

RANCANG BANGUN FAN UNTUK ELECTRIC DUCTED FAN (EDF) DAN ANALISIS PERFORMANYA

Buyung Junaidin^{1*}, Satya Wicaksono²

¹Prodi Teknik Dirgantara, Fakultas Teknologi Kedirgantaraan, Institut Teknologi Dirgantara Adisutjipto, Jl.Janti Blok R Lanud Adisutjipto Yogyakarta, 55198

*buyung112011@gmail.com

Diterima: 07 Juni 2022

Direvisi: 15 Agustus 2022

Disetujui: 19 September 2022

ABSTRAK

Di dunia penerbangan, propulsi elektrik telah lama diaplikasikan, salah satunya adalah electric ducted fan (EDF). Di Indonesia, awalnya EDF lebih banyak digunakan untuk propulsi pesawat aeromodelling untuk tujuan hobi. LAPAN menginisiasi penggunaan EDF sebagai propulsi pesawat tanpa awak yang telah diuji terbang sejak tahun 2013. Selain itu, EDF juga dimanfaatkan dalam Kompetisi Muatan Roket dan Roket Indonesia (KOMURINDO). KOMURINDO adalah kompetisi tahunan rancang bangun muatan roket dan roket Electric Ducted Fan (EDF) tingkat perguruan tinggi yang diselenggarakan LAPAN sejak tahun 2009. Pada kompetisi roket EDF, EDF menjadi bagian sekunder dalam kompetisi karena tidak diwajibkan untuk dilakukan rancang bangun sehingga para peserta lebih memilih produk siap pakai yang semuanya berasal dari luar negeri. Hal ini memberikan batasan kepada para peserta dalam melakukan rancang bangun roket EDF karena dalam perancangan, spesifikasi EDF harus sesuai dengan kebutuhan rancangan awal yang ditentukan. Oleh karena itu, penelitian ini perlu dilakukan sebagai langkah awal dalam memahami proses rancang bangun untuk pengembangan EDF. Fan merupakan bagian utama dari EDF yang berputar atau disebut juga rotor. Fan berperan vital dalam menghasilkan gaya dorong melalui percepatan aliran udara, sehingga perlu dilakukan perancangan untuk menghasilkan fan yang sesuai kebutuhan. Metode perancangan yang digunakan dalam penelitian ini adalah gabungan dari persamaan gaya dorong untuk rotor dan teori elemen bilah. Metode CFD digunakan untuk analisis performa fan hasil rancangan yang dibandingkan dengan hasil pengujian eksperimen dengan alat uji EDF test bed. Hasil perancangan diperoleh geometri fan EDF yang menghasilkan gaya dorong berdasarkan analisis CFD jauh lebih kecil dengan perkiraan awal dengan metode analitik, perlu dilakukan proses optimasi dalam proses penentuan geometri fan dengan metode yang lebih baik sehingga gaya dorong yang dihasilkan sesuai dengan perkiraan awal. Hasil pengujian EDF menunjukkan bahwa gaya dorong yang dihasilkan EDF lebih kecil dibandingkan dengan hasil analisis CFD, hal ini dapat disebabkan karena jarak antara ujung fan dan dinding duct yang kurang optimal pada EDF yang diuji karena hasil manufaktur sehingga menyebabkan munculnya tip vortex yang mengurangi performa fan. Selain itu, adanya hambatan aliran dari permukaan duct yang tidak halus akibat proses manufaktur. Metode CFD dapat menjadi langkah awal untuk mengetahui performa fan atau EDF sebelum dilanjutkan ke proses pengujian purwarupa karena hasil CFD mendekati hasil pengujian.

