Perancangan dan Manufaktur Alat Yoke Elektromagnetik Berbasis Arus FWDC untuk Pengujian NDT pada Material Feromagnetik

Muhammad Tito Maulana[1], Yohanes Sinung Nugroho[2]

[1]Program Studi Teknik Aeronautika, Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Bandung, Bandung, Indonesia
E-mail : [1]muhammad.tito.aer23@polban.ac.id
[2]Program Studi Teknik Aeronautika, Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Bandung, Bandung, Indonesia
E-mail: [2]sinung@polban.ac.id

ABSTRAK

Di bidang industri penerbangan, memastikan struktur pesawat udara tetap kuat dan aman merupakan hal yang sangat penting agar pesawat bisa terbang dengan aman. Hal ini terkait dengan beban yang terus-menerus mengenai komponen pesawat, yang bisa menyebabkan retakan. *Magnetic Particle Inspection* (*MPI*) adalah metode pemeriksaan tanpa merusak (NDT) yang baik untuk mendeteksi retakan ini. Namun, metode penggunaan yoke yang menggunakan arus AC memiliki daya penetrasi yang kurang dalam, sedangkan arus DC murni kurang efektif dalam memindahkan partikel karena tidak ada getaran. Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan membuat yoke elektromagnetik yang menggunakan arus *Full Wave Direct Current (FWDC)* agar dapat mengatasi kekurangan tersebut. Metode yang digunakan mencakup penentuan *Design Requirement Objectives* (DRO), pembuatan desain mekanis dengan menggunakan perangkat lunak SolidWorks, serta proses manufaktur dengan memakai inti besi baja silikon dan *casing* yang dibuat dengan teknik cetak 3D. Sistem kelistrikan dirancang agar menghasilkan arus FWDC yang memiliki sifat penetrasi seperti arus DC, tetapi tetap memiliki ripple untuk memperkuat agitasi partikel magnetik. Pengujian alat akan mengacu pada standar ASME Section V Artikel 7, hasil akhir dari Penelitian ini adalah purwarupa yoke FWDC yang mampu mendeteksi cacat di permukaan maupun di bawah permukaan (*subsurface*) pada material feromagnetik secara efisien dan akurat.

Kata Kunci:

Magnetic Particle Testing (MPT), Arus FWDC, yoke*, Non-Destructive Testing* (NDT), Material feromagnetik.

In the aviation industry, ensuring that aircraft structures remain strong and safe is crucial for safe flight. This is due to the constant stress placed on aircraft components, which can lead to cracks. Magnetic Particle Inspection (MPI) is an effective non-destructive testing (NDT) method for detecting these cracks. However, the yoke method using AC current has limited penetration depth, while pure DC current is less effective at moving particles due to the absence of vibration. This research aims to design and fabricate an electromagnetic yoke using Full Wave Direct Current (FWDC) to address these shortcomings. The methods employed include determining Design Requirement Objectives (DRO), creating a mechanical design using SolidWorks software, and a manufacturing process utilizing a ferrite core and a casing produced via 3D printing. The electrical system is designed to generate FWDC current that possesses the penetration characteristics of DC current but retains ripple to enhance the agitation of magnetic particles. Testing of the device will adhere to ASME Section V, Article 7 standards. The final outcome of this research is an FWDC yoke prototype capable of efficiently and accurately detecting both surface and subsurface defects in ferromagnetic materials.

Keywords:

Magnetic Particle Testing (MPT), FWDC current, yoke, Non-Destructive Testing (NDT), ferromagnetic materials.

1. PENDAHULUAN

Untuk menjamin kelaikudaraan pesawat udara, integritas strukturnya sangat penting, terutama untuk mencegah retakan akibat beban siklik tinggi. Metode pengamatan partikel magnetik (MPI) berguna untuk mendeteksi cacat permukaan dan bawah permukaan (*subsurface*) pada material feromagnetik. Ini dapat dilakukan tanpa merusak komponen pada tahap kontrol kualitas manufaktur dan pemeliharaan berkala. Penggunaan alat Yoke Elektromagnetik portabel sangat diandalkan untuk inspeksi lapangan dengan geometri yang kompleks. Penggunaan arus *Full-Wave Direct Current* (*FWDC*) pada Yoke memiliki keunggulan yang signifikan dibandingkan arus alternating (AC) karena mampu menghasilkan penetrasi medan magnet yang lebih dalam dengan distribusi fluks yang konsisten dan stabil. Oleh karena itu, FWDC adalah metode yang sangat baik untuk menemukan diskontinuitas di bawah permukaan benda uji.

