

การทดสอบหาสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุชิ้นส่วนประกอบเครื่องบินด้วยวิธีกระแสไหลวน Electrical Property Testing of Aircraft components by Eddy-Current Testing

ฤทธิชัย เกาเนียม¹ สมชาย วนไทยสงค์^{1*} และ จักรพันธ์ ชาระ¹

¹ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

2 ถ.นางลิ้นจี่ทุ่งมหาเมฆ สาทร กรุงเทพฯ 10120

Rittichai Phaoniam¹ Somchai Wonthaisong^{1*} and Jakkrapan Chara¹

¹Department of Mechanical and Industrial Engineering, Faculty of Engineering,

Rajamangala University of Technology Krungthep,

2 Nanglinchi Rd., Thungmahamek, Sathorn, Bangkok, 10120

Corresponding author Email: Somchai.wo@mail.rmutk.ac.th^{*}

(Received: July 10, 2023; Revise: December 11, 2023; Accepted: December 12, 2023)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุสำหรับใช้สอบเทียบมาตรฐาน (Reference standard) ในงานตรวจสอบด้วยวิธีกระแสไหลวนสำหรับชิ้นส่วนประกอบเครื่องบิน ซึ่งสามารถบ่งบอกและแยกแยะกลุ่มของวัสดุได้อย่างชัดเจนจากลักษณะสัญญาณอิมพีแดนซ์ที่ปรากฏ โดยทำการศึกษาจากวัสดุสอบเทียบมาตรฐานแต่ละประเภทและวัสดุตัวอย่างของชิ้นส่วนประกอบเครื่องบิน และดำเนินการตรวจสอบด้วยวิธีกระแสไหลวน (Eddy-Current Testing) เพื่อศึกษาลักษณะและการเปลี่ยนแปลงของเส้นสัญญาณอิมพีแดนซ์ (Impedance signal) ผลการทดลองพบว่าสัญญาณอิมพีแดนซ์ของวัสดุตัวอย่างชนิดต่างๆ สามารถระบุประเภทของวัสดุได้ 2 กลุ่ม คือ Ferromagnetic และ Non-Ferromagnetic จากสัญญาณที่ปรากฏบนหน้าจอแสดงผลที่ถูกกำหนดอย่างชัดเจน สำหรับวัสดุชิ้นส่วนประกอบเครื่องบินมีลักษณะเส้นสัญญาณอิมพีแดนซ์ใกล้เคียงเส้นสัญญาณของวัสดุสอบเทียบมาตรฐาน และผลการตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุสอบเทียบมาตรฐาน (Reference Standard) และชิ้นส่วนประกอบเครื่องบิน (Aircraft components) จากการแปลงสัญญาณอิมพีแดนซ์พบว่าวัสดุประเภทอลูมิเนียมมีความต้านทานไฟฟ้าระหว่าง 2.3-35.2 $\mu\Omega\cdot\text{cm}$. และค่าการนำไฟฟ้าระหว่าง 4.90 - 53.90 IACS% วัสดุไทเทเนียมมีค่าระหว่าง 112.8-177 $\mu\Omega\cdot\text{cm}$. และการนำไฟฟ้ามีค่าระหว่าง 0.97-1.53 IACS% ซึ่งสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุทั้ง 2 ประเภท มีความสอดคล้องตามสมบัตินิยามของวัสดุที่ทำการศึกษา

คำสำคัญ: สอบเทียบมาตรฐาน การตรวจสอบด้วยวิธีกระแสไหลวน สัญญาณอิมพีแดนซ์ ความต้านทานไฟฟ้า การนำไฟฟ้า

Abstract

The purpose of this research is to study the mechanical properties of materials used as the reference standard in eddy-current testing for aircraft components. They can indicate and identify the material type from the impedance signal, which obviously occurred, and the transformation of the rotating eddy current testing signal changed. The results found that the impedance signal of each material could be classified into two

groups; ferromagnetic and non-ferromagnetic, based on the signal characteristics shown on the display screen where the zones were clearly defined. For aircraft components, the uniform impedance signal was compared with the reference standard. The electrical properties of the reference-standard materials and aircraft components received from the impedance signal gave a resistivity of 2.3–35.2 $\mu\Omega\cdot\text{cm}$. and a conductivity of 4.90–53.90 IACS% for aluminum. The titanium had a resistivity between 112.8 and 177 $\mu\Omega\cdot\text{cm}$. and a conductivity between 0.97 and 1.53 IACS%. The electrical properties of both types of materials were consistent with the specific properties of the studied materials.

