตร์ทหารเรือได้ดำเนินการวิจัยวัสดุดูดกลืนคลื่นเรดาร์ (RAM) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อสนับสนุนให้หน่วยกำลังรบมีขีดความสามารถในการรบสูงขึ้น โดยการดำเนินการ

วิจัยในครั้งนี้ได้เริ่มดำเนินการมาตั้งแต่ปี พ.ศ.๒๕๓๔ และสำเร็จในปี พ.ศ.๒๕๓๗ แนวคิดในการวิจัยได้จากการประยุกต์ทางทฤษฎีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านำไปสู่การผลิตและทดลองในห้องปฏิบัติการ และได้รับการสนับสนุนการผลิตจากโรงงานยาง กรมอู่ทหารเรือ ผลการทดลองประสบความสำเร็จไปขั้นหนึ่งในระดับห้องปฏิบัติการ และเพื่อเป็นการเผยแพร่ความรู้ให้กับผู้สนใจได้นำไปคิดค้นผลิตวัสดุดูดกลืนคลื่นเรดาร์ให้สามารถใช้กับยุทโธปกรณ์ได้ในการปฏิบัติจริง จึงได้รวบรวมและลำดับขั้นตอนเรื่องที่ได้วิจัยมาแล้วให้แก่ผู้สนใจได้ศึกษาเป็นลำดับ ดังนี้

ความมุ่งหมายของการวิจัย

วิจัยเพื่อผลิตวัสดุที่มีคุณสมบัติในการดูดกลืนคลื่นเรดาร์ซึ่งเมื่อนำไปประกอบกับยุทโธปกรณ์แล้ว จะสามารถลดการสะท้อนคลื่นเรดาร์ให้กับยุทโธปกรณ์นั้น

ขอบเขตการวิจัย

วิจัยผลิตวัสดุดูดกลืนคลื่นเรดาร์จากวัสดุยางและผงโลหะ โดยอาศัยเครื่องจักรและเทคโนโลยีในการผลิตภายในประเทศ และสามารถลดการสะท้อนของคลื่นเรดาร์ในช่วงความถี่คลื่น X-band (10 GHz) เมื่อทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการได้

วิธีดำเนินการวิจัย

นำผลทางทฤษฎีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามาประยุกต์ใช้

ผลที่คาดว่าจะได้รับ

ได้วัสดุที่มีคุณสมบัติดูดกลืนคลื่นเรดาร์ในช่วงความถี่ X-band

การดำเนินการวิจัย

๑. ทฤษฎีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

จากสมการแมกซ์เวลล์ (Maxwell's Equations) ๔ สมการเขียนได้ดังนี้

๑.๑ $\vec{\nabla}.\vec{D} = 0$ เมื่อไม่มีประจุไฟฟ้า (กฎของเกาส์)

๑.๒ $\vec{\nabla}.\vec{B} = 0$ เมื่อไม่มีขั้วแม่เหล็ก

๑.๓ $\vec{\nabla}x\vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$ (กฎของฟาราเดย์)

๑.๔ $\vec{\nabla}x\vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \vec{J}$ (กฎของแอมแปร์)

ความหมายของตัวแปร ดังนี้

$\vec{E}$ คือ สนามไฟฟ้า (Electric Field Strength)

$\vec{H}$ คือ สนามแม่เหล็ก (Magnetic Field Strength)

$\vec{B}$ คือ ความหนาแน่นฟลั๊กแม่เหล็ก (Magnetic Flux Density), $\vec{B} = \mu\vec{H}$

$\vec{J}$ คือ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (Electric Current Density), $\vec{J} = \sigma\vec{E}$

ε เรียกว่า Permittivity of Medium

μ เรียกว่า Permeability of Medium

σ คือค่าความนำไฟฟ้า (Conductivity)

