

Penerapan Kawat Litz Pada Motor BLDC untuk Peningkatan Gaya Dorong Per Daya

Muhammad Syauqi Firdausi*¹, Tri Wahyu Supardi², Roghib Muhammad Hujja³

¹Program Studi Elektronika dan Instrumentasi, DIKE, FMIPA, UGM, Yogyakarta, Indonesia

^{2,3}Departemen Ilmu Komputer dan Elektronika, FMIPA UGM, Yogyakarta, Indonesia

e-mail: *¹syauqifirdaus5@mail.ugm.ac.id, ²twsupardi@ugm.ac.id, ³roghib.muh@ugm.ac.id

Abstrak

Copper loss dapat menyebabkan penurunan performa pada motor BLDC, sehingga akan dilakukan upaya untuk menurunkan copper loss dengan menggunakan kawat Litz. Selain itu, sudah ada penelitian yang mensimulasikan performa kawat Litz, namun belum diterapkan secara langsung terutama pada gaya dorong propeler. Adapun tujuan dari penelitian yang akan dilakukan ini adalah mengimplementasikan kawat Litz pada motor BLDC dan dianalisis performanya untuk peningkatan gaya dorong propeler per daya.

Motor BLDC dililit dengan kawat tunggal dan kawat Litz. Analisa yang dilakukan adalah dibandingkannya resistansi, copper loss, gaya dorong, dan rasio gaya dorong per daya pada kawat tunggal dan kawat Litz dengan luas penampang kawat yang sama. Motor BLDC dipasang dengan propeler agar gaya dorong dapat diketahui.

Hasil resistansi rata-rata yang dimiliki oleh kawat tunggal adalah 0,43 Ohm, sedangkan kawat Litz adalah 0,38 Ohm. Copper loss dari kawat Litz lebih rendah 7% dibandingkan kawat tunggal. Kawat Litz bergaya dorong lebih baik sebesar 3% dibandingkan kawat tunggal pada pengujian. Rasio gaya dorong per daya pada kawat Litz lebih baik sebesar 3% saat pengujian.

Kata kunci— kawat Litz, gaya dorong, rasio gaya dorong per daya, copper loss, motor BLDC

Abstract

Copper loss can cause a decrease in performance in BLDC motors, so efforts will be made to reduce copper loss by using Litz wire. Additionally, there have been studies that simulate the performance of Litz wire, but they have not been directly applied, especially to propeller thrust. The objective of this research is to implement Litz wire in a BLDC motor and analyze its performance for an increase in propeller thrust per power.

The BLDC motor is wound with single wire and Litz wire. The analysis conducted compares the resistance, copper loss, thrust force, and thrust-to-power ratio of the single wire and Litz wire with the same wire cross-sectional area. The BLDC motor is equipped with a propeller to measure the thrust force.

The average resistance of the single wire is 0.43 Ohms, while the Litz wire is 0.38 Ohms. The copper loss of the Litz wire is 7% lower than a single wire. The Litz wire exhibits a 3% improvement in thrust force compared to the single wire in the testing. The thrust-to-power ratio of the Litz wire is also 3% better during the testing.

Keywords— Litz wire, thrust, thrust-to-power ratio, copper loss, BLDC motor

1. PENDAHULUAN

Motor adalah faktor penting dalam menghasilkan gaya dorong [1]. Tanpa gaya dorong, maka kendaraan akan kesulitan untuk bergerak. Gaya dorong juga berguna pada manuver kendaraan tanpa awak. Sebuah manuver stall normal menggunakan gaya dorong ekstra yang dihasilkan oleh peningkatan sudut serang secara tiba-tiba untuk mengubah arah pesawat dengan cepat [2]. Gaya dorong adalah faktor yang penting pada kendaraan tanpa awak. Permasalahan pada manuver membutuhkan gaya dorong yang lebih. Salah satu cara meningkatkan gaya dorong adalah dengan meningkatkan arus pada motor BLDC [3].

Salah satu faktor pada motor BLDC yang diperhatikan adalah efisiensi [4]. Hilangnya energi pada motor akan berpengaruh pada efisiensi motor [5]. Beberapa faktor yang mempengaruhi efisiensi motor adalah belitan, suhu, dan material motor. Belitan yang dialiri oleh arus listrik dapat membuat *copper loss* (rugi tembaga) karena resistansi pada belitan. Dalam [6], Gao, H. menyatakan bahwa, *copper loss* dapat menyebabkan panas yang berlebih dan mengurangi performa dari motor. Sehingga sangat penting untuk mengurangi *copper loss* [7].