Keywords: Reference Standard, Eddy-Current Testing, Impedance Signal, Resistivity, Conductivity

1. ที่มาและความสำคัญ

ปัจจุบันบุคลากรด้านการซ่อมบำรุงอากาศยาน (Aircraft Maintenance) เป็นหนึ่งในสาขาวิชาชีพที่ต้องการทักษะและความชำนาญในการปฏิบัติงานสูงมาก เพื่อรองรับและสร้างความเชื่อมั่นสำหรับการแข่งขันในอุตสาหกรรมการบินที่มีแนวโน้มสูงขึ้นในการพัฒนา ผลิต และประยุกต์ใช้เกี่ยวกับชิ้นส่วนเครื่องบิน การบำรุงรักษาโครงสร้างเครื่องบินมีความสำคัญและสัมพันธ์กับการใช้งานมากที่สุด ซึ่งนำไปสู่การพัฒนาและปรับปรุงในหลาย ๆ ด้านอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะบุคลากรด้านการทดสอบโดยไม่ทำลายในงานซ่อมบำรุงอากาศยาน เพราะทุกการวิเคราะห์ ประเมินผลเพื่อตัดสินใจเกี่ยวกับชีวิตของลูกเรือและผู้โดยสาร [1,2] การพัฒนากระบวนการเพื่อรับรองบุคลากรด้านการทดสอบโดยไม่ทำลาย (Non-destructive Testing; NDT) ในงานซ่อมบำรุงอากาศยาน จะช่วยให้บุคลากรที่ผ่านการฝึกฝนและอบรมมีทักษะในการตรวจหารอยความไม่ต่อเนื่องมาตรฐาน ได้อย่างถูกต้อง แม่นยำ สามารถประเมินผู้ปฏิบัติการทดสอบโดยไม่ทำลายในงานซ่อมบำรุงอากาศยานได้อย่างเป็นระบบ ไม่ว่าจะเป็นการทดสอบหารอยความไม่ต่อเนื่องที่ผิวและใต้ผิว โดยเฉพาะชิ้นส่วนที่ต้องการความแม่นยำสูง เช่น งานตรวจสอบวิธีกระแสไหลวน (Eddy-Current Testing; ECT) จะใช้ตรวจหารอยแตกร้าวขนาดเล็กด้วยความไวสูง (Sensitivity) [3,4] อีกทั้งยังต้องทราบและสามารถแยกชนิดวัสดุจากการเปลี่ยนแปลงสัญญาณอิมพีแดนซ์ (Impedance) ของการทดสอบด้วยวิธีกระแสไหลวน (ECT) ควบคู่กับลักษณะของสัญญาณที่ปรากฏได้เป็นอย่างดีสำหรับวัสดุชิ้นส่วนประกอบเครื่องบินเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุสอบเทียบมาตรฐาน (Reference Standard) [5] จากการศึกษาวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบวัสดุชนิดต่าง ๆ สำหรับชิ้นส่วนประกอบเครื่องบินด้วยวิธีกระแสไหลวน (ECT) พบว่าวิธีการดังกล่าวสามารถทำการตรวจสอบวัสดุประเภทอลูมิเนียมและไทเทเนียมซึ่งเป็นวัสดุที่มีความสำคัญ โดยเฉพาะอย่างยิ่งชิ้นส่วนชิ้นส่วน Aircraft Tube Component, ชิ้นส่วนโครงสร้างตัวเครื่องบินอลูมิเนียม และชิ้นส่วนแผ่นผนังลำตัว (Fuselage) เป็นต้น และสามารถตรวจสอบรอยบกพร่องหรือความเสียหายที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานจากลักษณะของสัญญาณอิมพีแดนซ์ที่แตกต่างกัน [6-8] อย่างไรก็ตามการตรวจสอบมีความจำเป็นต้องใช้ชิ้นงานรอยบกพร่องต้นแบบสำหรับวัสดุที่ใช้ผลิตชิ้นส่วนประกอบเครื่องบินเป็นจำนวนมาก ซึ่งชิ้นส่วนดังกล่าวมีราคาค่อนข้างแพงและต้องนำเข้าจากต่างประเทศ จึงมีปริมาณไม่เพียงพอต่อการใช้สำหรับฝึกทักษะช่างทดสอบโดยไม่ทำลายทักษะสูงในงานซ่อมบำรุงอากาศยาน [9,10] ดังนั้น งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุชิ้นส่วนประกอบเครื่องบินชนิดต่างๆ เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุสอบเทียบมาตรฐานด้วยวิธีกระแสไหลวน (ECT) สำหรับใช้แยกแยะสัญญาณอิมพีแดนซ์ที่ปรากฏของประเภทวัสดุที่ใช้ผลิตชิ้นส่วนอากาศยานก่อนนำไปสร้างชิ้นงานต้นแบบสำหรับงานตรวจสอบด้วยวิธีกระแสไหลวน (ECT) เพื่อใช้ในการตรวจสอบรอยแตกร้าวขนาดเล็กต่อไป