จากสมการแมกซ์เวลล์ สามารถหาสมการคลื่นไฟฟ้า โดยที่คลื่นไฟฟ้านี้จะมีแอมปลิจูดอยู่ในแกน x และเคลื่อนที่ไปตามแกน z สำหรับในกรณีที่คลื่นเป็นอิสระต่อเวลาเราได้สมการคลื่นไฟฟ้า ดังนี้

$$\frac{\partial^2 E_x +}{\partial Z^2}\omega^2\mu\varepsilon E_x = 0$$

ε มีค่าเป็นเลขเชิงซ้อน (Complex Number) คือ มีทั้งค่าจริง (Real Part) และค่า Imaginary Part เขียนได้ ดังนี้

$$\varepsilon = \varepsilon' - \dot{J}\varepsilon''$$

$$\varepsilon = \varepsilon' - \dot{J}\frac{\sigma}{\omega}$$

เมื่อแก้สมการคลื่นจะได้

$$E_x = A\, e^{-\gamma Z}$$

และในทำนองเดียวกันสมการคลื่นแม่เหล็กที่มีแอมปลิจูดในแกน y โบกสะบัดตั้งฉากกับคลื่นไฟฟ้าและเคลื่อนที่ไปตามแกน z ได้ว่า

$$H_\gamma = A\, \xi^{-1} e^{-\gamma Z}$$

เมื่อ $\gamma = \dot{J}\omega\left[\sqrt{\mu\varepsilon}\left(1 + \frac{\sigma}{J\omega\varepsilon}\right)^{\frac{1}{2}}\right]$ และ $\xi = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}}\left(1 + \frac{\sigma}{J\omega\varepsilon}\right)^{-\frac{1}{2}}$

เราสามารถเขียนสมการคลื่นไฟฟ้าเขียนแยกออกเป็น Real Part และ Imaginary Part ได้ ดังนี้

$$E_x = A\, e^{-\alpha Z} e^{-J\beta Z}$$

เมื่อ $\alpha = \frac{\sigma}{2}\sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}}$ และ $\beta = \omega\sqrt{\mu\varepsilon}$

๒. ผลของตัวกลางที่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเดินผ่าน

๒.๑ ความต้านทานของตัวกลางต่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

พิจารณาค่าความต้านทานของตัวกลาง (Impedance)

$$\xi = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}}\left(1+\frac{\sigma}{j\omega\varepsilon}\right)^{-\frac{1}{2}}$$

กรณีตัวกลางที่เป็นอากาศ $\sigma \to 0$

$$\mu = \mu_0 = 4\pi 10^{-7} \quad \mathrm{Hm}^{-1}$$

$$\varepsilon = \varepsilon_0 = 8.85x10^{-12} Fm^{-1}$$

เมื่อแทนค่าและคำนวณค่าความต้านทานของอากาศจะได้

$$\xi_0 = \sqrt{\frac{\mu_o}{\varepsilon_o}} \cong 377\Omega$$

๒.๒ กำลังสูญเสีย หรือ Attenuation

แอมปลิจูดของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะลดลงเมื่อคลื่นเคลื่อนที่ผ่านตัวกลาง จากคลื่นสนามไฟฟ้า ผลของตัวกลางที่มีต่อแอมปลิจูดคือ $\alpha = \frac{\sigma}{2}\sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}}$ จะเห็นว่ากำลังการสูญเสียของคลื่นขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของตัวกลาง μ และ ε

๒.๓ Electric loss

การบ่งชี้ของการสูญเสียอีกลักษณะหนึ่งของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าพิจารณาได้จากค่า Electric Loss หรือ Tangent Loss จากค่าของตัวกลาง Permittivity

$$\varepsilon = \varepsilon' - j\frac{\sigma}{\omega}$$

หารด้วยค่า ε_0 ของสุญญากาศแล้วเขียนเสียใหม่เป็น

$$\varepsilon_r = \varepsilon_r^{/} - j\,\varepsilon_r^{//}$$

ค่า Electric Lloss หรือ Tangent Lloss คือ $\tan\delta = \frac{\varepsilon_r^{//}}{\varepsilon_r^{/}}$ หมายความว่าถ้าค่านี้มาก จะสามารถทำนายได้ว่าจะเกิดการสูญเสียของคลื่นในตัวกลางมากตามไปด้วย

