

Pengaruh Kombinasi Jumlah Slot Stator - Kutub Magnet Rotor pada Unjuk Kerja Motor BLDC

I Nyoman Wahyu Satiawan¹, Ida Bagus Fery Citarsa¹, I Made Budi Suksmadana¹, I Ketut Wiryajati¹, Supriono¹.

¹Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Mataram Jl. Majapahit 62 Mataram, INDONESIA 83125

ARTICLE INFO

Article history (8 pt):

Received February 20, 2026

Revised February 25, 2026

Accepted February 28, 2026

Keywords (8 pt):

Slot-pole;

BLDC;

Ripple torque;

Cogging torque;

losses;

ABSTRACT (10 PT)

The selection of the number of stator slots and the number of rotor magnetic poles is very important in the design of a BLDC motor because these two parameters directly affect the electromagnetic performance, torque characteristics and efficiency. Inappropriate slot-pole combination can trigger an increase in torque ripple, torque cogging, core losses and copper losses and ultimately can reduce the performance of the motor. This paper investigates the effect of the number of slots and poles on the performance of a BLDC motor. The investigation was carried out by modeling a BLDC motor with identical stator outer diameter, air gap width and magnetic material with several slot-pole combinations namely 18/4, 18/8, 18/12 and 24/22. The results of the investigation confirmed that increasing the number of poles from 4, 8 and 12 at a fixed number of slots (18) increases the magnitude, ripple and torque cogging. The experimental results also found that the slot-pole combination (24/22) is the best combination where the torque ripple and torque cogging become very small and smooth. Meanwhile, the effect of the pole-slot combination on losses shows that increasing the number of poles increases iron and copper losses because when the number of poles increases, the motor speed will decrease. If the synchronous speed decreases (for the same power), the current will increase, so copper losses can increase in motors under low-speed high-torque conditions.

Pemilihan jumlah slot stator dan jumlah kutub magnet rotor adalah hal yang sangat penting dalam perancangan sebuah motor BLDC karena kedua parameter tersebut secara langsung mempengaruhi performansi elektromagnetik, karakteristik torsi dan efisiensi. Kombinasi slot-kutub yang tidak sesuai dapat memicu peningkatan riak torsi (*torgue ripple*), cogging torsi (*cogging torque*), rugi-rugi inti maupun rugi-rugi tembaga dan pada akhirnya dapat menurunkan performa dari motor. Paper ini menyelidiki pengaruh jumlah slot dan kutub terhadap unjuk kerja motor BLDC. Penyelidikan dilakukan dengan memodelkan motor BLDC dengan diameter luar stator, lebar airgap dan material magnet yang identik dengan beberapa kombinasi slot-kutub yakni 18/4, 18/8, 18/12 dan 24/22. Hasil investigasi mengkonfirmasi bahwa penambahan jumlah kutub dari 4, 8 dan 12 pada jumlah slot tetap (18) meningkatkan magnitude, ripple dan cogging torsi. Hasil eksperimen juga menemukan bahwa kombinasi slot-kutub (24/22) merupakan kombinasi terbaik dimana ripple torsi dan cogging torsi menjadi sangat kecil dan halus. Sementara itu pengaruh kombinasi slot-kutub terhadap rugi-rugi memperlihatkan bahwa penambahan jumlah kutub meningkatkan rugi-rugi besi dan rugi tembaga karena ketika kutub bertambah maka kecepatan motor akan menurun. Jika kecepatan sinkron menurun (untuk daya yang sama), maka arus akan meningkat sehingga rugi tembaga bisa meningkat pada motor dalam kondisi *low-speed high-torque*.