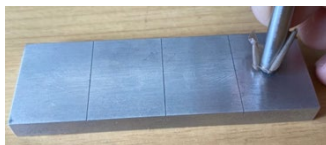
2. วัสดุ เครื่องมือ และอุปกรณ์

1) วัสดุสอบเทียบมาตรฐาน (Reference Standard) ใช้สำหรับศึกษาผลกระทบของชนิดวัสดุต่อสัญญาณของกระแสไหลวนเพื่อจำแนกหรือบ่งชี้ชนิดวัสดุชิ้นส่วนประกอบเครื่องบิน ได้แก่ อลูมิเนียม เกรด 6063, แมกนีเซียม (Mg 99.90%), ไทเทเนียม (Ti) เกรด 6AL-4V, เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง (Hyper-eutectoid) เกรด AISI1095, เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (Hypo-eutectoid) AISI1020, เหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 304, ทองเหลือง (Brass) เกรด JIS SH3250C3604, ทองแดง (Cu) เกรด JIS H3250C1100 และ ตะกั่ว (Pb 99.99%) ขนาดวัสดุเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มม. ความหนา 10 มม. แสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 วัสดุสอบเทียบมาตรฐาน (Reference Standard)

2) ชิ้นส่วนประกอบของเครื่องบินที่ทำการศึกษา ได้แก่ แท่งอลูมิเนียมมาตรฐาน AL 7075, แท่งไทเทเนียมมาตรฐาน 6AL-4V Ti, Tube, Welded flange, Flange, Al Tube, Turbine pipe และ Turbine Blade เป็นต้น แสดงดังรูปที่ 2



AL 7075
(แท่งอลูมิเนียมมาตรฐาน)



ชิ้นส่วน 1 (Tube)



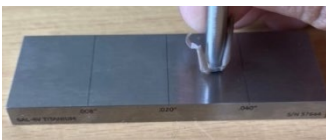
ชิ้นส่วน 2 (Welded flange)



ชิ้นส่วน 3 (Flange)



ชิ้นส่วน 4 (Al Tube)



6AL-4V Titanium
(แท่งไทเทเนียมมาตรฐาน)



ชิ้นส่วน 5 (Turbine pipe)



ชิ้นส่วน 6 (Turbine Blade)

รูปที่ 2 วัสดุชิ้นส่วนประกอบของเครื่องบิน

3) เครื่องตรวจสอบด้วยวิธีกระแสไหลวน (Eddy-Current Testing) สำหรับใช้ตรวจสอบเพื่อระบุและจำแนกชนิดวัสดุอากาศยานที่สำรวจจาก สถานประกอบการ สถาบันฝึกอบรมด้านการตรวจสอบโดยไม่ทำลายต่างๆ ในประเทศ โดยใช้เครื่องตรวจสอบวิธีกระแสไหลวน รุ่น Mentor EM Eddy Current ดังแสดงในรูปที่ 3



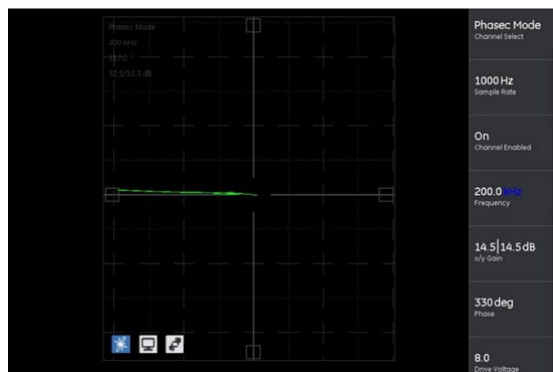
รูปที่ 3 เครื่องตรวจสอบด้วยวิธีกระแสไหลวน

3. ขั้นตอนการดำเนินงาน

1) ศึกษาลักษณะสัญญาณของกระแสไหลวนของวัสดุสอบเทียบมาตรฐาน (Reference Standard) โดยการตรวจสอบด้วยเครื่องตรวจสอบด้วยวิธีกระแสไหลวน หัวโพรบแบบพื้นผิว (Surface Probe) ซึ่งมีลักษณะแบบแบนชนิดขดลวดชุดเดียวหรือ Absolute Coil การปรับตั้งค่าตามมาตรฐาน ASME Section V, Article 8 [11] ในการปรับตั้งค่าของเครื่องหลักๆ จะปรับตั้งความถี่ กำลังขยาย และมุมเฟส โดยการตรวจสอบนี้ปรับให้เส้นยกออก (Lift-off) ขนานตามแนวแกน X แล้วตั้งความถี่ที่ 200 kHz. กำลังขยายแกน X แกน Y เท่ากับ 14.5, 14.5 ตามลำดับ และปรับมุมเฟส 330 องศา การปรับตั้งพารามิเตอร์ในเครื่องตรวจสอบสำหรับการทดลอง ดังตารางที่ 1 และตัวอย่างในรูปที่ 4