๓. ชนิดของ RAM ตามประเภทของวัสดุผสม

๓.๑ Dielectric RAM จัดเป็น RAM ที่ไม่มีส่วนผสมของสารแม่เหล็ก การสูญเสียของคลื่นในตัวกลางนี้ เนื่องจากค่า Permittivity ของตัวกลางซึ่งเป็นคุณสมบัติทางไฟฟ้า และเกี่ยวข้องโดยตรงกับค่าความนำไฟฟ้า

๓.๒ Magnetic RAM จัดเป็น RAM ที่มีส่วนผสมของสารแม่เหล็กเป็นส่วนใหญ่ และมีสาร Dielectric รวมอยู่ด้วย การสูญเสียของคลื่นในตัวกลางชนิดนี้ นอกจากจะเหมือนกับ Dielectric RAM แล้ว คลื่นยังสูญเสียพลังงานให้กับการเกิด Magnetization Rotation ในสารแม่เหล็กอีกด้วย

๔. เปรียบเทียบระหว่าง Dielectric RAM และ Magnetic RAM

ลักษณะ	Dielectric RAM	Magnetic RAM
ความหนา	มาก	น้อย
น้ำหนัก	น้อย	มาก
ความทนทาน	น้อย	มาก
ค่า $\varepsilon_r \rightarrow 1$	ยาก	ยาก
การผลิต	ยาก	ง่าย
ความถี่สูง	ไม่ดี	ดี

การผลิต

การเลือกวัสดุที่จะนำมาผลิตจะต้องคำนึงถึงคุณสมบัติที่ทำให้คลื่นที่ผ่านสูญเสียกำลังมากที่สุด โดยพิจารณาจากค่าหลัก ๆ ๓ ค่าที่กล่าวมาแล้ว ในการผลิต RAM ครั้งนี้ได้เลือกทำชนิด Magnetic RAM และยางธรรมชาติจะดูเหมาะสม โดยเฉพาะยางสังเคราะห์จากยางธรรมชาติที่เรียกว่า Nitrile Buthyl Rubber (NBR) ที่ให้ค่าความต้านทาน และ Tangent Loss มากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุอื่นโดยคำนึงถึงประโยชน์การใช้งานตามวัตถุประสงค์ แต่อย่างไรก็ตามวัสดุอื่น ๆ ยังให้ค่าต่าง ๆ ได้ดีกว่านี้เช่น โฟมร์ เป็นต้น หลังจากนั้นจึงเริ่มการคำนวณและออกแบบรวมทั้งกำหนดอัตราส่วนของส่วนผสมเป็นสูตรต่าง ๆ โดยเฉพาะในเรื่องของความหนาของแผ่น RAM ที่ได้ขนาดเหมาะสมกับความยาวคลื่นที่เราต้องการดูดกลืน ต่อไปนี้เป็นขั้นตอนการผลิตโดยได้รับการสนับสนุนจากโรงงานยาง กรมอู่ทหารเรือ

- ผสมยาง NBR กับผงโลหะ
- รีดและผสม
- อบ
- อุณหภูมิ ๑๕๐° C
- แรงกด ๒๐๐๐ psi
- เวลานาน ๑๔ วินาที

ในการผลิตในครั้งนี้ ได้ผลิตตามสูตรไว้ ๓ สูตร และกับอีก ๑ แผ่น ที่เป็นยางไม่ผสมโลหะโดยมีขนาดและความหนาเท่ากันแต่น้ำหนักต่อแผ่นไม่เท่ากันทั้งนี้ขึ้นอยู่กับส่วนผสม ดังนี้

สูตร ๑. ยาง + ผงเหล็ก (NBR + Fe)

สูตร ๒. ยาง + ผงเหล็ก + ลวดโลหะ (NBR + Fe + Cu wire)

สูตร ๓. ยาง + ผงเหล็ก + อลูมิเนียม (NBR + Fe + Al)

สำหรับแผ่น RAM ที่ผลิตจะมีลักษณะ ดังนี้

- แผ่น RAM มีความหนาประมาณ ๓ มิลิเมตร น้ำหนัก ๕-๖ กิโลกรัม/ตารางเมตร
- ดูดกลืนคลื่นเรดาร์ที่ความถี่ ๑๐ GHz

การทดลองในห้องปฏิบัติการ

ขั้นติดตั้งอุปกรณ์

ตามรูปที่ ๑.