Kata kunci: Rancang-bangun, EDF, fan, CFD

ABSTRACT

In aviation, electric propulsion has long been applied, one of which is the electric ducted fan (EDF). In Indonesia, initially, EDF was mostly used for the propulsion of aeromodelling aircraft for hobby purposes. LAPAN initiated the use of EDF as a drone propulsion which flown since 2013. In addition, EDF is also used in the Indonesian Rocket and Rocket Payload Competition (KOMURINDO). KOMURINDO is an annual

competition for the design of rocket payloads and Electric Ducted Fan (EDF) rockets at the university level which has been held by LAPAN since 2009. In the EDF rocket competition, EDF is a secondary part of the competition because it is not required to design and build so the participants prefer products ready to use all of which come from abroad. This limits the participants in designing the EDF rocket because, in the design, the EDF specifications must be following the initial design requirements specified. Therefore, this research needs to be carried out as a first step in understanding the design process for the development of EDF. The fan is the main part of the rotating EDF or also called the rotor. Fan plays a vital role in generating thrust through accelerating airflow, so it is necessary to design to produce a fan that suits your needs. The design method used in this research is a combination of the thrust equation for the rotor and the blade element theory. The CFD method is used to analyze the performance of the designed fan which is compared with the experimental test results with the EDF test bed. The results of the design obtained that the EDF fan geometry which produces a thrust based on CFD analysis is much smaller than an initial estimate using the analytical method, it is necessary to carry out an optimization process in the process of determining the fan geometry with a better method so that the resulting thrust is following the initial estimate. The results of the EDF test show that the thrust produced by the EDF is smaller than the results of the CFD analysis, this can be due to the less optimal distance between the fan tip and the duct wall on the EDF being tested due to manufacturing results, causing the appearance of a tip vortex which reduces fan performance. In addition, the flow resistance of the duct surface is not smooth due to the manufacturing process. The CFD method can be the first step to determine the performance of the fan or EDF before proceeding to the prototype testing process because the CFD results are close to the test results.

Keywords: Design, EDF, fan, CFD

PENDAHULUAN

Propulsi elektrik menjadi salah satu topik penelitian yang berkembang seiring dengan meningkatnya kesadaran manusia atas kebutuhan energi bersih. Propulsi elektrik dapat bekerja tanpa menghasilkan gas buang atau zero emission (Geetha, A. et.al., 2017). Di dunia penerbangan, propulsi elektrik telah lama diaplikasikan, salah satunya adalah electric ducted fan (EDF). EDF dengan power density yang tinggi digunakan secara luas pada pesawat hybrid, pesawat elektrik dan pesawat VTOL (Jin, Y. et. al., 2018). Propulsi EDF telah sukses diaplikasikan pada wahana udara nirawak karena kelebihanannya berupa ukuran yang kompak dan gaya dorong yang terarah sehingga dapat meningkatkan performa dan kualitas terbang wahana (Prisacariu et. al., 2013). EDF telah populer digunakan sebagai propulsi untuk pesawat besar maupun pesawat berukuran kecil karena kelebihanannya memiliki nilai efisiensi gaya dorong lebih baik dibandingkan dengan propeler terbuka, hal ini disebabkan karena duct dapat mengurangi tip vortex dan penurunan tekanan pada ujung bilah propeler atau fan. EDF juga banyak digunakan untuk tujuan lain selain propulsi wahana misalnya untuk aplikasi robot panjat dinding, karena kemampuan EDF menghasilkan tekanan negatif sehingga mampu menempel

pada dinding (Brusell A. et. al., 2017; Sekhar, P. et. al., 2014).

Di Indonesia, awalnya EDF lebih banyak digunakan untuk propulsi pesawat aeromodeling untuk tujuan hobi. LAPAN menginisiasi penggunaan EDF sebagai propulsi pesawat tanpa awak yang telah diuji terbangkan sejak tahun 2013. Selain itu, EDF juga dimanfaatkan dalam Kompetisi Muatan Roket dan Roket Indonesia (KOMURINDO) sebagai propulsi roket pengganti tenaga pendorong roket konvensional yang berupa bahan bakar propellant. KOMURINDO adalah kompetisi tahunan rancang bangun muatan roket dan roket Electric Ducted Fan (EDF) tingkat perguruan tinggi yang diselenggarakan LAPAN sejak tahun 2009. Pada kompetisi roket EDF, EDF menjadi bagian sekunder dalam kompetisi karena tidak diwajibkan untuk dilakukan rancang bangun sehingga para peserta lebih memilih produk siap pakai yang semuanya berasal dari luar negeri. Hal ini memberikan batasan kepada para peserta dalam melakukan rancang bangun roket EDF karena dalam perancangan, spesifikasi EDF harus sesuai dengan kebutuhan rancangan awal yang ditentukan. Oleh karena itu, penelitian ini perlu dilakukan sebagai langkah awal dalam memahami proses rancang bangun untuk pengembangan EDF.