Salah satu solusi untuk mengurangi *copper loss* adalah dengan mengganti jenis kawat pada belitan. Motor BLDC yang dijual pada umumnya menggunakan kawat tembaga tunggal untuk dililit pada stator, sehingga diperlukannya jenis kawat lain untuk mengurangi *copper loss*. Kawat Litz sering digunakan dalam komponen daya untuk mencapai kerugian (*loss*) total yang lebih rendah [8]. Kawat ini terdiri dari beberapa helai atau strand lalu ditwisted [9]. Kawat Litz yang menurut definisi memiliki subkonduktor yang diisolasi dalam pola yang seragam sehingga setiap subkonduktor menggabungkan medan yang sama dan membawa jumlah arus yang sama, memberikan solusi untuk mengurangi rugi pada belitan yang berlebihan [10]. Oleh karena itu, kawat Litz dapat digunakan untuk mengurangi *copper loss* [11].

Beberapa penelitian juga telah dilakukan untuk mensimulasikan kawat Litz untuk mengurangi *copper loss* [8,9,10]. Selain itu, penelitian pada gaya dorong yang disebabkan oleh berputarnya propeler juga akan diteliti lebih lanjut pada penelitian ini untuk mengetahui performa gaya dorong per daya dengan menggunakan kawat Litz.

2. METODE PENELITIAN

2.1 Analisis Sistem

Sistem yang dirancang pada penelitian diperlukan beberapa alat ukur untuk mengukur arus, tegangan, daya, resistansi, RPM, dan gaya dorong. Selain itu, diperlukan beberapa alat agar sistem dapat berjalan. Beberapa alat tersebut tertera pada Tabel 1.

Tabel 1 Kebutuhan alat

No	Alat	Spesifikasi
1.	Propeler	8 inch
2.	Digital Watt Meter 100A	1 buah
3.	Timbangan digital	1 buah
4.	Tachometer	1 buah
5.	LCR meter	1 buah
6.	Electronic Speed Control (ESC)	1 buah
7.	Arduino Nano	1 buah
8.	Power Supply 12V	1 buah

Propeler digunakan untuk dihasilkannya gaya dorong pada motor BLDC. Digital Watt Meter digunakan untuk mengukur arus, tegangan, dan daya. Tachometer digunakan untuk mengukur RPM atau putaran motor BLDC. *Electronic Speed Control* (ESC) digunakan untuk mengontrol putaran motor BLDC. Arduino Nano digunakan untuk memberikan instruksi *Pulse Width Modulation* (PWM). Power Supply digunakan sebagai sumber tegangan DC.

2.2 Rancangan perangkat keras

Rancangan perangkat keras dibagi menjadi dua bagian, yaitu modifikasi motor BLDC dan penyusunan sistem. Modifikasi motor BLDC akan digunakan kawat tunggal dan kawat Litz yang memiliki luas penampang yang sama. Penyusunan alat akan digunakan alat-alat seperti pada Tabel 1.

2.2.1 Modifikasi motor BLDC

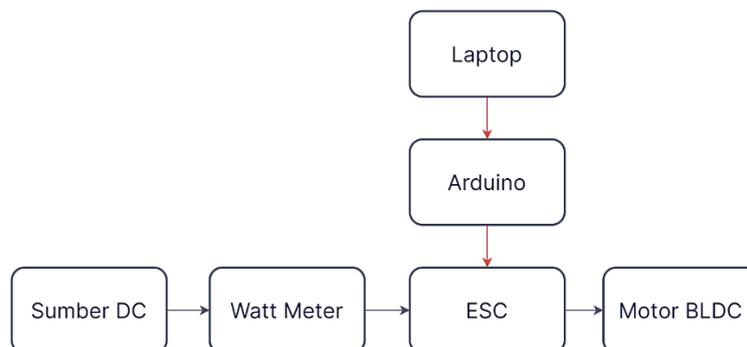
Motor BLDC digunakan kawat tunggal dan kawat Litz dengan luas penampang yang sama. Kawat tunggal digunakan kawat berdiameter 0,4 mm sebanyak 1 helai, sedangkan kawat Litz digunakan kawat berdiameter 0,2 mm sebanyak 4 helai. Kawat yang terdiri dari 4 helai ditwisted agar menjadi sebuah kawat Litz. Masing-masing kawat dililitkan sebanyak 7 kali pada motor BLDC, sehingga terdapat 2 motor BLDC yang dapat dibandingkan performanya. Motor BLDC digunakan konfigurasi delta.