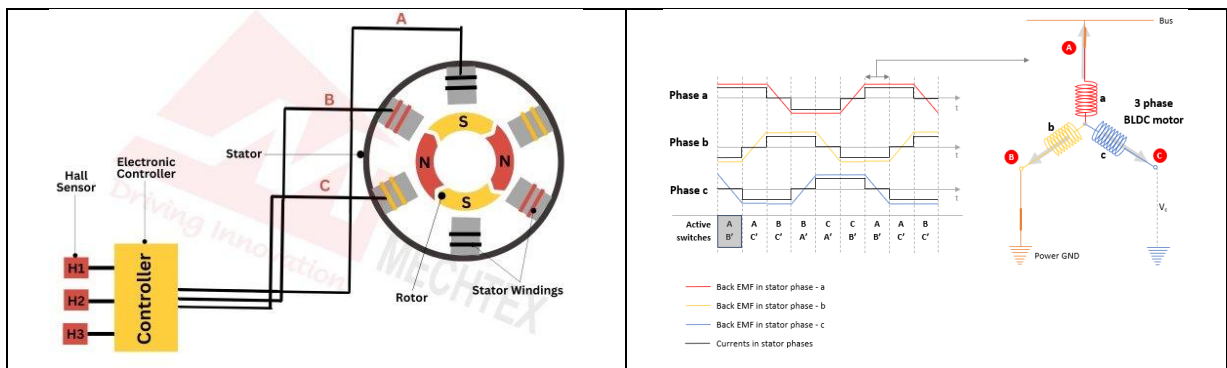
Corresponding Author:

Corresponding : I Nyoman Wahyu Satiawan, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Mataram, Jalan Majapahit no. 62 Mataram, Indonesia. 83125

Email: nwahyus@unram.ac.id

1. INTRODUCTION (10 PT)

Motor BLDC atau Motor DC tanpa sikat (Brushless) adalah jenis motor listrik yang relatif baru. Motor DC konvensional memerlukan komutator mekanik yang berfungsi untuk mengatur/membalik arah arus pada kumparan rotor sehingga arah gaya menjamin motor berputar pada arah yang sama sesuai dengan Hukum Lorentz [1]. Motor BLDC disisi lain memiliki prinsip kerja yang berbeda yakni pengaturan arah gaya pada belitan stator dilakukan secara elektronik dengan cara memberikan triger tegangan sesuai dengan posisi rotor yang berupa magnet permanen. Motor BLDC memiliki keunggulan diantaranya; efisiensi yang tinggi, handal (menggunakan komutator elektronika) dan memiliki power density yang tinggi [2]. Kontruksi motor BLDC juga berbeda dengan motor DC konvensional. Motor DC menggunakan magnet permanen pada stator dan lilitan pada rotor. Berbeda halnya dengan motor BLDC dimana kontruksinya secara umum terdiri dari rotor (magnet permanen) dan stator dibentuk oleh lilitan tembaga yang terdistribusi dalam slot-slot. Komponen lain adalah inverter dan Electronic Speed Control (ESC) yang berisi, mikrokontroler untuk pembangkit PWM dan pembaca sensor posisi rotor. [3]



Gambar 1. Gambar skematik motor BLDC dan bentuk gelombang tegangan tiga phase dan bentuk EMF Back.

Mengingat keunggulan yang dimiliki motor BLDC saat ini banyak digunakan pada berbagai aplikasi, diantaranya ; [4-5]. Namun demikian permasalahan yang masih sering muncul pada motor BLDC adalah terbentuknya ripple torsi yang disebabkan oleh komutasi atau Back EMF yang tidak ideal yang dapat mengakibatkan vibrasi dan kebisingan. Kemudian munculnya cogging torsi akibat interaksi dari medan magnet pada rotor dan slot lilitan dari stator yang mengakibatkan motor bergetar dan terjadinya jerk saat start. Permasalahan lain diantaranya terkait panas / termal dan demagnetisasi yang menimbulkan pemanasan motor berlebih dan penurunan performa fisik. Permasalahan pada motor BLDC secara umum dirangkum pada Tabel 1. [6-8]