ตารางที่ 1 การตั้งค่าและเงื่อนไขเครื่องตรวจสอบด้วยวิธีกระแสไหลวน (Eddy-Current Testing) [11]

หัวตรวจสอบ (Probe)	
ชนิดหัวตรวจสอบ (Probe Type)	Surface Probe
ลักษณะขดลวด (Coil Type)	Absolute
ขนาดหัวตรวจสอบ (Probe Dia.), mm	3.2
สายเชื่อมต่อ (Cable Type)	Microdot to BNC
ช่วงความถี่ใช้งาน (Frequency Range), kHz	20-200
การปรับตั้งเครื่องตรวจสอบ (ECT Set up)	
โหมดทำงาน (Mode)	Phase Mode
ความถี่ใช้งาน (Operating Frequency), kHz	200
กำลังขยาย (X/Y dB Gain)	14.5/14.5
ปรับตั้งมุมเฟส (Phase, deg.)	330
อัตราสุ่มสัญญาณ (Sample Rate), kHz	1000



รูปที่ 4 ตัวอย่างค่าการปรับตั้งในเครื่องตรวจสอบ

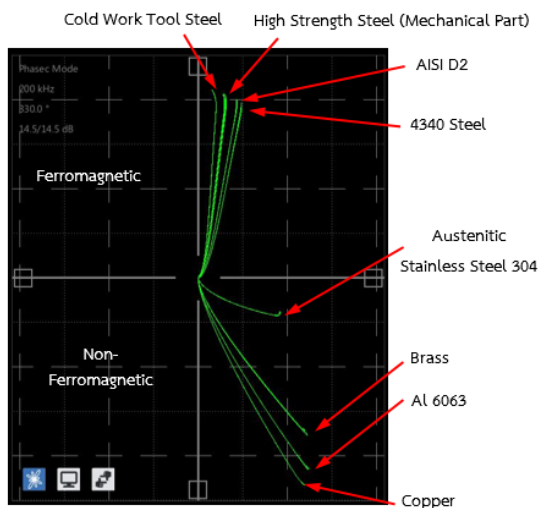
2) ศึกษาผลกระทบของวัสดุชิ้นส่วนประกอบเครื่องบนต่อสัญญาณของกระแสไหลวน (Conductivity % IACS) เพื่อจำแนกชนิดวัสดุซึ่งส่งผลต่อสัญญาณของกระแสไหลวน โดยใช้หลักการทดสอบค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity) หรือค่าความต้านทานทางไฟฟ้า (Resistivity) ซึ่งจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงอิมพีแดนซ์ (Impedance) ของขดลวดในหัวตรวจสอบ การทดลองนี้เหมาะสมในการจำแนกวัสดุได้ทั้งที่เป็นแบบนำแม่เหล็ก (Ferromagnetic) และไม่เป็นแม่เหล็ก (Non-Ferromagnetic) แสดงการปรับตั้งพารามิเตอร์ในเครื่องตรวจสอบสำหรับการทดลองตามตารางที่ 1

3) เปรียบเทียบตัวอย่างของสัญญาณการเปลี่ยนแปลงอิมพีแดนซ์ (Impedance) ค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity) หรือค่าความต้านทานทางไฟฟ้า (Resistivity) ระหว่างวัสดุสอบเทียบมาตรฐานและวัสดุชิ้นส่วนประกอบเครื่องบิน

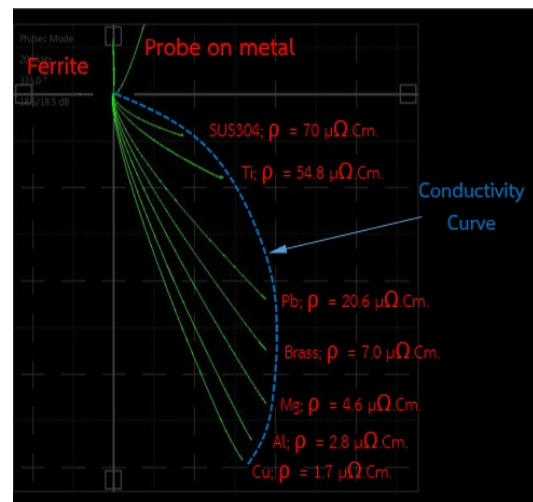
4. ผลการทดลอง

4.1 ผลการศึกษาลักษณะสัญญาณของกระแสไหลวนของวัสดุสอบเทียบมาตรฐาน (Reference Standard)