๑. เครื่องส่งและรับคลื่นไมโครเวฟขนาดกำลัง ๑ mW

๒. เครื่องบันทึกผลใช้ Plotter

๓. ตัวเป้าทำจากแผ่นสังกะสีรูปตัวเรือ หมุนได้รอบแกน โดยมีดาดฟ้าเรือเป็นแผ่นทรงสี่เหลี่ยมสำหรับให้คลื่นสะท้อนโดยด้านหน้ากำหนดด้วยตัวอักษร A และ ด้านข้างเป็นตัวอักษร B

ขั้นการทดลอง

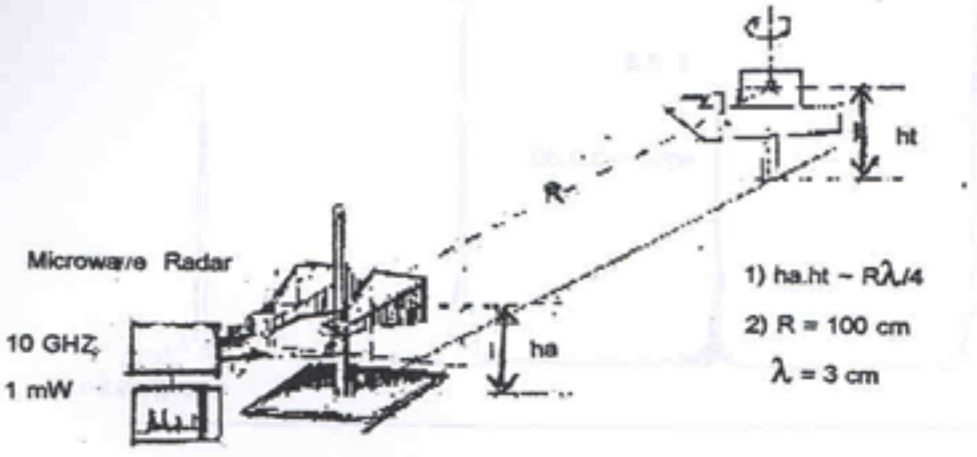
๑. Scan เป้าอย่างเดียว **ผลการวัด** การสะท้อนตามรูปที่ ๒. จะเห็นว่าด้าน B สะท้อนได้มากกว่าด้าน A เพราะมีพื้นที่มากกว่า

๒. ใช้กำลังส่งของเครื่องไมโครเวฟเท่าเดิมและในเงื่อนไขเหมือนเดิมทุกประการ นำแผ่นยางที่ไม่มีการผสมโลหะปะไว้ที่ด้าน B **ผลการวัด** ตามรูปที่ ๓. จะเห็นว่าการสะท้อนของคลื่นไม่แตกต่างจากข้อ ๑. แสดงว่าแผ่นยางให้คลื่นผ่านได้ดี (ไม่มีความต้านทาน) แต่ไม่ดูดกลืนคลื่นเรดาร์

