

# Analisis Pengaruh Desain Kumbaran 6-Fasa Terhadap Torsi Dan Kecepatan Motor Induksi 3-Fasa Berbasis Desain 3 Fasa Ganda Tak Simetris

Zuriman Anthony<sup>1</sup>, Ica Laras Widia<sup>2\*</sup>, Erhaneli<sup>3</sup>, Arfita Yuana Dewi Putra<sup>4</sup>, Andi Syofian<sup>5</sup>

[icalaraswidia643@gmail.com](mailto:icalaraswidia643@gmail.com)<sup>2</sup>

Program Studi Teknik Elektro, Institut Teknologi Padang, Indonesia

Jln. Gajah Mada Kandis, Kp. Olo, Kec. Nanggalo, Kota Padang, Sumatera Barat 25143, Indonesia

## ARTICLE INFO

Article history:

Received : 24 June 2024

Received in revised : 18 November 2024

Accepted : 2 Desember 2024

Available online : 12 Desember 2024

## ABSTRACT

*This study aims to examine the impact of a 6-phase design using an asymmetrical dual*

*3-phase design on the torque and speed of an induction motor, where the newly designed motor still uses a 3-phase power source. The research compares the performance of a conventional 3-phase induction motor with that of an asymmetrical 6-phase induction motor design, focusing on torque and speed. This motor is only designed in terms of its windings, so the motor's position remains unchanged. The 3-phase system applied to the 6-phase induction motor design ensures that the 6-phase motor operates within a 3-phase system. The study also explores performance improvements, particularly in torque and speed, by redesigning the windings of a 3-phase induction motor into an asymmetrical 6-phase motor. The induction motor used in this research has the following specifications: 3-phase, 2 A, 1390 RPM, 50Hz, 0.75 kW, and 380V. The study aims to understand the effects of the asymmetrical 6-phase induction motor design, particularly regarding torque and speed. The results show that the torque and speed of the two motors differ due to the asymmetrical 6-phase winding design. In a conventional 3-phase induction motor, the winding coil layer distance is 120°, whereas, in the asymmetrical 6-phase induction motor, the distance between the first and second layers is 30°. Based on this analysis, the asymmetrical 6-phase induction motor design demonstrates better performance compared to the conventional 3-phase induction motor.*

*Keywords: 3- phase in induction, 6-phase winding, torque, speed, asymmetrical*

## 1. Pendahuluan

Motor induksi merupakan sarana yang digunakan untuk mengubah energi listrik menjadi penggerak mekanis[1][2]. Motor induksi menjadi salah satu mesin listrik yang banyak digunakan sebagai penggerak, seperti meningkatkan kualitas konten, tetapi juga mendorong daya saing komunitas lokal di era digital (Fitria et al., 2019). menggerakkan conveyor belt *industry*, pompa air, kilang minyak, elevator dan lainnya [3], [4], [5], [6], [7]. Motor induksi yang banyak digunakan saat ini adalah motor induksi 3-fasa. Motor induksi 3 fasa mempunyai 3 buah kumparan yang identik sama yang secara konstruksi berjarak 120 derajat [8], sehingga motor ini dapat bekerja dengan kerapatan arus yang sama dengan kondisi beban yang berbeda[9].

Selain motor induksi tiga fasa memiliki banyak kelebihan, motor ini juga memiliki kekurangan, seperti efisiensi rendah, factor daya yang rendah, kinerja motor induksi yang lebih rendah jika dibandingkan dengan motor listrik yang lain seperti motor sinkron. Motor induksi ini mempunyai

Received June 21, 2024; Revised November 20, 2024; Accepted Desember 2, 2024

\* Ica Laras Widia; [icalaraswidia643@gmail.com](mailto:icalaraswidia643@gmail.com)

efisiensi yang lebih rendah dari motor sinkron sehingga mengkonsumsi energi yang lebih boros [10][11][12][13]. Beberapa upaya yang telah dilakukan untuk meningkatkan kinerja motor induksi 3 fasa diantaranya adalah dengan memperbaiki bahan feromagnetic motor [14][12] dan juga dengan cara memperbanyak desain fasa kumparan motor induksi ini seperti desain kumparan 6-fasa [6], [15], [16], [17], [18], [19], desain kumparan 9-fasa [20], [21], [22] dan desain kumparan 12-fasa. Dengan penambahan fasa pada kumparan motor memerlukan sumber tenaga baru untuk mensuplai motor. Diharapkan adanya penelitian baru yang dapat meningkatkan kinerja motor induksi 3-fasa tanpa membutuhkan biaya tambahan yang mahal untuk pengoperasian motor. Oleh sebab itu masih dibutuhkan suatu usaha baru dalam pengembangan motor induksi 3-fasa agar dapat bekerja dengan biaya yang lebih murah tetapi memiliki kinerja yang lebih baik. Kajian untuk meningkatkan kinerja motor ini perlu dilakukan salah satunya adalah tentang peningkatan torsi dan kecepatan motor sehingga terjadi peningkatan kemampuan motor.