2.2.2 Penyusunan alat

LCR meter disiapkan untuk mengukur resistansi pada kawat tembaga motor BLDC dengan cara menyambungkan masing-masing probe pada ujung-ujung kawat tembaga salah satu fasa. Pengukuran resistansi dilakukan sebelum kawat tembaga disolder dengan cara mengukur salah satu fasanya.

Selain itu, digital watt meter juga digunakan agar tegangan, arus, dan daya dapat diukur. Timbangan digital digunakan untuk mengukur gaya dorong dari motor BLDC yang berputar. Tachometer yang diarahkan ke rotor digunakan agar RPM dapat terukur. Rotor direkatkan dengan *electrical tape* berwarna hitam dan stiker reflektor agar RPM dapat diukur oleh tachometer.

Motor BLDC disambungkan dengan ESC, kemudian ESC disambungkan ke Arduino Nano dan power supply. Arduino Nano berfungsi untuk mengatur PWM pada motor BLDC. Rancangan penyusunan alat dapat dilihat pada Gambar 1.

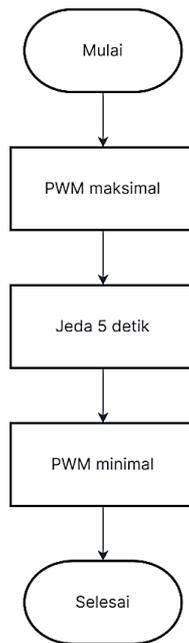


Gambar 1 Penyusunan alat

2.3 Rancangan perangkat lunak

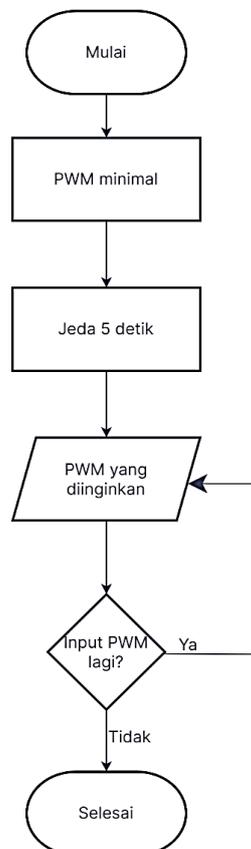
Pengendalian RPM motor pada penelitian kali ini digunakannya Arduino Nano yang disambungkan ke ESC. Program dibuat dengan perangkat lunak Arduino. Laptop berfungsi untuk input nilai PWM (*Pulse Width Modulation*) yang diinginkan.

Pengaturan batas PWM dilakukan dengan flowchart seperti pada Gambar 2. Pulse Width Modulation (PWM) dari ESC diatur nilai maksimal dan nilai minimalnya. Ketika PWM maksimal diinstruksikan, terdapat jeda selama 5 detik agar nilai PWM disimpan oleh ESC.



Gambar 2 Pengaturan batas PWM

Pengontrolan RPM pada motor BLDC dapat dilakukan dengan flowchart seperti pada Gambar 3. *Serial monitor* digunakan untuk memberikan instruksi PWM secara langsung dari laptop. Apabila ingin dimasukkannya PWM dengan nilai maksimal, maka bisa input nilai PWM maksimal. Langkah untuk dimatikannya motor BLDC dapat input PWM minimal.



Gambar 3 Input nilai PWM

2.4 Metode analisis

Terdapat beberapa data yang akan dianalisis seperti arus, tegangan, daya, resistansi, *copper loss*, RPM, frekuensi, gaya dorong, dan rasio gaya dorong per daya. Data dari kawat tunggal dan kawat Litz akan dibandingkan.