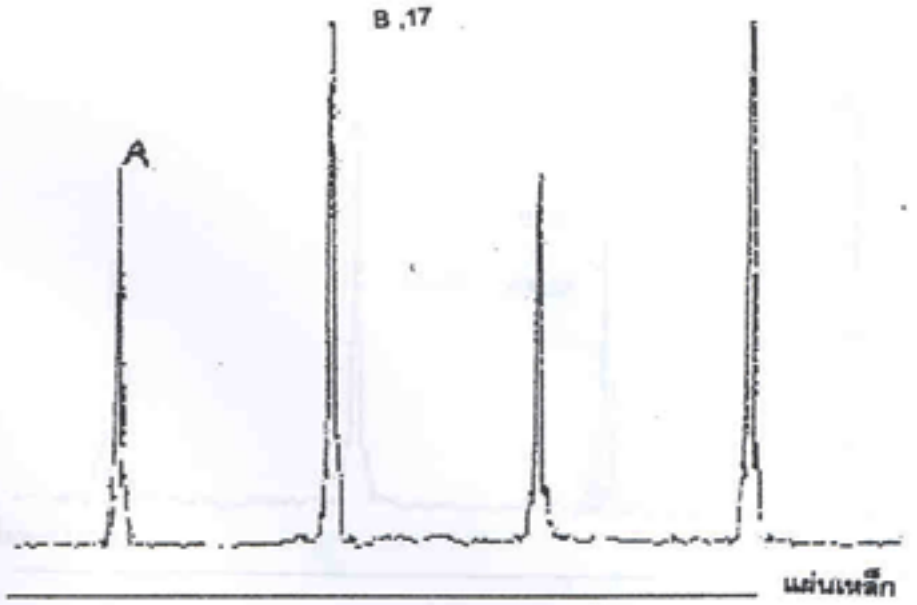
๓. ใช้แผ่น RAM สูตรที่ ๑. **ผลการวัด** การสะท้อนตามรูปที่ ๔. จะเห็นว่าด้าน B คลื่นเรดาร์ สะท้อนน้อยลง ลดการสะท้อนได้ ๕๐% หรือ -๓.๐ dB

๔. ใช้แผ่น RAM สูตรที่ ๒. **ผลการวัด** การสะท้อนตามรูปที่ ๕. จะเห็นว่าด้าน B คลื่นเรดาร์สะท้อนน้อยลงอีกเล็กน้อย ลดการสะท้อนได้ ๕๒.๙% หรือ -๓.๓ dB

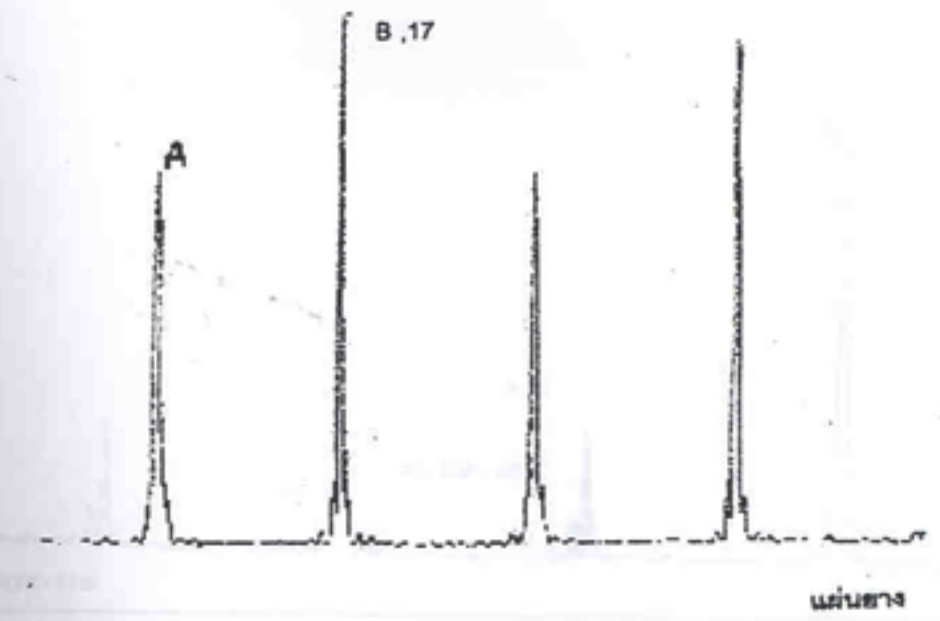
๕. ใช้แผ่น RAM สูตรที่ ๓. **ผลการวัด** การสะท้อนตามรูปที่ ๖. จะเห็นว่าด้าน B สะท้อนน้อยลงอีก ลดการสะท้อนได้ ๗๖% หรือ -๖.๓ dB