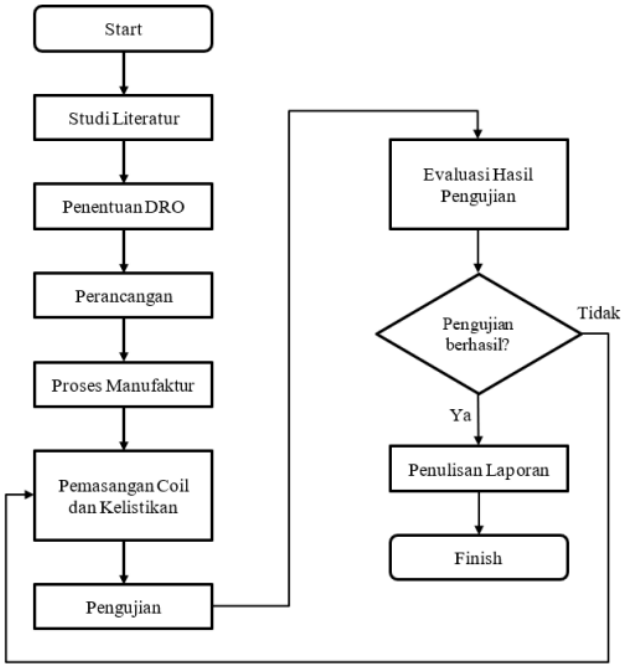
2. TINJAUAN PUSTAKA

Menurut Rifaldi (2025), *Magnetic Particle Testing* (MT) adalah metode *Non-Destructive Testing* (NDT) yang sangat

efektif untuk mendeteksi cacat permukaan pada material feromagnetik. Prinsip dasarnya mengandalkan kebocoran fluks magnetik (*Magnetic Flux Leakage*) yang terjadi saat garis gaya magnet terganggu oleh adanya diskontinuitas. Partikel magnetik yang ditaburkan di atas permukaan akan tertarik ke area kebocoran tersebut, membentuk indikasi visual yang dapat diinterpretasikan (5).

3. METODE PENYELESAIAN MASALAH

Penyelesaian penelitian ini menggabungkan metode analisis dan eksperimen. Dalam pendekatan analitis, dilakukan studi literatur, observasi, serta proses perancangan untuk memahami dasar teori dan konsep yang relevan. Sementara itu, pendekatan eksperimental mencakup serangkaian uji coba dan evaluasi hasil guna memastikan keakuratan dan validitas data yang diperoleh. Keseluruhan proses ini akhirnya bermuara pada penarikan kesimpulan dan penyusunan laporan akhir yang menyajikan temuan utama dari penelitian. Rangkaian proses ini dapat dilihat pada Gambar 1



Gambar 1. Diagram Alir

3.1 Studi Literatur

Dokumen Training Handout Magnetic Particle Testing yang dibuat oleh NDE Center ITS Surabaya dan diedit oleh Wing Hendroprasetyo, E.Eng. (2009) adalah referensi utama dari penelitian ini karena sangat penting untuk meningkatkan pemahaman kita tentang prinsip dasar *Non-Destructive Testing* (*NDT*) dan metode *Magnetic Particle Testing (MT).*

Literatur tersebut memberikan dasar teoritis yang mendalam dan menawarkan pedoman untuk melakukan penelitian. Ini terutama berlaku ketika menghadapi masalah teknis dan elemen lain yang memerlukan penjelasan selama proses menyelesaikan penelitian ini.

3.2 Desain Requirements and Objectives (DRO)

Dalam proses pengembangan rancangan, Persyaratan dan Tujuan Desain (DRO) adalah komponen penting. Sepanjang proses perancangan, detail spesifikasi yang disusun pada tahap ini berfungsi sebagai acuan utama untuk pengambilan keputusan teknis. Tabel 1 menampilkan ringkasan DRO.

Tabel 1. DRO

Tipe	Kategori	Parameter
Material	*Must*	1. Material yang digunakan untuk inti besi yoke adalah Baja Silikon. 2. Material yang digunakan untuk koker adalah paper bakelit. 3. Material yang digunakan untuk casing yoke adalah filamen Polyethylene Terephthalate Glycol (PETG)
Desain	*Must*	Digambar menggunakan aplikasi solidworks
Proses Manufaktur	*Must*	1. Proses manufaktur untuk inti besi yoke menggunakan metode fabrikasi dan perakitan manual 2. Setelah inti besi yoke selesai dibuat, dilakukan pembuatan lilitan dengan menggunakan Kawat tembaga email dengan diameter 0,8 mm. 3. Proses manufaktur casing yoke menggunakan 3D printing.
Pengujian	*Must*	Dilakukan pengujian dengan menggunakan *pie gauge* dan 2 spesimen yang berbeda sebanyak 10 kali percobaan pada setiap spesimen menggunakan yoke.
	Wish	Hasil dari pengujian dinyatakan lolos uji apabila cacat dapat muncul.