จากการสำรวจและรวบรวมวัสดุตัวอย่างชนิดต่างๆ ที่ใช้สำหรับผลิตชิ้นส่วนประกอบเครื่องบิน (Aircraft components) และชิ้นส่วนอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง เพื่อศึกษาลักษณะและการเปลี่ยนแปลงเส้นสัญญาณอิมพีแดนซ์ (Impedance) จากการตรวจสอบด้วยวิธีกระแสไหลวน โดยใช้วิธีการทดสอบ Lift off ได้แก่ ชิ้นส่วนเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิค เกรด 304, ชิ้นส่วน Mechanical Parts เหล็กกล้า เกรด 4043, เหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็น (Cold Work Tool Steel), ชิ้นส่วนโครงสร้างตัวเครื่องบินอลูมิเนียม เกรด 6063, วัสดุประเภททองเหลือง (Brass) และทองแดง (Cu) เป็นต้น ผลการศึกษาลักษณะสัญญาณอิมพีแดนซ์ (Impedance) พบว่าผลกระทบของวัสดุชนิดต่างๆ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของเส้นสัญญาณอิมพีแดนซ์และมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน ซึ่งสามารถแบ่งได้หลักๆ เป็น 2 กลุ่ม คือ วัสดุกลุ่ม Ferromagnetic หรือวัสดุที่มีคุณสมบัติเป็นแม่เหล็ก และ วัสดุกลุ่ม Non-Ferromagnetic หรือวัสดุที่ไม่มีคุณสมบัติเป็นแม่เหล็ก ซึ่งสามารถบ่งชี้และแยกแยะชนิดวัสดุได้จากการเปรียบเทียบกับเส้นการปรับตั้งมุมเฟส (Phase, deg.) เดียวกัน แสดงลักษณะของสัญญาณที่ปรากฏดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 สัญญาณอิมพีแดนซ์ (Impedance) ของวัสดุตัวอย่างชนิดต่างๆ



รูปที่ 6 สัญญาณอิมพีแดนซ์ (Impedance) ของวัสดุสอบเทียบมาตรฐาน (Reference Standard)

ผลการศึกษาลักษณะของสัญญาณอิมพีแดนซ์ของวัสดุสอบเทียบมาตรฐาน (Reference Standard) เพื่อจำแนกชนิดวัสดุซึ่งส่งผลต่อสัญญาณของกระแสไหลวน โดยใช้หลักการทดสอบค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity) หรือค่าความต้านทานทางไฟฟ้า (Resistivity) ซึ่งจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงสัญญาณอิมพีแดนซ์ (Impedance) แสดงดังรูปที่ 6 พบว่าลักษณะของเส้นสัญญาณอิมพีแดนซ์ของวัสดุกลุ่ม Non-Ferromagnetic ให้มุมเฟสล่าช้าและความยาวของเส้นสัญญาณมีลักษณะที่แตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งพบว่าวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 304 (SUS304) มีความยาวของเส้นสัญญาณและมุมเฟสล่าช้าที่สุด (อ้างอิงแกน +x และ -y) สำหรับวัสดุทองแดง (Cu) มีความยาวของเส้นสัญญาณและมุมเฟสล่าช้ามากที่สุด สืบเนื่องจากเส้นส่วนโค้งค่าการนำ

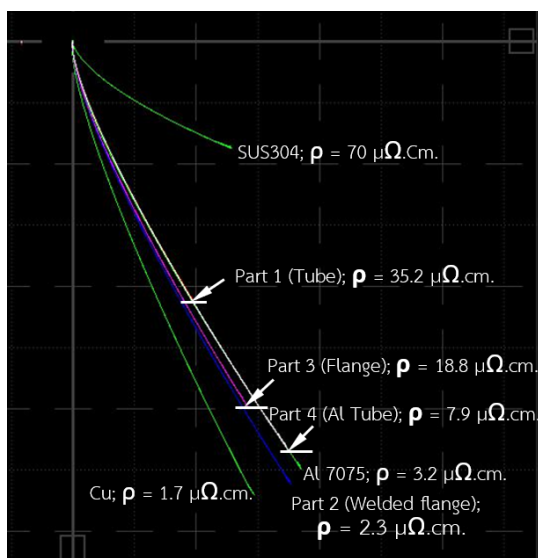
ไฟฟ้า (Conductivity curve) ซึ่งเกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะของเส้นสัญญาณเป็นไปตามสมบัติเฉพาะของวัสดุแต่ละชนิด แสดงค่าความต้านทานไฟฟ้า (Resistivity) และการนำไฟฟ้า (Conductivity) ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่าความต้านทานไฟฟ้าและค่าการนำไฟฟ้าของวัสดุสอบเทียบมาตรฐาน