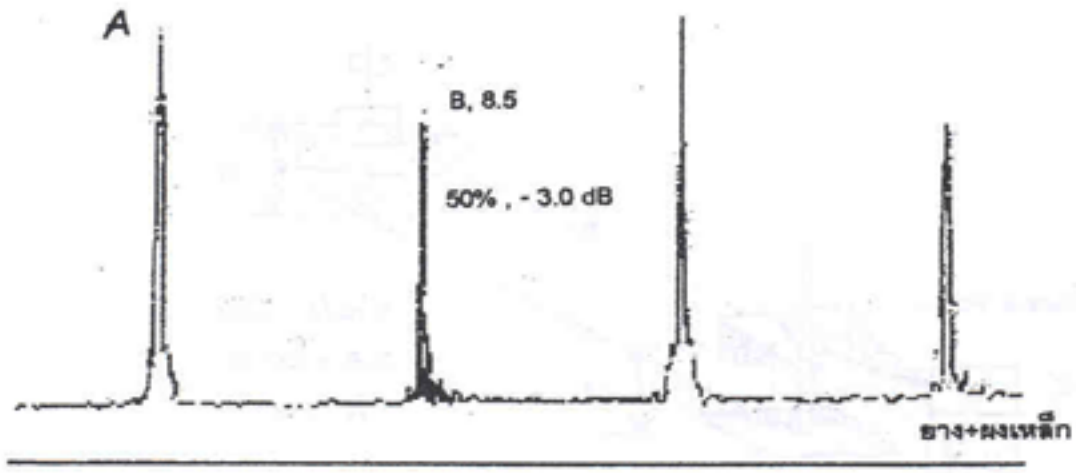
รูปที่ ๑ แสดงการติดตั้งเครื่องมือทดลอง



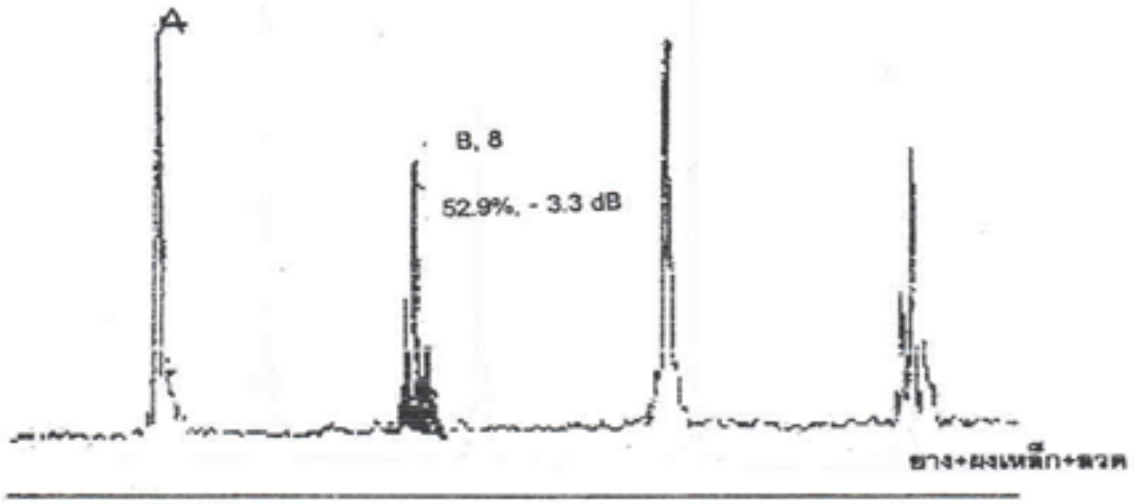
รูปที่ ๒ คลื่นสะท้อนมือจากตัวเรือเปล่า



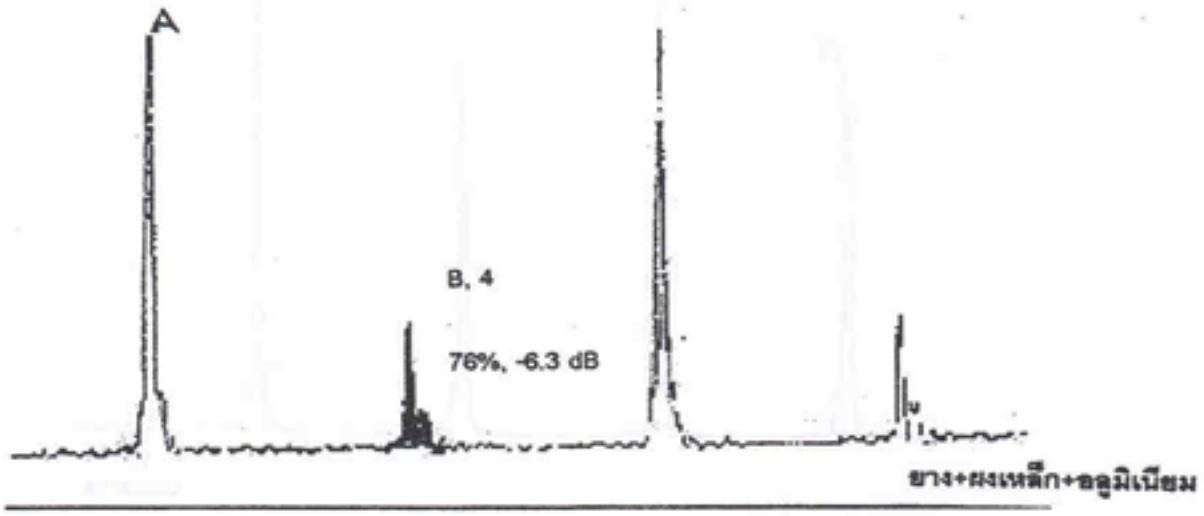
รูปที่ ๓ คลื่นสะท้อนเมื่อปิดด้วยแผ่นยางด้าน B



รูปที่ ๔ คลื่นสะท้อนเมื่อปิดด้วย RAM สูตรที่ ๑ ด้าน B



รูปที่ ๕ คลื่นสะท้อนเมื่อปิดด้วย RAM สูตรที่ ๒ ด้าน B



รูปที่ ๖ คลื่นสะท้อนเมื่อปิดด้วย RAM สูตรที่ ๓ ด้าน B

สรุปคำแนะนำ

ผลการวิจัยจะเห็นว่าได้ผลในระดับหนึ่ง RAM ที่ออกแบบไว้นี้สามารถดูดกลืนคลื่นเรดาร์ที่กำลังต่ำ ขนาดน้อยกว่ามิลลิวัตต์เท่านั้น แต่อย่างไรก็ตามหากคิดถึงการใช้งานจริงๆ เรดาร์เรือสามารถตรวจจับเรือ หรือยุทโธปกรณ์ของฝ่ายตรงข้ามด้วยสัญญาณต่ำมากขนาดเป็น