Copper loss adalah sebuah rugi-rugi yang dihasilkan dari arus yang mengalir pada kawat tembaga. Kawat yang dialiri arus juga akan menghasilkan resistansi. Resistansi dan arus ini lah yang menentukan besaran dari *copper loss*. Besar *copper loss* dapat dihitung menggunakan persamaan (1) [14].

$$P_{cu} = I^2 R \quad (1)$$

Dimana P_{cu} adalah *copper loss* dengan satuan Watt, I adalah arus dengan satuan ampere, dan R adalah resistansi.

Frekuensi berpengaruh pada perputaran motor BLDC. Frekuensi motor BLDC dapat dihitung dengan persamaan (3) [15].

$$Ns = \frac{2 f 60}{\#p} \quad (2)$$

$$f = \frac{Ns \#p}{120} \quad (3)$$

Dimana f adalah frekuensi dengan satuan Hz, Ns adalah kecepatan motor dengan satuan RPM, dan $\#p$ adalah jumlah kutub motor.

Gaya dorong yang diukur oleh timbangan digital bersatuan gram, sehingga harus dikonversi ke satuan Newton. Konversi gram ke Newton dapat dihitung dengan persamaan (4) [16].

$$W = m g \quad (4)$$

Dimana W adalah berat / gaya dorong dengan satuan Newton, m adalah massa dengan satuan kg, dan g adalah gravitasi dengan satuan m/s^2 .

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Hasil arus

Pengujian ini dihasilkan data arus seperti pada Tabel 5.4. Data diambil dengan alat watt meter. Arus rata-rata pada kawat tunggal adalah 25,42 Ampere, sedangkan arus rata-rata pada kawat Litz adalah 26,06 Ampere. Arus yang dihasilkan oleh kawat Litz lebih tinggi 3%. Arus ini akan berpengaruh pada hasil *copper loss* pada kawat.

Tabel 2 Hasil arus

No	Tunggal (Ampere)	Litz (Ampere)
1	25,96	26,45
2	25,53	26,04
3	25,43	26,51
4	25,25	25,80
5	24,87	25,81
6	25,85	26,45
7	25,66	26,08
8	25,29	25,75
9	25,38	25,98
10	24,97	25,68
Rata-rata	25,42	26,06

3.2 Hasil tegangan

Pengujian ini dihasilkan data tegangan seperti pada Tabel 3. Data diambil dengan alat watt meter. Tegangan rata-rata pada kawat tunggal adalah 11,03 Volt, sedangkan tegangan rata-rata pada kawat Litz adalah 10,99 Volt. Tegangan yang dihasilkan oleh kawat tunggal dan kawat Litz hampir sama.

Tabel 3 Hasil tegangan

No	Tunggal (Volt)	Litz (Volt)
1	10,97	11,02
2	11,04	11,01
3	11,16	10,99
4	11,09	10,94
5	11,03	10,95
6	10,87	10,98
7	10,99	11,04
8	11,07	10,86
9	11,04	11,00
10	11,06	11,06
Rata-rata	11,03	10,95

3.3 Hasil daya

Pengujian ini dihasilkan data daya seperti pada Tabel 4. Data diambil dengan alat watt meter. Daya rata-rata pada kawat tunggal adalah 280,32 Watt, sedangkan daya rata-rata pada kawat Litz adalah 286,26 Watt. Daya yang dihasilkan oleh kawat Litz lebih tinggi 2%.

Tabel 4 Hasil daya

No	Tunggal (Watt)	Litz (Watt)
1	284,57	291,63
2	281,69	286,79
3	283,70	291,31
4	280,07	282,34
5	274,22	282,70
6	280,81	290,46
7	281,70	288,09
8	279,88	279,79
9	280,31	285,64
10	276,25	283,87
Rata-rata	280,32	286,26

3.4 Hasil resistansi

Sebelum kawat disolder, data resistansi harus diambil terlebih dahulu dengan cara menyambungkan probe ke ujung-ujung kawat salah satu fasa. Ujung kawat harus dihilangkan isolatornya. Data diambil dengan alat LCR meter. Hasil resistansi rata-rata yang dimiliki oleh kawat tunggal adalah 0,43 Ohm, sedangkan kawat Litz adalah 0,38 Ohm. Resistansi yang dimiliki oleh kawat Litz lebih rendah sebesar 11%. Data yang dihasilkan cukup stabil.