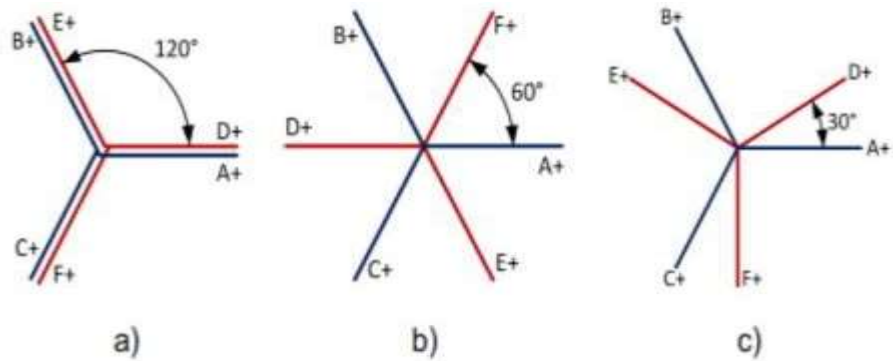
Solusi akan diberikan pada penelitian ini untuk meningkatkan kinerja motor induksi 3-fasa tanpa memerlukan biaya tambahan yang mahal pada motor yaitu menggunakan metode pengembangan desain kumparan motor induksi 3-fasa dengan di desain menjadi kumparan 6-fasa tak simetris yang dibentuk dengan cara mendesain 3-fasa ganda tak simetris. Desain tak-simetris 6 fasa ini dipilih karena merupakan desain terbaik untuk standar motor induksi 6 fasa dengan frekuensi 50 Hz [23]. Desain yang akan dirancang pada kumparan motor pada penelitian ini akan dibuat sebaik-baiknya dengan memperhatikan tata letak dan arah lilitan kumparan stator sehingga saat motor induksi beroperasi pada sistem kumparan 3 fasa akan bekerja seperti motor induksi 6-fasa. Kajian pada penelitian ini lebih difokuskan pada torsi dan kecepatan motor induksi 3 fasa.

Penambahan fasa pada kumparan motor induksi membutuhkan sumber daya tambahan untuk mendukung operasional motor. Oleh karena itu, diharapkan adanya penelitian baru yang mampu meningkatkan kinerja motor induksi tiga fasa tanpa menambah biaya operasional yang signifikan. Upaya pengembangan motor induksi tiga fasa masih diperlukan agar motor induksi dapat berfungsi dengan lebih efisien, namun tetap memberikan kinerja yang optimal. Salah satu aspek yang perlu dikaji lebih lanjut adalah peningkatan torsi dan kecepatan motor, sehingga performa keseluruhan motor dapat ditingkatkan..

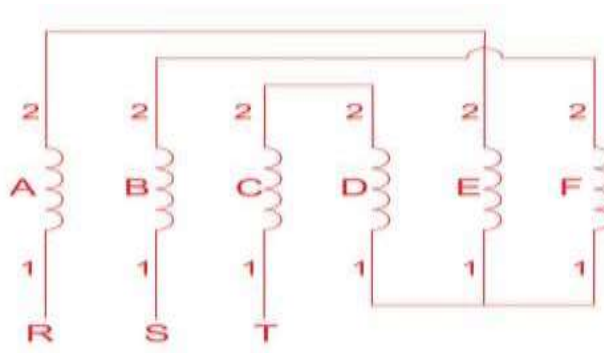
## 2. Metode penelitian

Metode pengambilan data ini dilakukan pada saat pengujian motor induksi tiga fasa konvensional dengan motor induksi tiga fasa dengan motor induksi tiga fasa yang desain enam fasa tak simetris di laboratorium Sistem Tenaga Listrik Institut Teknologi Padang. Konfigurasi umum tata letak desain kumparan 6-fasa dapat dilihat pada gambar 1[24]. Gambar 1a menunjukkan tata letak desain 6-fasa semi-simetris, yang merupakan gabungan dua lapisan kumparan 3-fasa (berdempetan) dengan jarak antar kumparan 120 derajat. Gambar 1b menggambarkan desain 6-fasa simetris dengan jarak antar kumparan 60 derajat, sementara gambar 1c menampilkan desain 6-fasa asimetris dengan jarak antar kumparan 30 dan 90 derajat. Setiap desain yang ditampilkan pada gambar 1 ini kan mempengaruhi kinerja motor secara berbeda.