EDF adalah konsep sederhana dari propulsi. Sebuah EDF terdiri dari propeler atau rotor yang terpasang di dalam duct. Mesin EDF biasanya menghasilkan gaya dorong yang tinggi pada kecepatan putar rendah hingga kecepatan sedang (Salazar, D.M. et. al., 2020). Konfigurasi EDF lebih sederhana dibandingkan dengan mesin jet, namun dapat menghasilkan gaya dorong yang cukup untuk kebutuhan terbang seperti pada pesawat tanpa awak (Junaidin, B. et. al., 2019). Selain itu, berdasarkan kebutuhan operasional penggunaan EDF lebih murah jika dibandingkan dengan mesin jet ukuran kecil, sehingga EDF menjadi pilihan yang sering digunakan sebagai alternative propulsi pengganti mesin jet pada pesawat tanpa awak.

Fan merupakan bagian utama dari EDF yang berputar atau disebut juga rotor. Fan berperan vital dalam menghasilkan gaya dorong melalui percepatan aliran udara, sehingga perlu dilakukan perancangan untuk menghasilkan fan yang sesuai kebutuhan. Tujuan utama perancangan fan sebuah EDF adalah memenuhi kebutuhan performa EDF dengan menghasilkan gaya dorong maksimal. Fan EDF termasuk dalam kelompok axial fan. Metode perancangan axial fan telah berkembang sejak awal digunakan teori disk aktuator atau teori momentum axial yang diaplikasikan pada propeler. Teori axial momentum dapat digunakan untuk memperkirakan efisiensi propeler pada kondisi operasional tertentu namun tidak dapat menghasilkan informasi mengenai bentuk rotor. Oleh karena itu, teori ini tidak dapat dipertimbangkan sebagai metode yang efektif dalam perancangan axial fan sehingga berkembang teori baru dalam melakukan perancangan axial fan yaitu teori elemen bilah (Castegnaro, S. et. al., 2018). Saat ini, pengembangan rancangan axial fan dilakukan dengan pendekatan komputasi melalui computational fluid dynamics (CFD).

Metode perancangan yang digunakan dalam penelitian ini adalah gabungan dari persamaan gaya dorong untuk rotor (Harris, F.D. 2011) dan teori elemen bilah. Metode CFD digunakan untuk analisis performa fan hasil rancangan yang dibandingkan dengan hasil

pengujian eksperimen dengan alat uji dengan konfigurasi EDF test bed.

METODE PENELITIAN

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah perhitungan analitik untuk menghasilkan geometri fan yang kemudian dilanjutkan dengan analisis performa fan dengan metode numerik menggunakan software CFD. Hasil analisis numerik dibandingkan dengan hasil pengujian eksperimen yang dilakukan dengan alat uji EDF test bed.

Tahapan dalam penelitian diawali dengan perhitungan geometri fan EDF berdasarkan kebutuhan gaya dorong yg ditentukan menggunakan persamaan 1 (Burgers, P. 2019).

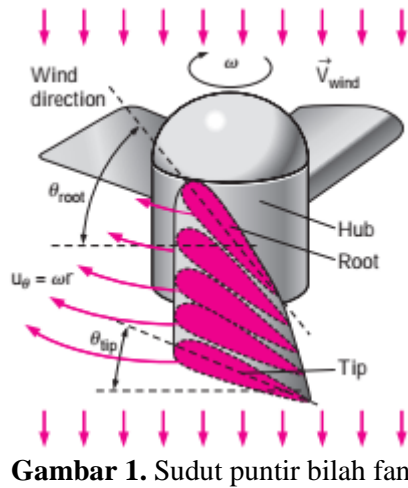
$$T = \left(\frac{1}{4} v_{\infty}^2 + \frac{1}{6} v_{tip}^2 \right) \rho C_L S_b \quad (1)$$

dimana T adalah gaya dorong, v_{∞} adalah kecepatan freestream, v_{tip} adalah kecepatan axial pada ujung bilah fan, ρ adalah kerapatan udara, C_L adalah koefisien gaya angkat bilah fan dan S_b adalah luas total fan. Selanjutnya, panjang chord fan, c dihitung menggunakan persamaan 2.