Tabel 5 Hasil resistansi

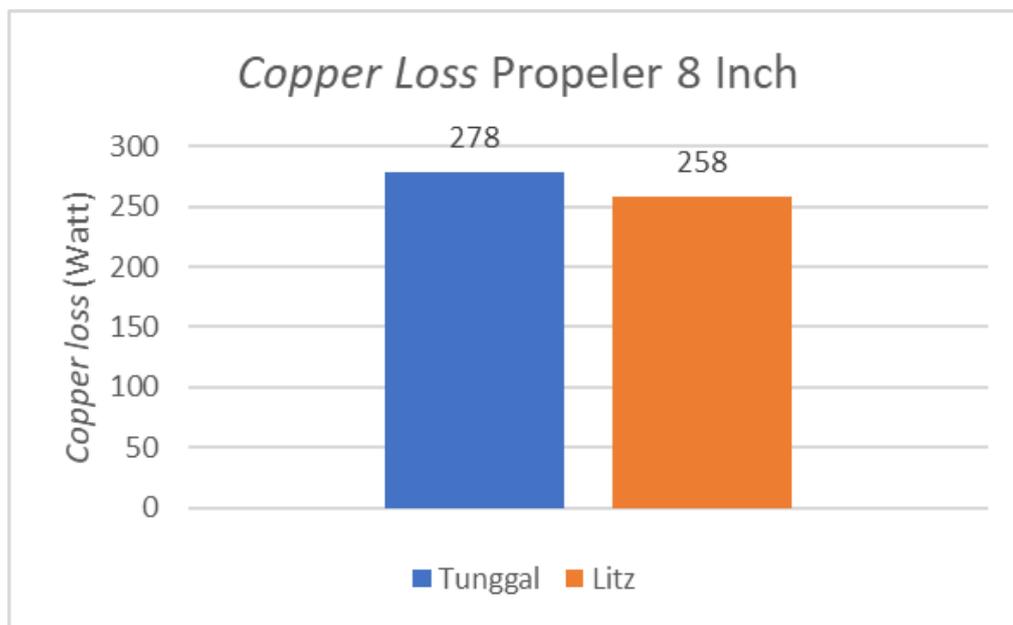
No	Tunggal (Ohm)	Litz (Ohm)
1	0,45	0,39
2	0,44	0,38
3	0,43	0,38
4	0,43	0,38
5	0,43	0,38
6	0,43	0,38
7	0,43	0,39
8	0,43	0,38
9	0,43	0,39
10	0,42	0,39
Rata-rata	0,43	0,38

Resistansi yang rendah dimiliki oleh kawat Litz. Hal ini dapat berpengaruh pada data *copper loss* karena *copper loss* membutuhkan data resistansi untuk menghitungnya. Rendahnya resistansi ini dapat berguna untuk meningkatkan efisiensi dikarenakan *copper loss* yang lebih rendah.

Proximity effect pada motor BLDC adalah arus listrik yang mengalir secara tidak merata akibat interaksi medan yang dihasilkan oleh rotor. Ini dapat berpengaruh pada distribusi arus dan bertambahnya resistansi belitan motor. *Proximity effect* pada kawat Litz lebih rendah, sehingga resistansi lebih rendah.

3.5 Hasil copper loss

Pengujian ini dihasilkan data *copper loss* seperti pada Gambar 4. *Copper loss* rata-rata pada kawat tunggal adalah 278 Watt, sedangkan daya rata-rata pada kawat Litz adalah 258 Watt. *Copper loss* yang dihasilkan oleh kawat Litz lebih rendah 7%. Rendahnya *copper loss* ini dapat memungkinkan kawat Litz lebih unggul dari segi performa terutama pada gaya dorongnya. *Copper loss* dapat dihitung menggunakan persamaan (1).