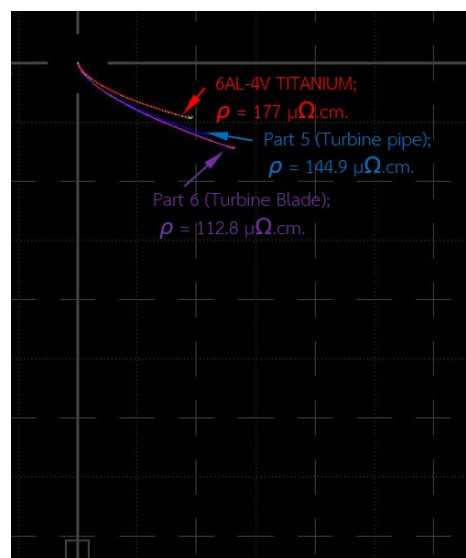
วัสดุ	ความต้านทานไฟฟ้า; Resistivity ($\mu\Omega\cdot\text{cm.}$)	การนำไฟฟ้า; Conductivity (IACS%)
อลูมิเนียม เกรด 6063 (Al 6063)	2.8	61.58
แมกนีเซียม (Mg)	4.6	37.48
ไทเทเนียม (Ti)	54.8	3.15
เหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 304 (SUS304)	70.0	2.46
ทองเหลือง (Brass)	7.0	24.63
ทองแดง (Cu)	1.7	100
ตะกั่ว (Pb)	20.6	8.37

4.2 ผลการศึกษาลักษณะสัญญาณของกระแสไหลวนของวัสดุชิ้นส่วนประกอบของเครื่องบิน

รูปที่ 7 แสดงลักษณะสัญญาณอิมพีแดนซ์ของวัสดุชิ้นส่วนเครื่องบินประเภทอลูมิเนียม (Al) ได้แก่ Part 1 (Tube), Part 2 (Welded flange), Part 3 (Flange) และ Part 4 (Al Tube) มีลักษณะของเส้นสัญญาณอิมพีแดนซ์อยู่ในแนวเดียวกันหรือใกล้เคียงกับเส้นสัญญาณของวัสดุ Al 7075 และมุมเฟสล่าช้ามากกว่าเส้นสัญญาณของวัสดุ SUS304 เมื่ออ้างอิงกับแนวแกน +X (ขอบเขตระหว่างวัสดุกลุ่ม Ferromagnetic และ Non-Ferromagnetic) ซึ่งมีความแตกต่างกับเส้นสัญญาณของวัสดุไทเทเนียม เกรด 6Al-4V อย่างชัดเจน แสดงดังรูปที่ 8



รูปที่ 7 เส้นสัญญาณการเปลี่ยนแปลงอิมพีแดนซ์
ของชิ้นส่วนประเภทอลูมิเนียม (Al)



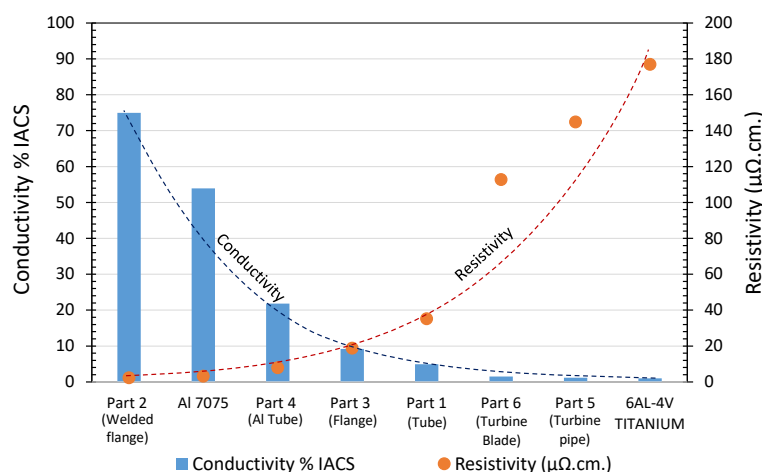
รูปที่ 8 เส้นสัญญาณการเปลี่ยนแปลงอิมพีแดนซ์
ของชิ้นส่วนประเภทไทเทเนียม (Ti)

สำหรับชิ้นส่วนประกอบเครื่องบิน Part 5 (Turbine pipe) และ Part 6 (Turbine Blade) ซึ่งเป็นวัสดุประเภทไทเทเนียม มีมุมเฟสลำหลังของเส้นสัญญาณอิมพีแดนซ์เข้าใกล้วัสดุไทเทเนียม เกรด 6AL-4V แต่มีความยาวแตกต่างกันเล็กน้อยเนื่องจากสารเคลือบผิวชิ้นงานบนชิ้นงานซึ่งส่งผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงความยาวของเส้นสัญญาณที่ปรากฏขึ้นบนหน้าจอแสดงผลของเครื่องทดสอบด้วยวิธีกระแสไหลวน