$$c = S_b / Nr \quad (2)$$

dimana c adalah panjang chord bilah fan, N adalah jumlah bilah fan dan r adalah jari-jari efektif fan. Diameter hub dan fan EDF menyesuaikan ukuran diameter duct EDF yang telah dirancang sebelumnya yaitu sebesar 70mm (Junaidin, B. et. al., 2019). Daya dan kecepatan sudut motor yang digunakan mengikuti data umum rekomendasi untuk EDF kategori yang sama (Sharman R.A. 2013). EDF menggunakan airfoil NACA seri-65 yaitu yang umum digunakan untuk fan kompresor (Ujjawal A.J. et.al., 2013).

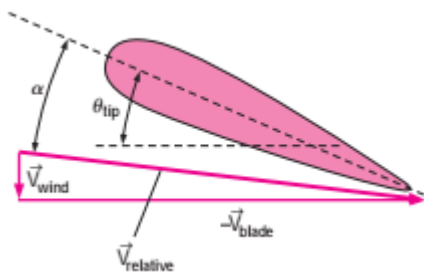
Sudut puntir tiap bilah fan diperoleh dengan aplikasi dengan teori elemen bilah sesuai gambar 1.



Gambar 1. Sudut puntir bilah fan

Sudut puntir bilah dihitung berdasarkan segitiga kecepatan pada gambar 2 dengan persamaan 3.

$$\theta = \alpha + \tan^{-1} \frac{|\vec{v}_{wind}|}{|\vec{v}_{blade}|} \quad (3)$$

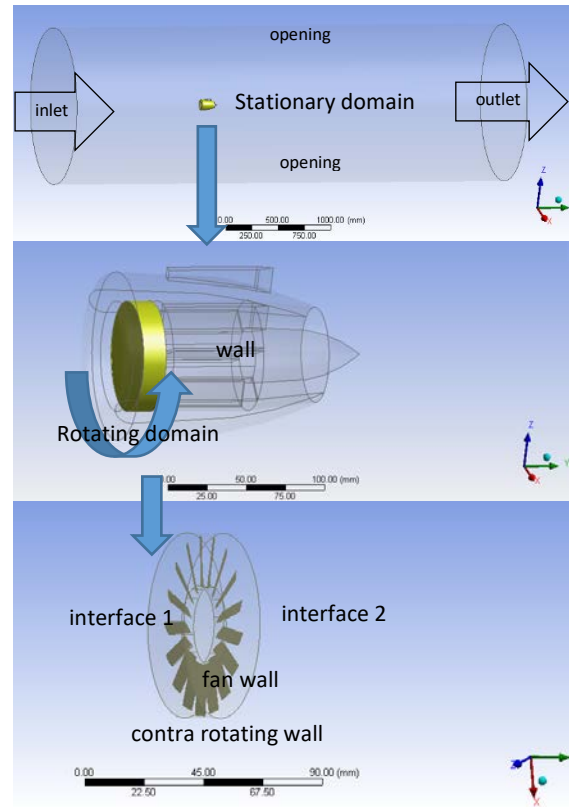


Gambar 2. Segitiga kecepatan

Selanjutnya, geometri *fan* hasil perhitungan dianalisis dengan pendekatan CFD. Analisis CFD meliputi pemodelan dan simulasi numerik yang menghasilkan output berupa laju aliran massa udara, kecepatan dan tekanan di output EDF. Gaya dorong EDF dihitung dengan persamaan 4.

$$F = \dot{m}(v_e - v_0) + A(P_0 - P_e) \quad (3)$$

dimana \dot{m} adalah laju aliran massa udara, v_e dan P_e masing-masing adalah kecepatan dan tekanan di output, v_0 dan P_0 masing-masing adalah kecepatan dan tekanan awal, serta A adalah luas penampang. Pengaturan simulasi dalam software CFD sesuai gambar 3.