Gambar 4 Hasil *copper loss*

3.6 Hasil RPM

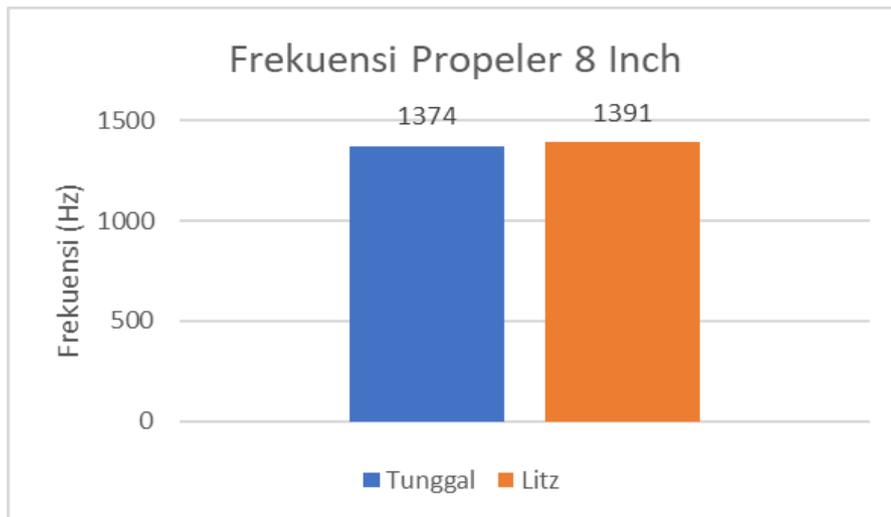
Pengujian RPM dapat dilihat pada Tabel 6. Hasil rata-rata RPM yang dihasilkan oleh kawat tunggal adalah 11777 RPM, sedangkan kawat Litz adalah 11926 RPM. Hasil RPM yang dimiliki oleh kawat Litz lebih tinggi sebesar 1%. Hasil RPM ini dapat digunakan untuk menghitung nilai frekuensi. Semakin tinggi nilai RPM, maka gaya dorong bisa bertambah.

Tabel 6 Hasil RPM

No	Tunggal (RPM)	Litz (RPM)
1	11972	11972,6
2	11829	11786,6
3	11805	12006,5
4	11740	11890,7
5	11720	11977,2
6	11895	12021,4
7	11804	11976,7
8	11702	11905,5
9	11695	11882,1
10	11608	11839,5
Rata-rata	11777	11926

3.7 Hasil frekuensi

Pengujian ini dihasilkan frekuensi seperti pada Gambar 5. Frekuensi rata-rata pada kawat tunggal adalah 1374 Hz, sedangkan frekuensi rata-rata pada kawat Litz adalah 1391 Hz. Frekuensi yang dihasilkan oleh kawat Litz lebih tinggi 1%. Hal yang perlu diketahui terlebih dahulu sebelum dihitungnya frekuensi adalah RPM motor dan jumlah kutub pada motor BLDC. Kutub rotor pada pengujian ini berjumlah 14 kutub. Frekuensi dapat dihitung menggunakan persamaan (3). Frekuensi berhubungan dengan putaran motor. Semakin besar frekuensi, maka putaran motor semakin besar. RPM akan berpengaruh pada gaya dorong propeler karena putaran dari propeler akan semakin banyak.



Gambar 5 Hasil Frekuensi

3.8 Hasil gaya dorong

Pengujian ini dihasilkan data gaya dorong seperti pada Tabel 7. Gaya dorong rata-rata pada kawat tunggal adalah 8,91 Newton, sedangkan daya rata-rata pada kawat Litz adalah 9,21 Newton. Gaya dorong yang dihasilkan kawat Litz lebih besar 3%.

Tabel 7 Hasil gaya dorong

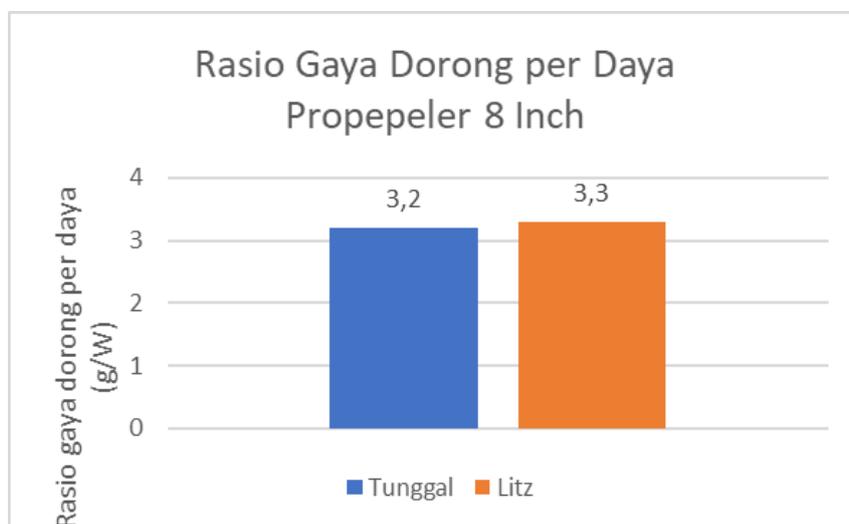
No	Tunggal (Newton)	Litz (Newton)
1	9,15	9,31
2	8,96	9,16
3	8,88	9,29
4	8,84	9,18
5	8,84	9,29
6	9,05	9,29
7	8,99	9,22
8	8,83	9,14
9	8,85	9,13
10	8,71	9,08
Rata-rata	8,91	9,21