ตารางที่ 3 ค่าความต้านทานไฟฟ้าและค่าการนำไฟฟ้าของวัสดุชิ้นส่วนประกอบเครื่องบิน

วัสดุ	ความต้านทานไฟฟ้า; Resistivity ($\mu\Omega\cdot\text{cm.}$)	การนำไฟฟ้า; Conductivity (IACS%)
แท่งอลูมิเนียมมาตรฐาน (Al 7075)	3.2	53.90
แท่งไทเทเนียมมาตรฐาน (6AL-4V Ti)	177	0.97
ชิ้นส่วน 1 (Tube)	35.2	4.90
ชิ้นส่วน 2 (Welded flange)	2.3	74.96
ชิ้นส่วน 3 (Flange)	18.8	9.17
ชิ้นส่วน 4 (Al Tube)	7.9	21.82
ชิ้นส่วน 5 (Turbine pipe)	144.9	1.19
ชิ้นส่วน 6 (Turbine Blade)	112.8	1.53

ตารางที่ 3 แสดงค่าความต้านทานไฟฟ้า (Resistivity) และค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity) ของแท่งมาตรฐานอลูมิเนียม, ไทเทเนียม และชิ้นส่วนประกอบเครื่องบินที่ทำการศึกษาเพื่อตรวจสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของชิ้นส่วนที่ถูกเคลือบผิวด้วยสารเคลือบของชิ้นส่วนแต่ละชนิดและแนวโน้มของค่าดังกล่าวสำหรับวัสดุทั้ง 2 ประเภท คือ อลูมิเนียม เกรด 7075 และไทเทเนียม เกรด 6AL-4V ผลการตรวจสอบความต้านทานไฟฟ้าของวัสดุไทเทเนียมมีค่าระหว่าง 112.8 – 177 $\mu\Omega\cdot\text{cm.}$ และการนำไฟฟ้ามีค่าระหว่าง 0.97 - 1.53 IACS% สำหรับวัสดุประเภทอลูมิเนียมมีค่าความต้านทานไฟฟ้าระหว่าง 2.3 - 35.2 $\mu\Omega\cdot\text{cm.}$ และค่าการนำไฟฟ้าระหว่าง 4.90 - 53.90 IACS% ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการตรวจสอบด้วยเครื่องตรวจสอบด้วยวิธีกระแสไหลวนสามารถทำนายวัสดุตัวอย่างที่เป็นสื่อกระแสไฟฟ้าที่ไม่เป็นแม่เหล็กและเป็นแม่เหล็กจากการวัดการนำไฟฟ้าของโลหะโดยอิงจากการทดสอบกระแสไหลวนได้จากสัญญาณเฟสของการเปลี่ยนแปลงอิมพีแดนซ์เป็นเส้นตรงกับค่าการนำไฟฟ้า [12,13] เป็นต้น



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่าง Resistivity และ Conductivity ของชิ้นส่วนประกอบเครื่องบิน

จากผลการศึกษาค่าความต้านทานไฟฟ้า (Resistivity) และค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติทางไฟฟ้าของแท่งมาตรฐานอลูมิเนียม ไทเทเนียม และชิ้นส่วนประกอบเครื่องบินดังรูปที่ 9 พบว่าชิ้นส่วนประกอบเครื่องบินประเภทอลูมิเนียมมีค่าความต้านทานไฟฟ้าสูงสุดและมีแนวโน้มลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุประเภทไทเทเนียมซึ่งมีค่าความต้านทานไฟฟ้าค่อนข้างต่ำ ถึงแม้ว่าค่าความต้านทานไฟฟ้ามีแนวโน้มลดลง แต่ค่าการนำไฟฟ้ามีแนวโน้มแปรผกผันกับค่าความต้านทานไฟฟ้า เนื่องจากคุณสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุที่แตกต่างกันของวัสดุทั้ง 2 ประเภท อย่างไรก็ตาม ยังไม่สามารถระบุชนิดย่อยหรือแบ่งเกรดของวัสดุได้อย่างชัดเจน จึงต้องทำการศึกษาโครงสร้างจุลภาคและวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมี และตรวจสอบลักษณะของสัญญาณอิมพีแดนซ์ที่เกิดขึ้นในแต่ละชนิดย่อยของวัสดุ เพื่อยืนยันการแบ่งเกรดของวัสดุสำหรับการจำแนกชนิดย่อยของวัสดุเดียวกันที่ต้องการศึกษาต่อไป