Gambar 3. Setup simulasi EDF

Analisis CFD dari EDF dilakukan dengan kondisi lingkungan yang sama dengan kondisi lingkungan yang digunakan dalam pengujian EDF. Kondisi lingkungan dan setup simulasi sesuai dengan tabel 1 dan tabel 2.

Tabel 1. Kondisi lingkungan simulasi CFD

Variabel	Nilai
Kecepatan putar	20000-40000RPM
Temperatur	287,5K
Tekanan	100048,5Pa
Kerapatan udara	1,209844kg/m ³

Tabel 2. Setup simulasi CFD

Domain	Setup
Stasionary	Inlet (P_{atm})
	Outlet ($P_s=0$)
	Opening ($P_s=0$)
	Wall (No slip)
Rotating	Interface 1
	Interface 2
	Fan wall (No slip)
	Contra rotating wall (No slip)
	RPM (20000-40000)

Setelah simulasi CFD dilakukan, selanjutnya model fan EDF dimanufaktur dengan metode

cetak tiga dimensi (*3D-printing*). Material yang digunakan dalam proses manufaktur berupa polylactic acid (PLA) dengan sifat material sesuai tabel 3 (Balakrishnan, H. et.al., 2012).

Tabel 3. Sifat material PLA

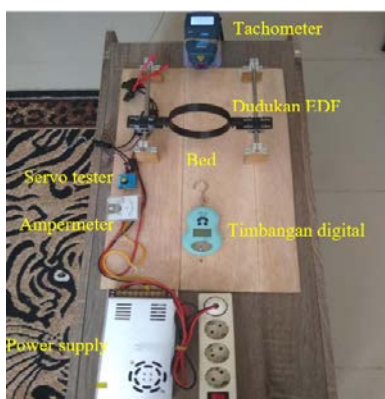
No.	Sifat	Nilai
1	Young's Modulus	3600Mpa
2	Tensile strength	70Mpa
3	Elongation at break	2,4%
4	Flexural strength	98N/mm ²
5	Impact strength	16,5kJ/m ²
6	Notched impact strength	3,3kJ/m ²
7	MFI	3-6g/10mnt
8	Density	1,25g/cm ³
9	Moisture absorption	0,3%

Selain fan, bagian-bagian lainnya dari EDF dimanufaktur berdasarkan geometri hasil penelitian sebelumnya untuk keperluan pengujian. Bagian-bagian EDF berupa *duct*, *fan* dan *motor-cone* hasil *3D-printing* sesuai gambar 4. Bagian-bagian EDF kemudian dirakit bersama dengan motor elektrik sehingga siap dilakukan proses pengujian.



Gambar 4. Hasil 3D-printing (*Duct, fan, motor cone*)

Pengujian performa EDF menggunakan alat uji dengan konfigurasi EDF *test bed* yang menghasilkan data berupa gaya dorong, daya yang digunakan (arus dan tegangan) dan kecepatan rotasi (Jin Y et. al., 2018). Konfigurasi EDF *test bed* sesuai gambar 5.



Gambar 5. EDF *test bed*

Sebelum dilakukan pengujian, EDF *test bed* divalidasi dengan memberikan beban (ditarik) dengan beban tertentu sehingga pembacaan EDF sama dengan beban yang diberikan. Proses validasi pembacaan dilakukan dengan berbagai variasi beban dan perulangan pengambilan data sampai diperoleh kesimpulan pembacaan EDF *test bed* valid. Selanjutnya, EDF ditempatkan di alat uji EDF Test bed untuk dilakukan pengujian sesuai gambar 6.



Gambar 6. Proses pengujian EDF

Pengujian EDF dilakukan dengan menggunakan motor elektrik 4000kV, sumber daya 12V DC, kecepatan rotasi mulai 20000rpm samapai dengan 40000rpm dengan kenaikan setiap 5000rpm.