Kawat Litz *bercopper loss* lebih rendah, sehingga pada pengujian ini dapat membuat gaya dorong pada kawat Litz lebih besar daripada kawat tunggal. Skin effect pada kawat Litz lebih rendah. Skin Effect pada motor BLDC adalah fenomena dimana arus listrik yang lewat konduktor motor BLDC cenderung mengalir di atas permukaan kawat daripada inti kawat. Fenomena ini terjadi karena medan magnet yang diciptakan oleh arus listrik berinduksi ke arus balik di kawat, menciptakan medan magnet yang melawan arus di kawat. Skin effect berakibat distribusi arus yang tidak rata pada motor BLDC. Hal ini berakibat resistansi kawat bertambah serta *copper loss* bertambah.

Semakin besar arus yang berada di motor BLDC, maka arus eddy semakin besar. Arus eddy dapat berakibat pada terbentuknya medan magnet yang bertabrakan dengan medan magnet dari induktor, sehingga akan berpengaruh pada efisiensi. Semakin besarnya arus eddy, maka semakin besar *loss* dari suatu kawat. Arus yang tinggi ini berdampak pada bertambahnya arus eddy, sehingga kawat akan memiliki *loss* yang lebih tinggi. Namun, kawat Litz bergaya dorong lebih tinggi dibandingkan kawat tunggal. Selain itu, frekuensi pada kawat Litz juga lebih besar, sehingga putaran motor serta gaya dorong kawat Litz juga lebih besar pada pengujian ini.

3.9 Rasio gaya dorong per daya

Sub BAB ini dibahas tentang rasio gaya dorong per daya. Data didapatkan dari rata-rata gaya dorong dibagi dengan rata-rata daya yang diambil menggunakan alat timbangan digital dan digital watt meter. Pengujian ini dihasilkan rasio gaya dorong per daya seperti pada Gambar 6. Rasio gaya dorong per daya pada kawat tunggal adalah 3,2 gram/Watt, sedangkan rasio gaya dorong per daya pada kawat Litz adalah 3,3 gram/Watt. Rasio gaya dorong per daya yang dihasilkan oleh kawat Litz lebih tinggi 3%. Gaya dorong pada kawat Litz yang lebih besar dibandingkan kawat tunggal mengakibatkan rasio gaya dorong per daya pada kawat Litz lebih unggul dibandingkan kawat tunggal.



Gambar 6 Rasio gaya dorong per daya

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian yang dilakukan dapat disimpulkan bahwa *Copper loss* dari kawat Litz lebih rendah 7% dibandingkan kawat tunggal pada motor BLDC yang telah dibuat. Kawat Litz menghasilkan gaya dorong yang lebih baik sebesar 3% dibandingkan kawat tunggal pada pengujian ini. Kawat Litz menghasilkan rasio gaya dorong per daya yang lebih baik sebesar 3% dibandingkan kawat tunggal pada pengujian ini.