Tabel 1. Potensi permasalahan pada motor BLDC

<i>Permasalahan</i>	<i>Penyebab</i>	<i>Dampak</i>
Torque Ripple	Komutasi / Back-EMF tidak ideal	Vibrasi, kebisingan
Cogging Torque	Interaksi magnet-slot	Getaran & jerk saat start
Termal & Demagnetisasi	Panas berlebih	Penurunan performa fisik
Kontrol Elektronik	Komutasi sensor/sensorless	Akurasi rendah, kompleks
Desain Elektromagnetik	Slot-pole/Back-EMF	Akurasi rendah, kompleks

Paper ini menyelidiki pengaruh kombinasi jumlah slot dan kutub pada motor BLDC terhadap ripple torsi, cogging torsi dan rugi-rugi yang ditimbulkan serta mencari kombinasi slot-kutub yang lebih baik untuk meningkatkan kinerja motor terutama terkait torsi, cogging dan pengurangan rugi-rugi motor.

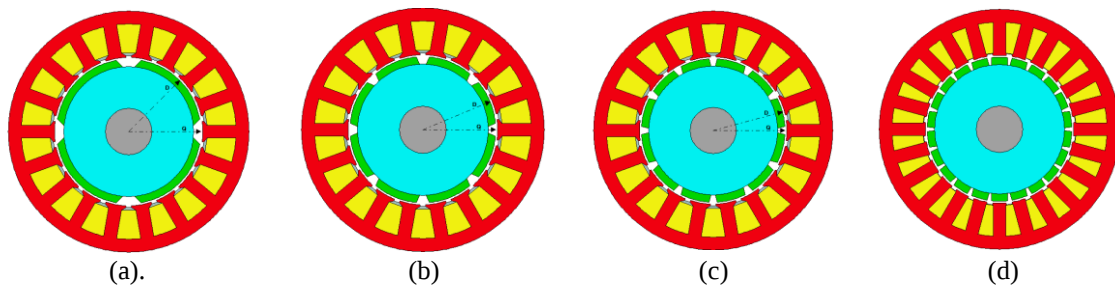
2. METHOD (10 PT)

Pengaruh jumlah slot-kutub paa motor BLDC diselidiki menggunakan software Ansys-CAD. Software ANSYS CAD adalah perangkat lunak pemodelan geometri (Computer-Aided Design) yang digunakan untuk membuat, mengedit, dan menyiapkan model 3D sebelum dilakukan simulasi teknik menggunakan software dari ANSYS, Inc. Berbeda dengan software CAD murni untuk desain manufaktur (seperti SolidWorks atau CATIA), ANSYS CAD lebih difokuskan pada persiapan model untuk analisis dan simulasi seperti: analisis struktur (FEA), analisis fluida (CFD), analisis elektromagnetik, dan analisis termal [9]. Spesifikasi motor BLDC yang dimodelkan pada paper ini dirangkum pada Tabel 2.

Tabel 2. Parameter motor BLDC

<i>Parameter</i>	<i>Unit</i>	<i>Value</i>
P_{max}	kW	297.9
U_{DC} (inverter)	V	100
I_{max}	A	150
$T_{m\ max}$	N.m	0.474
n_{max}	rpm	6000
Q (number of slots)	-	18
P (number of pole)	-	12
Copper weight	kg	0.9923
Iron weight	kg	1.806
Magnet weight	kg	0.515

Paper ini menggunakan 4 variasi kombinasi slot-kutub. Tiga kombinasi menggunakan jumlah slot yang tetap yakni 18 slot dengan jumlah kutub yang divariasikan yakni 4 kutub, 8 kutub dan 12 kutub. Satu variasi menggunakan kombinasi slot – kutub (24 – 22) yang merupakan kombinasi terbaik. Ke-empat kombinasi dimaksud menggunakan parameter stator dan rotor yang sama seperti dirangkum pada Tabel 3. Gambar geometri konfigurasi slot kutub diperlihatkan pada Gambar 2. Dengan menggunakan spesifikasi seperti pada Tabel 3, performa motor BLDC diantaranya ripple torsi, coging torsi, dan rugi-rugi (lossis) motor kemudian dicatat dan dianalisa.