4. สรุป

- 1) สัญญาณอิมพีแดนซ์ของวัสดุตัวอย่างชนิดต่างๆ สามารถระบุประเภทของวัสดุได้ 2 กลุ่ม คือ Ferromagnetic และ Non-Ferromagnetic จากมุมเฟสล้าหลัง ทิศทาง และลักษณะของเส้นสัญญาณอิมพีแดนซ์ สำหรับวัสดุชิ้นส่วนประกอบเครื่องบินมีลักษณะเส้นสัญญาณอิมพีแดนซ์สอดคล้องกับเส้นสัญญาณของวัสดุสอบเทียบมาตรฐาน
- 2) สมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุชิ้นส่วนประกอบของเครื่องบินจากการแปลงสัญญาณอิมพีแดนซ์สามารถให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าและการนำไฟฟ้าเป็นไปตามคุณสมบัติของวัสดุประเภทอลูมิเนียมและไทเทเนียม พบว่าวัสดุอลูมิเนียมมีค่าความต้านทานไฟฟ้าต่ำกว่าวัสดุไทเทเนียมแต่มีค่าการนำไฟฟ้าสูงกว่าไทเทเนียม

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] *New S-Curve and Manpower Development Policy Direction of Country 2020–2024*. Bangkok: Ministry of Higher Education, Science, Research and Innovation, 2020. (in Thai)
- [2] A. Prateepasen, *Non-Destructive Testing in Welds and Researches*. Bangkok: Chulalongkorn University Printing House, 2011. (in Thai)
- [3] Y. Kong, C. J. Bennett, and C. J. Hyde, “A Review of Non-Destructive Testing Techniques for The In-Situ Investigation of Fretting Fatigue Cracks,” *Materials & Design*, vol. 196, p. 109093, 2020. doi:10.1016/j.matdes.2020.109093
- [4] J. R. Deepak, V. K. Bupesh Raja, D. Srikanth, H. Surendran, and M. M. Nickolas, “Non-Destructive Testing (NDT) Techniques for Low Carbon Steel Welded Joints: A Review and Experimental Study,” *Materials Today: Proceedings*, vol. 44, pp. 3732–3737, 2021. doi:10.1016/j.matpr.2020.11.578
- [5] R. Phaoniam and M. Noipitak, “Manufacturing A Standard Defect Prototype in Eddy Current Testing for Training Highly Skilled NDT Inspector on Aircraft Maintenance,” *National research Council of Thailand; Report*, pp. 112–126, 2022. (in Thai)
- [6] B. Weekes, D. P. Almond, P. Cawley, and T. Barden, “Eddy-Current Induced Thermography Probability Of Detection Study Of Small Fatigue Cracks In Steel, Titanium And Nickel-Based Superalloy,” *NDT & E International*, vol. 49, pp. 47–56, 2012. doi:10.1016/j.ndteint.2012.03.009

- [7] R. Lin, B. Liu, J. Zhang, and S. Zhang, “Microstructure Evolution and Properties Of 7075 Aluminum Alloy Recycled from Scrap Aircraft Aluminum Alloys,” *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 19, pp. 354–367, 2022. doi:10.1016/j.jmrt.2022.05.011
- [8] M. Janovec, M. Smetana, and M. Bugaj, “Eddy Current Array Inspection of Zlin 142 Fuselage Riveted Joints,” *Transportation Research Procedia*, vol. 40, pp. 279–286, 2019. doi:10.1016/j.trpro.2019.07.042
- [9] R. Phaoniam and et al., “Studying Weld Solidification Cracking on Al 6063 for Eddy Current Testing in Aircraft Component Maintenance,” in *Proceeding of 7th Rajamangala Manufacturing & Management Technology Conference 2022 (RMTC2022)*. Rajamangala University of Technology Isan, Thailand, pp. 219–220, 2022. (in Thai)
- [10] R. Phaoniam and et al., “Study of Cracking Behavior of a Drilled Hole Edge Crack on ECT Sensitivity for Machinery Component Maintenance,” in *Proceeding of 7th Rajamangala Manufacturing & Management Technology Conference 2022 (RMTC2022)*. Rajamangala University of Technology Isan, Thailand, pp. 221–222, 2022. (in Thai)
- [11] *2021 ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section V: Nondestructive Examination*. New York: American Society of Mechanical Engineers, 2021.
- [12] X. Meng, M. Lu, W. Yin, A. Bennecer, and K. J. Kirk, “Inversion of Lift-Off Distance and Thickness for Nonmagnetic Metal Using Eddy Current Testing,” *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 70, pp. 1–8, 2021, doi: 10.1109/tim.2020.3038289.
- [13] C. Wang, M. Fan, B. Cao, B. Ye, and W. Li, “Novel Noncontact Eddy Current Measurement of Electrical Conductivity,” *IEEE Sensors Journal*, vol. 18, no. 22, pp. 9352–9359, Nov. 2018, doi: 10.1109/jsen.2018.2870676.