5. SARAN

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, terdapat beberapa hal yang perlu dilakukan seperti pengambilan data torsi dan perhitungan efisiensi pada motor BLDC.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] H. Sahin and T. Oktay, "POWERPLANT SYSTEM DESIGN FOR UNMANNED TRICOPTER," *Engineering and Science*, 2017.
- [2] Haomiao Huang, G. M. Hoffmann, S. L. Waslander, and C. J. Tomlin, "Aerodynamics and control of autonomous quadrotor helicopters in aggressive maneuvering," in *2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Kobe: IEEE, May 2009, pp. 3277–3282. doi: 10.1109/ROBOT.2009.5152561.
- [3] Liyi Li, Donghua Pan, and Xuzhen Huang, "Analysis and Optimization of Ironless Permanent-Magnet Linear Motor for Improving Thrust," *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. 41, no. 5, pp. 1188–1192, May 2013, doi: 10.1109/TPS.2013.2245425.
- [4] R. Ilka, A. R. Tilaki, H. Asgharpour-Alamdari, and R. Baghipour, "Design Optimization of Permanent Magnet-Brushless DC Motor using Elitist Genetic Algorithm with Minimum loss and Maximum Power Density," vol. 4, 2014.
- [5] D. Novianto, E. Zondra, and H. Yuwendius, "Analisis Efisiensi Motor Induksi Tiga Fasa Sebagai Penggerak Vacuum Di PT. Pindo Deli Perawang," vol. 4, no. 2, 2022.
- [6] Y. Liang, F. Zhao, K. Xu, W. Wang, J. Liu, and P. Yang, "Analysis of Copper Loss of Permanent Magnet Synchronous Motor With Formed Transposition Winding," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 101105–101114, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3094833.
- [7] X. Wang, Z. Wang, M. He, Q. Zhou, X. Liu, and X. Meng, "Fault-Tolerant Control of Dual Three-Phase PMSM Drives With Minimized Copper Loss," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 36, no. 11, pp. 12938–12953, Nov. 2021, doi: 10.1109/TPEL.2021.3076509.
- [8] X. Nan and C. R. Sullivan, "An Equivalent Complex Permeability Model for Litz-Wire Windings," *IEEE Trans. on Ind. Applicat.*, vol. 45, no. 2, pp. 854–860, 2009, doi: 10.1109/TIA.2009.2013594.
- [9] T. Guillod, J. Huber, F. Krismer, and J. W. Kolar, "Litz wire losses: Effects of twisting imperfections," in *2017 IEEE 18th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL)*, Stanford, CA, USA: IEEE, Jul. 2017, pp. 1–8. doi: 10.1109/COMPEL.2017.8013327.
- [10] A. Bardalai, X. Zhang, and T. Zou, "Comparative Analysis of AC losses with round magnet wire and Litz wire winding of a High – Speed PM Machine," *2019 22nd International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, 2019, doi: <https://doi.org/10.1109/ICEMS.2019.8922173>.
- [11] R. Yoshida *et al.*, "Effect of Magnetic Properties of Magnetic Composite Tapes on Motor Losses," *Energies*, vol. 15, no. 21, p. 7991, Oct. 2022, doi: 10.3390/en15217991.
- [12] T. Dimier, M. Cossale, and T. Wellerdieck, "Comparison of Stator Winding Technologies for High-Speed Motors in Electric Propulsion Systems," in *2020 International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, Gothenburg, Sweden: IEEE, Aug. 2020, pp. 2406–2412. doi: 10.1109/ICEM49940.2020.9270943.
- [13] D. Golovanov, Z. Xu, D. Gerada, A. Page, and T. Sawata, "Designing an Advanced Electrical Motor for Propulsion of Electric Aircraft," in *AIAA Propulsion and Energy 2019 Forum*, Indianapolis, IN: American Institute of Aeronautics and Astronautics, Aug. 2019. doi: 10.2514/6.2019-4482.
- [14] R. F. Sibarani and I. S. Amien, "PENGARUH ARUS NETRAL TERHADAP RUGI-RUGI BEBAN PADA TRANSFORMATOR DISTRIBUSI PLN RAYON JOHOR MEDAN," 2015.

- [15] L. Nagel, "How to Calculate Motor Poles & Motor Kv," *Tytorobotics.com*, 2021. <https://www.tytorobotics.com/blogs/articles/how-to-calculate-motor-poles-and-brushless-motor-kv>
- [16] J. C. R. Sihaan, A. Munawir, and Z. Husin, "ANALISIS GAYA DORONG (THRUST) PROPELLER PADA PESAWAT MODEL REMOTE CONTROL (UAV)," *JMKN*, vol. 8, no. 1, p. 135, Jun. 2022, doi: 10.35308/jmkn.v8i1.5698.