ไมโครวัตต์ ซึ่งนั่นหมายความว่าคลื่นเรดาร์ที่วิ่งไปกระทบเรือจากแหล่งกำเนิดขนาดเป็นกิโลวัตต์ คงจะเหลือกำลังเป็นวัตต์ หรือไม่ก็มิลลิวัตต์ ซึ่ง RAM ที่วิจัยขึ้นมีผลต่อการลดการสะท้อนได้ ลักษณะเช่นนี้เราจะมองไม่เห็นฝ่ายตรงข้ามหากฝ่ายตรงข้ามใช้ RAM ของเรา จะทำให้ฝ่ายตรงข้ามรุกล้ำเข้าใกล้เราได้มากขึ้น

แนวทางการปรับปรุงให้สามารถลดการสะท้อนได้มากขึ้นมีอีกหลายวิธีซึ่งแต่ละวิธีก็จะให้ RAM ออกมาในลักษณะแตกต่างกันออกไป ขึ้นอยู่กับการจะนำไปใช้ เพราะ RAM ที่ได้ออกมาจะเกี่ยวข้องกับขนาด น้ำหนัก และความทนทาน ในตอนหน้าจะกล่าวถึง วิธีนำ RAM ไปใช้ประโยชน์และการประยุกต์ใช้กับอาวุธยุทโธปกรณ์ การวัดประสิทธิภาพของ RAM และการต่อต้านฝ่ายตรงข้ามด้วย RAM และฝ่ายที่ใช้ RAM