Gambar 2 . Konfigurasi jumlah slot – kutub motor BLDC (a). Konfigurasi 18s - 4p; (b). Konfigurasi 18s-8p. (c). Konfigurasi 18s-12p. (d). Konfigurasi 24s-22p

Tabel 3. Parameter Stator dan Rotor

<i>Stator Parameters</i>	<i>Value</i>	<i>Rotor Parameters</i>	<i>Value</i>
Slot Number	18 (24)	Pole Number	4 (8) (12) (22)
Stator Lam Dia	130	Magnet Thickness	4
Stator Bore	80	Magnet Reduction	0
Tooth Width	7	Magnet Arc [ED]	140
Slot Depth	18	Magnet Segment	1
Slot Corner Radius	0	Rotor Diameter {Calc}	78
Tooth Tip Depth	1	Airgap	1
Slot Opening	3	Banding Thickness	0
Tooth Tip Angle	30	Shaft Dia	25
Sleeve Thickness	0	Shaft Hole Diameter	0

3. RESULTS AND DISCUSSION (10 PT)

Bagian ini mempresentasikan performa motor BLDC menggunakan variasi konfigurasi slot – kutub seperti yang dijelaskan pada seksi sebelumnya. Pertama dibahas keadaan dari torsi motor, selanjutnya cogging torsi yang dihasilkan dan rugi-rugi yang timbul dianalisa pada bagaian berikutnya.

3.1. Torsi Motor

Gambar 3 memperlihatkan magnitude dan ripple torsi yang dibangkitkan untuk berbagai komposisi slot dan kutub dari motor BLDC. Dapat dilihat pada Gambar 3 bahwa magnitude rata-rata torsi motor yang dihasilkan meningkat dari 11 N.m menjadi 15 N.m dan 20 N.m untuk masing-masing pertambahan jumlah kutub dari 4, 8 dan 12. Kenaikan magnitude torsi disebabkan oleh semakin besarnya fluks magnet per kutub. Secara umum besar torsi elektromagnetik pada motor BLDC diatur sesuai persamaan ;

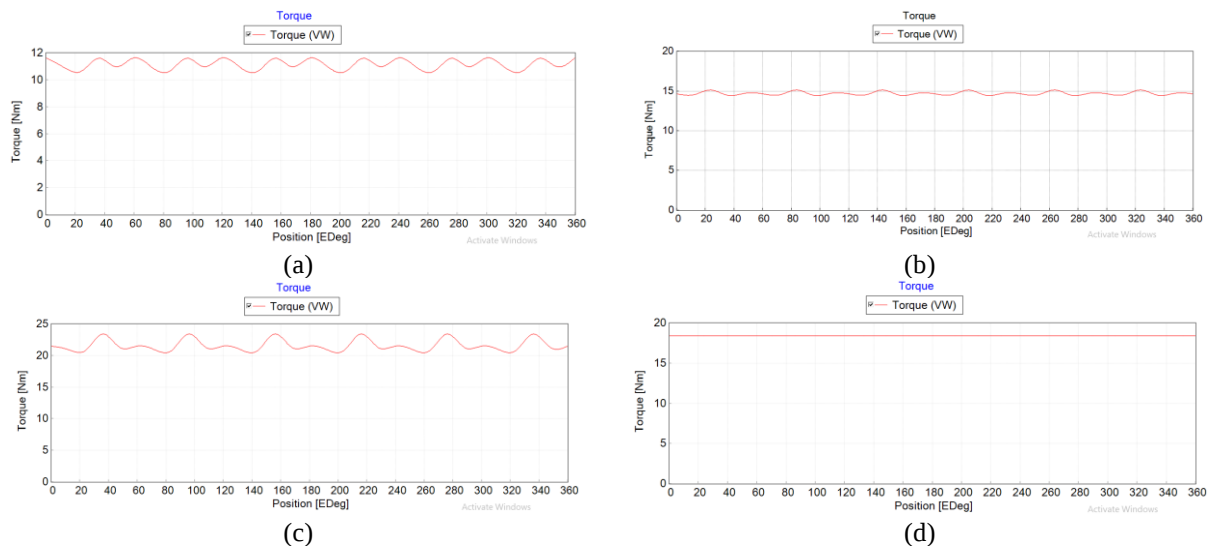
$$T = \Phi . i . P \quad (1)$$

dimana:

Φ = fluks magnet per kutub

i = arus fasa

P = jumlah kutub



Gambar 3. Torsi motor untuk berbagai variasi konfigurasi slot – kutub ; (a). Konfigurasi 18s - 4p; (b). Konfigurasi 18s-8p. (c). Konfigurasi 18s-12p. (d). Konfigurasi 24s-22p

Dengan semakin meningkat jumlah kutub maka interaksi magnet dan kumparan stator atau jumlah daerah interaksi medan magnet semakin bertambah sehingga gaya tengensial total meningkat dengan demikian Torsi per ampere cenderung menjadi lebih besar [10-12]. Namun demikian kenaikan jumlah kutub semestinya diimbangi dengan kenaikan jumlah slot karena kombinasi kutub dan slot yang tidak tepat data memicu ripple torsi yang semakin besar seperti terlihat pada kombinasi slot-kutub (18 – 12) seperti terlihat pada Gambar 3b. Selanjutnya ripple torsi terhalus iperlihatkan pada Gambar d, dimana motor menggunakan kombinasi slot – kutub, 24 – 22. Walaupun torsi sedikit menurun meski dengan peningkatan kutub sampai 22 tetapi dengan pertambahan sot sampai 24 ternyata dapat meredam ripple pada torsi dengan sangat signifikan.

3.2. Cogging Torsi

Selanjutnya pengaruh variasi jumlah slot - kutub terhadap cogging torsi (*cogging torque*) dianalisa. Cogging torsi adalah torsi riak (torsi tersendat) yang muncul akibat interaksi antara medan magnet permanen pada rotor dan gigi/slot stator (tanpa arus pada kumparan stator).[11] Secara fisik, cogging torque muncul karena variasi energi magnetik di celah udara saat rotor bergerak relatif terhadap slot stator. Gambar 4 memperlihatkan cogging tosi motor BLDC untuk berbagai variasi kombinasi slot-kutub. Pada pertambahan jumlah kutub dari 4, 8 dan 12 (jumlah slot tetap sebanyak 18). baik magnitude dan frekwensi dari cogging

meningkat signifikan. Namun demikian coging torsi dapat direduksi secara menjadi relative sangat kecil pada rasio kutub – slot (22 – 24) seperti terlihat pada Gambar 4 d. Hali ini terjadi karena jumlah kutub yang lebih banyak akan meningkatkan jumlah interaksi magnet–slot dalam satu putaran dam membuat frekuensi riak coging lebih tinggi. Ini berarti Getaran jadi lebih sering tetapi amplitudo per kejadian bisa lebih kecil. Dari Gambar 4 dapat diketahui bahwa penambahan jumlah slot memicu coging torsi yang lebih tinggi tatapi kemudian dapat direduksi dengan rasio slot-kutub yang tepat [11-12]. Perhitungan coging menggunakan dasar dari turunan energi magnetik terhadap sudut rotor atau :