Catatan: M = *Must*, W = *Wish*.

3.3 Alat dan Bahan Yang Digunakan

Tabel 2 mencakup daftar lengkap alat dan bahan yang digunakan untuk mendukung proses perancangan dan pembuatan yoke elektromagnetik. Tabel ini mencakup komponen utama alat kontrol, elemen kelistrikan, dan berbagai perangkat pendukung lainnya yang digunakan selama tahapan manufaktur dan pengujian secara keseluruhan.

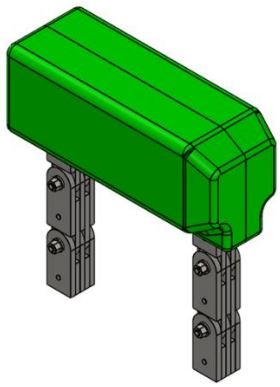
Untuk memastikan kinerja optimal, pemilihan setiap komponen didasarkan pada spesifikasi teknis yang sesuai dengan kebutuhan alat.

Tabel 2. Alat dan Bahan

No	Nama Alat dan Bahan	Jumlah
1	Gerinda Tangan	1
2	Grinder Mini	1
3	Gunting *Plate*	1
4	Bor	1
5	Mal Radius	1
6	Guris	1
7	Solder	1
8	Kunci mekanik	1
9	Lampu	1
10	Light Meter	1
11	Laptop	1
12	Kamera handphone	1
13	Gauss meter	1
14	Pie Gauge	1
15	Yoke Magnaflux Y-7	1
16	Test Piece	1
17	Partikel Magnet (MPI Ink, Magnaglo)	1
18	Cleaner	1
19	Autosol Metal Polish	1
20	PETG	1
21	Kawat Tembaga Email	1
22	Besi Kern E dan I	1
23	Paper Bakelit	1

3.4 Perancangan alat

Pada fase ini, dirancang yoke elektromagnetik yang akan digunakan dalam praktik pengujian partikel magnetik dengan dukungan perangkat lunak SolidWorks. Proses ini melibatkan pemilihan desain yang sesuai. Pengujian dan pemilihan material terbaik untuk menjamin kinerja alat yang tinggi. Desain serta bahan yang dipilih perlu memenuhi standar teknis dan
menilai efektivitas dan ketahanan supaya perangkat dapat bekerja dengan optimal dalam tahap pengujian.



Gambar 2. Yoke Assembly

3.5 Proses Manufaktur

Tahapan awal dalam proses manufaktur alat Yoke Elektromagnetik adalah pembuatan inti magnetik. Inti magnet ini berfungsi sebagai media utama untuk mengalirkan fluks magnetik yang dihasilkan oleh kumparan menuju benda uji. Proses pengerjaan inti magnetik ini meliputi beberapa tahapan fabrikasi sebagai berikut:

1. Proses Pemotongan (*Cutting*)

Lembaran plat besi tersebut kemudian dipotong menyesuaikan dengan dimensi dan profil geometri desain yoke yang telah dirancang. Proses pemotongan ini dilakukan menggunakan alat pemotong plat gunting untuk membentuk kaki-kaki (*legs*) yoke dan bagian badan (*body*) menggunakan gerinda.

Gambar 3. Proses Pemotongan

2. Pengeboran (*Drilling*)

Tahap selanjutnya adalah membuat lubang pada lembaran plat yang telah presisi menggunakan mesin bor. Lubang-lubang ini diposisikan pada titik-titik strategis. Fungsi utama dari lubang ini adalah sebagai tempat masuknya baut, dan paku keling (*rivet*) yang akan berfungsi sebagai pengikat tumpukan plat.

Gambar 4. Proses Pelubangan

3. Proses Riveting

Pemasangan *rivet* dilakukan secara manual melalui penumbukan ekor *rivet* menggunakan palu hingga terbentuk kepala bentukan (*shop head*) yang kokoh.