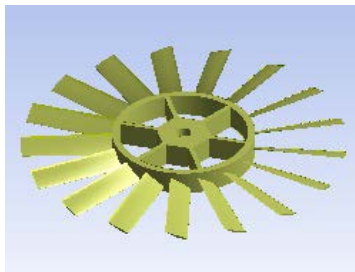
HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil perhitungan geometri fan diperoleh diameter *hub* dan *fan* masing-masing adalah 35mm dan 68mm. *Fan* EDF menggunakan airfoil NACA65410 dengan sudut pasang bilah 6 derajat (sudut pasang 6 derajat menghasilkan kondisi c_t/c_d maksimum dan nilai $c_t=0,745$)

dan sudut puntir pangkal dan ujung bilah masing-masing adalah 28,9 dan 16,6 derajat. Panjang chord *fan* ditentukan sebesar 10mm dengan jumlah bilah fan 17 bilah. luas total bilah fan (dikurangi luas hub) adalah 28cm². Umumnya daya untuk motor EDF berdiameter 70mm adalah 700W, dengan kecepatan putar antara 50.000-60.000rpm. Jika diambil rata-rata kecepatan motor adalah 55.000rpm dan yang digunakan adalah 55% maka kecepatan putar fan adalah 30.250rpm atau 3168rad/s.

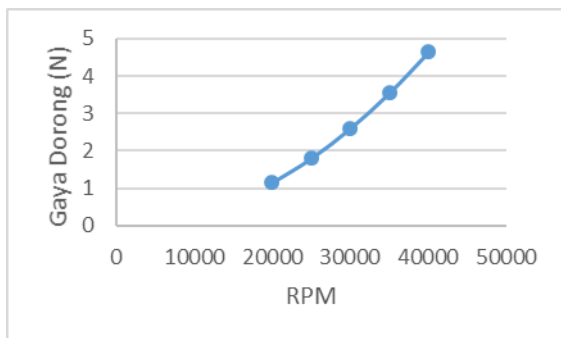
Kecepatan putar 3168rad/s dikonversi menjadi kecepatan linier *fan* (radius *fan* 34mm) menjadi 108m/s. Pada kondisi ini, spesifikasi *fan* rancangan akan menghasilkan gaya dorong sebesar 14,8N.

Model tiga dimensi *fan* dibuat menggunakan bantuan software CAD yang akan digunakan dalam analisis CFD. Model tiga dimensi *fan* EDF hasil rancangan sesuai gambar 7.



Gambar 7. Model 3D *fan*

Hasil analisis performa EDF dengan pendekatan CFD diperoleh grafik hubungan antara kecepatan rotasi (RPM) dengan gaya dorong yang dihasilkan sesuai gambar 8.



Gambar 8. Gaya dorong vs RPM hasil analisis CFD

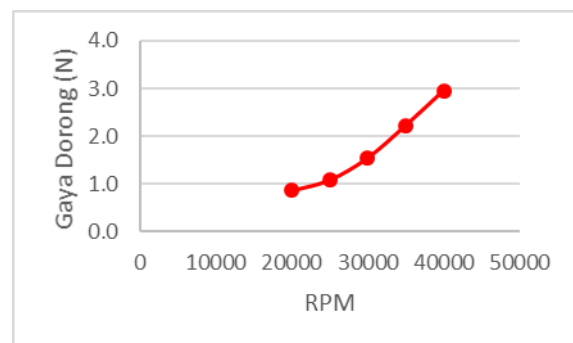
Dari grafik pada gambar 8 dapat diketahui bahwa peningkatan nilai RPM berbanding lurus dengan peningkatan gaya dorong yang dihasilkan oleh EDF. Performa EDF hasil analisis CFD menunjukkan nilai yang lebih kecil (2.6N) jika dibandingkan dengan perkiraan awal gaya dorong yang dihasilkan pada perhitungan analitik (14,8N) untuk kecepatan putar 30250rpm. Hal ini bisa disebabkan karena persamaan untuk perhitungan analitik geometri *fan* belum tepat digunakan untuk proses perancangan *fan*, sehingga perlu menggunakan metode lain yang lebih tepat dalam perhitungan geometri *fan* untuk EDF.