$$T_c(\theta) = -\frac{dW_m(\theta)}{d\theta} \quad (2)$$

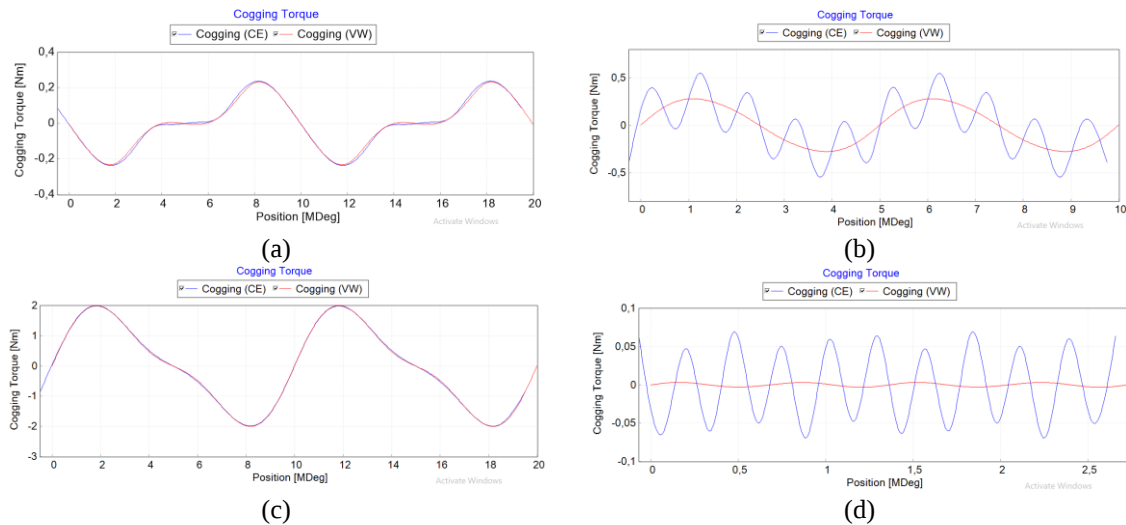
di mana: T_c = cogging torque, W_m = energi magnetik dalam celah udara dan θ = posisi sudut rotor. Dalam hal ini cogging torsi adalah turunan perubahan energi magnetik terhadap posisi rotor. Pendekatan sederhana dari cogging torque dapat diperkirakan dengan bentuk sesuai persamaan (3):

$$T_c(\theta) = \sum_{k=1}^n T_k \sin(k N_c \theta) \quad (3)$$

di mana: $N_c = \frac{LCM(N_s N_g)}{N_p}$, N_s = jumlah slot, N_p = jumlah kutub dan LCM = Least Common Multiple. Jumlah puncak cogging torque per satu putaran mekanik diatur dengan persamaan

$$N_{cog} = LCM(N_s N_g) \dots \dots \quad (4)$$

Jadi berdasarkan persamaan diatas , semakin besar LCM maka frekuensi ripple makin tinggi dan amplitudo biasanya lebih kecil.



Gambar 4. Coging Torsi untuk berbagai variasi konfigurasi slot – kutub ; (a). Konfigurasi 18s - 4p; (b). Konfigurasi 18s-8p. (c). Konfigurasi 18s-12p. (d). Konfigurasi 24s-22p

3.3. Rugi-rugi motor

Selanjutnya pengaruh kombinasi slot-kutub pada performansi motor BLDC terutama yang menyangkut rugi-rugi motor ditampilkan pada Tabel 4. Dapat dilihat bahwa dengan semakin meningkatnya jumlah kutub magnet maka rugi-rugi besi khususnya pada stator dan rugi magnet juga bertambah secara konsisten, tetapi dengan rasio jumlah slot dan kutub yang semakin besar pertambahan rugi. Tembaga semakin kecil dimana juga terjadi pada total rugi-rugi total motor [13]. Dengan bertambahnya slot maka panjang belitan meningkat sehingga resistansi belitan bertambah karena rugi tembaga diatur oleh persamaan $P_{cu} = I^2 R$. Sedangkan pertambahan kutub menyebabkan kecepatan sinkron menurun sehingga untuk daya yang sama, arus akan meningkat sehingga rugi tembaga bisa meningkat pada motor dalam kondisi *low-speed high-torque*.

Tabel 4. Rugi-rugi motor pada berbagai kombinasi slot-kutub.