Gambar 5. *Riveting*

4. Penumpukan dan Penyatuan

Setelah semua plat selesai dibor, plat-plat tipis tersebut ditumpuk hingga mencapai ketebalan inti yoke yang direncanakan. Tumpukan plat kemudian diikat dengan kuat melalui lubang yang telah dibuat menggunakan baut dan rivet sehingga membentuk satu kesatuan blok inti magnet (*core*) yang solid dan kokoh, siap untuk dipasangkan kumparan kawat tembaga.

Gambar 6. Inti besi yang sudah jadi

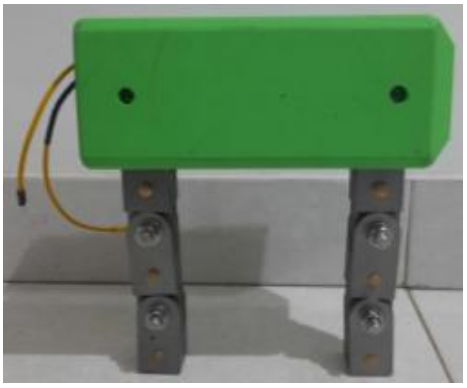
5. Pemasangan coil

Pada proses ini dipasangkan coil pada *body* yoke sebanyak 1500 lilitan dengan menggunakan diameter kawat sebesar 0,8 mm.

Gambar 7. Yoke yang sudah dipasangkan coil

6. Pemasangan *Casing*

Fabrikasi *casing* inti besi dilakukan menggunakan metode *3D printing* bermaterial *Polyethylene Terephthalate Glycol* (PETG) untuk menghasilkan struktur pelindung yang presisi dan tahan secara mekanis.



Gambar 8. Inti Besi Yang sudah diberi *casing*

3.6 Pengujian

Pada tahapan ini, dilaksanakan pengujian kinerja *yoke* magnetik dengan mengaplikasikan metode *Magnetic Particle Inspection* (MPI). Pengujian tersebut diaplikasikan pada tiga jenis spesimen uji, yakni *pie gauge*, *test piece* A, dan *test piece* B. Guna mengevaluasi tingkat konsistensi dan keandalan (*reliability*) perangkat uji, proses inspeksi pada masing-masing spesimen direpetisi sebanyak 10 kali.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Pengujian

Pengujian sensitivitas dan keandalan alat Yoke FWDC dilakukan sebanyak sepuluh kali perulangan menggunakan *pie gauge*, bersama dengan Spesimen A dan Spesimen B. Hasil pengujian menunjukkan tingkat keberhasilan 100%, dengan garis diskontinuitas dan indikasi cacat yang jelas dan konsisten pada seluruh benda uji yang diuji. Hal ini menunjukkan bahwa perangkat yang dirancang memiliki tingkat akurasi yang tinggi.

Gambar 9. Pengujian pada *pie gauge*

Hasil pengujian menggunakan *pie gauge* berhasil memunculkan indikasi cacat buatan secara visual. Hal ini mengonfirmasi bahwa kekuatan dan arah medan magnet yang diaplikasikan pada spesimen telah memadai untuk mendeteksi cacat permukaan.

Gambar 10. *Test Piece* A (MT-5866)

Setelah sensitivitas dan arah medan magnet diverifikasi menggunakan *pie gauge*, pengujian partikel magnetik yang dilakukan berhasil memunculkan indikasi cacat secara jelas pada permukaan spesimen uji dengan melakukan 10 kali percobaan dan dapat memunculkan cacat pada lokasi yang sama dengan panjang cacat 19,30 mm dan 8,14 mm.

Gambar 11. *Test Piece* B (MT-5867)

Pada pengujian spesimen B, inspeksi dilakukan sebanyak 10 kali percobaan. Dari seluruh iterasi tersebut, *yoke* magnetik secara konsisten berhasil memunculkan indikasi cacat permukaan dengan tingkat keberhasilan mencapai 100%.

4.2 Pembahasan

Evaluasi kinerja *yoke* magnetik pada pengujian *Non-Destructive Testing* (NDT) metode *Magnetic Particle Inspection* menunjukkan hasil yang memenuhi standar operasional. Pada uji gaya angkat (*lifting power test*), *yoke* magnetik terbukti mampu mengangkat beban uji seberat 10 *pounds* (4,5 kg). Kemampuan ini memenuhi kriteria keberterimaan yang disyaratkan dalam standar ASME *Section* V, yang memvalidasi bahwa intensitas medan magnet yang dihasilkan telah memadai. (3)
Selanjutnya, untuk memverifikasi arah medan magnet dan sensitivitas pengujian, dilakukan kalibrasi menggunakan *pie gauge* dengan metode partikel basah tampak (*wet visible*). Dalam pengujian ini, *yoke* magnetik berhasil menginduksikan medan magnet secara optimal, sehingga indikasi cacat buatan pada *pie gauge* dapat divisualisasikan dengan jelas hanya dalam rentang waktu 7 detik setelah pengaplikasian suspensi partikel. Secara keseluruhan, perpaduan hasil uji beban dan uji *pie gauge* ini merepresentasikan bahwa perangkat dan metode yang diaplikasikan memiliki keandalan yang tinggi.