Hasil manufaktur *fan* EDF menggunakan 3D-printer dengan material PLA sesuai gambar 9. Hasil manufaktur kemudian dibandingkan dengan model 3D (gambar 7). Perbandingan visual menunjukkan bahwa bentuk *fan* EDF hasil manufaktur telah sesuai rancangan.

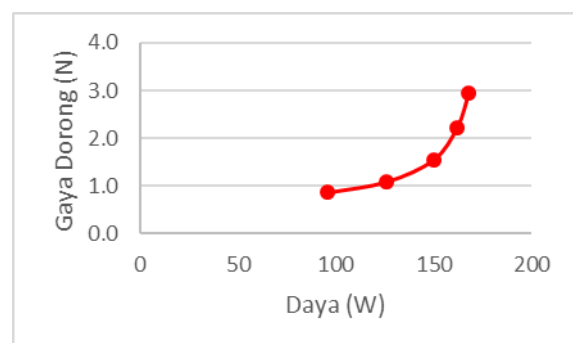


Gambar 9. *Fan* hasil cetak tiga dimensi

Pengujian EDF dilakukan menggunakan alat uji EDF test bed yang telah dibuat sebelumnya. Proses pengambilan data dilakukan sebanyak minimal 3 kali untuk setiap parameter kecepatan putaran. Hasil pengujian EDF sesuai gambar 9 dan gambar 10.



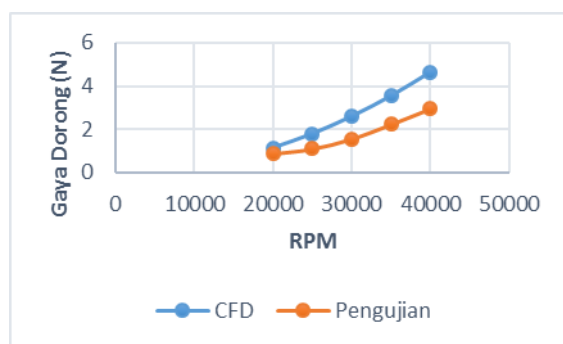
Gambar 9. Gaya dorong vs RPM hasil pengujian



Gambar 10. Gaya dorong vs daya hasil pengujian

Hasil pengujian pada gambar 9 menunjukkan bahwa pertambahan gaya dorong EDF bersifat linier terhadap pertambahan kecepatan putar, sedangkan pertambahan gaya dorong EDF terhadap pertambahan daya (gambar 10) bersifat eksponensial. Gaya dorong terbesar EDF yang mampu diukur alat uji sebesar 3N pada kecepatan putar 40000rpm dengan daya sebesar 168watt. Nilai gaya dorong maksimum EDF belum bisa diukur karena keterbatasan kemampuan alat uji EDF.

Perbandingan performa EDF hasil analisis CFD dengan hasil pengujian sesuai gambar 11.



Gambar 11. Perbandingan Performa EDF

Hasil perbandingan performa EDF menunjukkan bahwa performa hasil pengujian EDF rancangan lebih kecil dibandingkan dengan performa hasil analisis dengan metode CFD, hal ini bisa disebabkan karena jarak antara ujung fan dan dinding duct yang kurang optimal pada EDF yang diuji karena hasil manufaktur sehingga menyebabkan munculnya tip vortex yang mengurangi performa fan serta hambatan aliran dari permukaan duct yang tidak halus hasil manufaktur. Penyebab ini bisa dihindari dengan menggunakan metode manufaktur dan material yang berbeda yang lebih baik.

KESIMPULAN

Hasil perancangan diperoleh geometri fan EDF. gaya dorong yang dihasilkan fan rancangan berdasarkan analisis CFD jauh lebih kecil dengan perkiraan awal dengan metode analitik, hal ini bisa disebabkan karena persamaan untuk perhitungan analitik geometri fan belum tepat digunakan dalam proses perancangan fan, sehingga perlu menggunakan metode lain yang lebih tepat dalam perhitungan geometri fan untuk EDF.

Hasil manufaktur fan EDF menggunakan metode 3D-printing dengan material PLA menunjukkan bahwa bentuk fan EDF hasil manufaktur telah sesuai rancangan dan dapat dilanjutkan ke proses pengujian.