Variable	Unit	Values for various combinations			
		18s-4p	18s-8p	18s-12p	24s-22p
Armature DC Copper Loss	Watts	127.9	94.42	77.68	165.7
Magnet Loss (on Load)	Watts	2.188	5.006	5.413	7.533
Stator Iron Loss	Watts	73.78	131.1	145.5	160.8
Rotor Iron Loss	Watts	0.434	0.554	0.2527	0.3789
Total Loss	Watts	203.9	231	228.9	334.4
Magnet Block Width	mm	45.2	22.6	15.07	8.219

4. CONCLUSION (10 PT)

Paper ini mempresentasikan pengaruh jumlah slot dan kutub magnet terhadap performa motor BLDC. Ada 4 kombinasi slot-kutub yang diselidiki. Pertambahan jumlah kutub magnet dari 4, menjadi 8 dan 12 (pada jumlah slot yang sama yakni 18) secara jelas meningkatkan magnitudo dari torsi. Hal ini disebabkan oleh semakin besarnya fluks magnet per kutub. Disamping itu, pertambahan jumlah kutub juga menyebabkan ripple torsi dan coging torsi yang semakin besar, yang mana besarnya torsi berbanding lurus dengan besarnya fluks magnet per kutub. Namun demikian, pada kombinasi slot-kutub tertentu (24s-22p) dapat menghasilkan ripple dan coging torsi yang paling halus walau berdampak terhadap penurunan magnitudo. Selain itu, Kenaikan jumlah kutub berdampak pada kenaikan rugi-rugi magnet dan rugi besi sehingga juga mempengaruhi rugi-rugi total dari motor BLDC.

Acknowledgments

Ucapan terima kasih kepada LPPM Universitas Mataram dan kolega kami yang tergabung dalam kelompok riset Power Electronics and Drives (PED-rg) atas dukungan finansial, pendapat dan dukungan lainnya sehingga penelitian terkait pengembangan motor BLDC dapat terlaksana dengan baik.

1. REFERENCES (10 PT)

- [1] A.E. Fitzgerald, C. Kingsley, & S.D. Umans, "Electric Machinery". McGraw-Hill, 2003.
- [2] B. Divakari, R.S.R.N. Krishnam, G. Divya, S. Yugandhar, G.M. Deepak, D. Sindhusa, "A Review On Brushless Dc Motor Control Techniques", Journal of Pharmaceutical Negative Results, Vol. 13, Special Issue 7, 2022
- [3] Y.C. Wibowo, S. Riyadi, " Analisa Pembebanan pada Motor Brushless DC (BLDC)", Seminar Nasional Instrumentasi, Kontrol dan Otomasi, pp. 277 – 282. 2018, 10.5614/sniko.2018.33
- [4] M.. Şen, & Mutluer, " A Review of BLDC Motors: Types, Application, Failure Modes and Detection." Energies 2025, 18, 6402. <https://doi.org/10.3390/en18246402>
- [5] U. Haider. N. Siddique. M. Rashad. S. Miran. M. Wasif. M.J. Irshad, "A FEM Analysis of BLDC Ceiling Fan with Different Slot-Pole Combinations", IJIST, Special Issue. pp 208-219, March 2025
- [6] M. Sumega, S. Zossak, P. Varecha, P. Rafaidus, "Sources of torque ripple and their influence in BLDC motor drives", Transportation Research Procedia 2019, vol. 40. Pp 519-526
- [7] A.S. Cabu, S. Saglam, O. Ustun, " Impact of various slot-pole combinations on an in-wheel BLDC motor performance", Journal of Electrical & Electronics Engineering 17(2):3369-3375, 2017
- [8] M.I. Kahar, R.N.F.K. Raja Othman, A. Khamis, N. Abdullah, F.A.A. Shukor, & L.S. Tat," Effect of Slot-Pole Numbers on the Performance of a BLDC Motor for Agro-EV Application". ECTI Transactions on Electrical Engineering, Electronics, and Communications, 20(1), 51–61. <https://doi.org/10.37936/ecti-eec.2022201.246104>
- [9] P. Dukalski, & J. Mikoś, & R. Krok,. "Analysis of the Simulation of the Operation of a Wheel Hub Motor Mounted in a Hybrid Drive of a Delivery Vehicle". Energies. 15. 8323. 2022, 10.3390/en15218323.
- [10] K.S. Kim, C.M. Lee, G.Y. Hwang, S.M. Hwang, "Effect of the number of poles on the acoustic noise from BLDC motors". Journal of Mechanical Science and Technology. 25. 273-277. 2011. 10.1007/s12206-010-1216-4.
- [11] C.C. Hwang, M.H. Wu, S.P. Cheng, "Influence of pole and slot combinations on cogging torque in fractional slot PM motors". Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Volume 304, Issue 1, 2006, pp e430-e432,. ISSN 0304-8853, <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2006.01.207>
- [12] J. Yang, J. Chen, G. Yang, C. Zhang, "Research on cogging torque characteristics of permanent magnet synchronous machines with the same number of poles and slots", Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Volume 561, 2022, ISSN 0304-8853, <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2022.169730>
- [13] A.S. Cabuk, S. Saglam, & O. Ustun, "Impact of various slot-pole combinations on an in-wheel BLDC motor performance". IU-JEEE, 17(2), 3369–3375. 2017.