5. KESIMPULAN

Berdasarkan proses perancangan, manufaktur, dan pengujian yang telah dilakukan, dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1 Purwarupa (*prototype*) alat uji Yoke Elektromagnetik portabel berhasil dirancang dan dimanufaktur. Perancangan mekanis dilakukan menggunakan perangkat lunak SolidWorks, sedangkan manufaktur alat menggabungkan penggunaan inti besi kern dan pembuatan casing pelindung menggunakan teknologi cetak 3D (3D printing).
2 Penggunaan arus Full-Wave Direct Current (FWDC) pada alat Yoke ini berhasil memberikan distribusi fluks magnetik yang lebih stabil. Karakteristik arus FWDC memungkinkan alat ini memiliki daya penetrasi medan magnet yang dalam (seperti arus DC) namun tetap memiliki riak (*ripple*) gelombang yang berfungsi memperkuat pergerakan partikel magnetik.
3 Berdasarkan pengujian yang mengacu pada standar ASME Section V Artikel 7, alat Yoke FWDC ini terbukti andal dan efektif dalam mendeteksi indikasi cacat, baik yang berada di permukaan (*surface*) maupun di bawah permukaan (*subsurface*) pada spesimen material feromagnetik.

DAFTAR PUSTAKA

1. Naryono N, Suharyadi I. Analisis pengelasan dingin dengan menggunakan metode high frequency electrical resistance welding pada proses pembuatan pipa baja Stkm 13b. SINTEK Jurnal: Jurnal Ilmiah Teknik Mesin. 2007;1(2).
2. Isogami S, Matsumoto H. Optimum yoke shape designs for enhancing flux density in dual-Halbach arrayed permanent magnets. Journal of the Magnetics Society of Japan. 2015;39(1):21-4.
3. American Society of Mechanical Engineers. ASME boiler and pressure vessel code (BPVC), Section V: nondestructive examination. New York: American Society of Mechanical Engineers; 2021.
4. NDE Center, Department of Naval Architecture and Shipbuilding Engineering, Sepuluh Nopember Institute of Technology. Magnetic particle testing. Surabaya: Sepuluh Nopember Institute of Technology.
5. Ramadhan RS, Nugroho YS. Rancang bangun yoke elektromagnetik untuk pengujian NDT dengan metode magnetic particle test berbasis arus AC. In: Prosiding Industrial Research Workshop and National Seminar. 2025. p. 277-82.
6. Santoso AG, et al. Rancang bangun alat demagnetisasi untuk praktik magnetic particle testing. In: Prosiding Industrial Research Workshop and National Seminar. 2024. p. 354-61.
7. NDE-Ed.org. Magnetic particle testing [Internet]. NDE-Ed.org; [cited 2026 Aug 8]. Available from: https://www.nde-ed.org/NDETechniques/MagParticle/index.xhtml
8. Rajput RK. A textbook of electrical machines. New Delhi: Laxmi Publications; 2006.
9. Fitzgerald AE, Kingsley C, Umans SD. Electric machinery. 6th ed. New York: McGraw-Hill; 2003.
10. Callister WD Jr, Rethwisch DG. Materials science and engineering: an introduction. 9th ed. Hoboken (NJ): John Wiley & Sons; 2014.
11. Hayt WH, Buck JA. Engineering electromagnetics. 9th ed. New York (NY): McGraw-Hill; 2018.
12. Pyrhönen J, Jokinen T, Hrabovcova V. Design of rotating electrical machines. 2nd ed. Chichester (UK): John Wiley & Sons; 2014.
13. ASTM International. ASTM E709-21: Standard guide for magnetic particle testing. West Conshohocken (PA): ASTM International; 2021.
14. Ness S, Sherlock CN, editors. Nondestructive testing handbook, volume 8: magnetic particle testing. 3rd ed. Columbus (OH): American Society for Nondestructive Testing; 2016.
15. Budynas RG, Nisbett JK. Shigley's mechanical engineering design. 10th ed. New York: McGraw-Hill Education; 2015.