Pengujian EDF dilakukan dengan menggunakan alat uji EDF *test bed* dengan benda uji EDF (duct, fan dan motor elektrik). Hasil pengujian menunjukkan bahwa gaya dorong yang dihasilkan EDF lebih kecil dibandingkan dengan hasil analisis CFD, hal ini dapat disebabkan karena jarak antara ujung fan dan dinding duct yang kurang optimal pada EDF yang diuji karena hasil manufaktur sehingga menyebabkan munculnya tip vortex yang mengurangi performa fan, serta hambatan aliran dari permukaan duct yang tidak halus akibat proses manufaktur. Penyebab ini bisa dihindari dengan menggunakan metode manufaktur dan material yang berbeda yang lebih baik.

Perlu dilakukan proses optimasi dalam proses penentuan geometri fan dengan metode yang lebih baik sehingga gaya dorong yang dihasilkan sesuai dengan perkiraan awal. selain itu, metode manufaktur dan pemilihan material yang lebih baik sehingga menghasilkan purwarupa yang sesuai target rancangan. metode CFD dapat menjadi langkah awal untuk mengetahui performa fan sebenarnya sebelum dilanjutkan ke proses pengujian purwarupa karena hasil CFD mendekati hasil pengujian.

Penelitian ini diharapkan dapat menjadi langkah awal dalam proses analisis dan pengembangan EDF kedepannya.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terimakasih kami sampaikan kepada Lembaga Penelitian dan Pengabdian Masyarakat (LPPM) Institut Teknologi Dirgantara Adisutjipto (ITDA) yang telah membiayai penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

Geetha, A. and Subramani, C., 2017. A comprehensive review on energy management strategies of hybrid energy storage system for electric vehicles. *International Journal of Energy Research*, 41(13), pp.1817-1834.

- Jin, Y., Qian, Y., Zhang, Y. and Zhuge, W., 2018. Modeling of ducted-fan and motor in an electric aircraft and a preliminary integrated design. *SAE Int. J. Aerosp*, 11(2), pp.115-126.
- Prisacariu, Vasile & Boscoianu, Mircea & Circiu, Ionica, 2013, Flying wing with Electric Ducted Fan (EDF) propulsion.
- Brusell, A., Andrikopoulos, G. and Nikolakopoulos, G., 2017, July. Novel considerations on the negative pressure adhesion of electric ducted fans: An experimental study. In *2017 25th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED)* (pp. 1404-1409). IEEE.
- Sekhar, P. and Bhooshan, R.S., 2014, December. Duct fan based wall climbing robot for concrete surface crack inspection. In *2014 Annual IEEE India Conference (INDICON)* (pp. 1-6). IEEE.
- Salazar, D.M., Liou, W.W. and Xu, J., 2020. Development of a Portable Electric Ducted Fan Engine Lab for Aircraft Electric Propulsion Education. In *AIAA Propulsion and Energy 2020 Forum* (p. 3910).
- Junaidin, B. and Cahyono, M.A., 2019, December. Conceptual Design of Electrical Ducted Fan (EDF). In *Conference SENATIK STT Adisutjipto Yogyakarta* (Vol. 5, pp. 3-8).
- Castegnaro, S., 2018. Aerodynamic design of low-speed axial-flow fans: A historical overview. *Designs*, 2(3), p.20.
- Harris, F.D., 2011. *Introduction to autogyros, helicopters, and other V/STOL aircraft*. National Aeronautics and Space Administration, Ames Research Center.
- Burgers, P., 2019. A thrust equation treats propellers and rotors as aerodynamic cycles and calculates their thrust without resorting to the blade element method. *International Journal of Aviation, Aeronautics, and Aerospace*, 6(5), p.9.
- Sharman, R.A., 2013. Electric ducted fan theory and practice.
- Ujjawal, A.J. and Joshi, S.I., 2013. Design and analysis of stator, rotor and blades of the axial flow compressor. *International Journal of Engineering Development and Research, IJEDR1301005*, pp.24-29.
- Balakrishnan, H., Hassan, A., Imran, M. and Wahit, M.U., 2012. Toughening of polylactic acid nanocomposites: A short review. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 51(2), pp.175-192.