BIOGRAPHY OF AUTHORS (10 PT)

	I Nyoman Wahyu Satiawan is a lecturer in Department of Electrical Engineering, University of Mataram, since 1998. He took his first degree at Department of Electrical, Udayana University, Bali in 1997 and his Master and Doctoral degree at Liverpool John Moores University was completed in 2000 and 2013. Dr. Satiawan, is currently the Head of the the Power Electronics and Drives Research Group, Faculty of Engineering, University of Mataram. His research interest is in the field of Power conversion for electric motor drives and renewable energy development. In the last 10 years Dr. Satiawan has produced dozens of national and international journals as well as international conference proceedings. Email : nwahyus@unram.ac.id
	Ida Bagus Fery Citarsa is a lecturer in Department of Electrical Engineering, University of Mataram, since 1998. He took his first degree at Department of Electrical, National Institute of Technology Malang 1997 and his Master degree at Gajah Mada University was completed in 2001. His research interest is in the field of Power conversion for renewable energy development. In the last 10 years Mr. Citarsa has produced dozens of national and international journals as well as international conference proceedings. Email : gusmanperi@yahoo.com
	I Made Budi Suksmadana is a lecturer in Department of Electrical Engineering, University of Mataram, since 1998. He took his first degree at Department of Electrical, University of Udayana Bali 1997 and his Master degree at Gajah Mada University was completed in 2001. His research interest is in the field of Power Electronics, Microcontrollers and Robotic. In the last 10 years Mr. Suksmadana has produced dozens of national and international journals as well as international conference proceedings. Email : mdbudisuk@unram.ac.id
	Dr. Ir. I Ketut Wiryajati, S.T., M.T., IPU., ASEAN Eng. obtained his Bachelor's degree (S1) in Electrical Engineering from Udayana University (UNUD) in 1994, his Master's degree (S2) in Electrical Engineering from the Sepuluh Nopember Institute of Technology (ITS) in 2003, and his Doctoral degree (S3) in Electrical Engineering from Udayana University in 2020. He also completed the Professional Engineer Program (Ir.) at Udayana University in 2018. He is a full-time lecturer in the Department of Electrical Engineering at the University of Mataram, West Nusa Tenggara, Indonesia. His research interests include Power Conversion, Renewable Energy Development, Power Electronics and Drives, and Electric Machines. He has been a member of IET since 2014 and IEEE since 2018. Email: kjatiwirya@unram.ac.id
	Supriono is a lecturer in Department of Electrical Engineering, University of Mataram, since 1998. He took his first degree at Department of Electrical, University Sumatra Utara (USU) and his Master degree at Gajah Mada University was completed in 2001. His research interest is in the field of Power Electronics and Drives. In the last 10 years. Mr. Supriono has produced dozens of national and international journals as well as international conference proceedings. Email : suprionomuda@yahoo.com