Motor induksi yang digunakan dalam desain ini memiliki spesifikasi 0,75 kW, 220/380,  $\Delta/Y$ , 2 A, 50HZ, dan 1390 Rpm. Desain kumparan yang digunakan dalam penelitian ini adalah desain 6-fasa tak simetris yang ditetapkan pada motor induksi 3-fasa.



Gambar 1. Konfigurasi Tata Letak Desain Kumaran 6-Fasa Pada Motor Induksi.

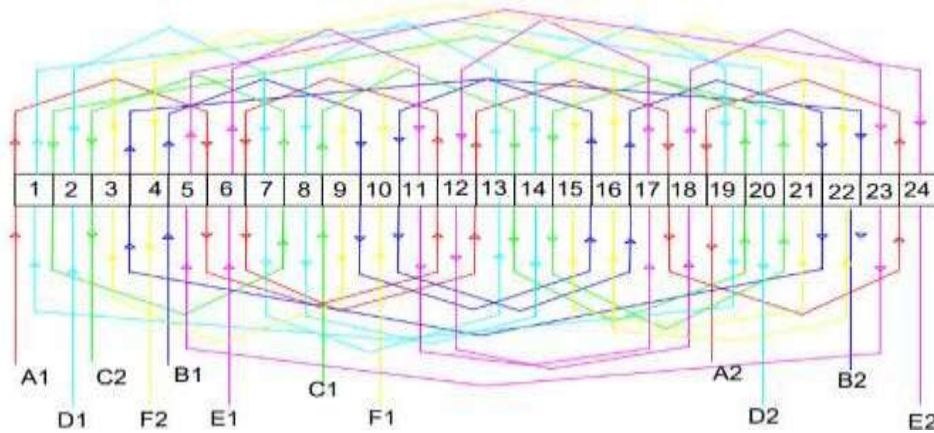


Gambar 2. Bentuk Hubungan 6 Kumaran Motor Induksi 3-fasa pada Terminalnya dengan Desain 6 Fasa Tak Simetris.

Pada gambar 2 merupakan sambungan kumaran pada terminal motor induksi 3-fasa desain kumaran 6-fasa tak simetris.

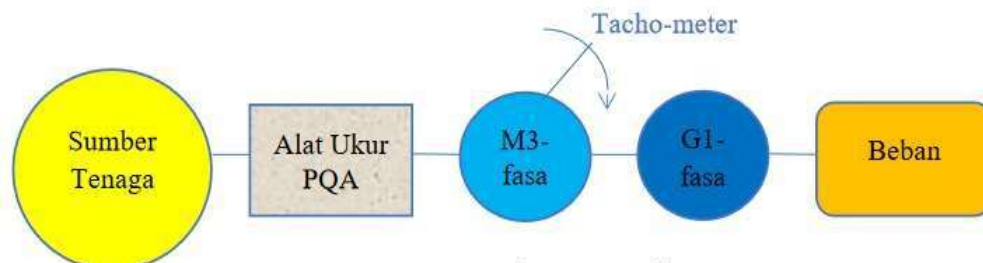
Sambungan kumaran pada terminal motor induksi 3-fasa desain kumaran 6-fasa  
Keterangan :

- R1 : sebagai sumber masukan untuk fasa R dari sumber tegangan
- S1 : sebagai sumber masukan untuk fasa S dari sumber tegangan
- T1 : sebagai sumber masukan untuk fasa T dari sumber
- A2 dan E2 : dihubungkan atau di couple
- C2 dan D2 : dihubungkan atau di couple
- D1,E1 DAN F1 : dihubungkan rangkaian bintang



Gambar 3. Desain Lilitan Motor Induksi 3-Fasa dengan Kumparan Desain 6- Fasa Tak Simetris

Gambar 3 merupakan motor induksi 3-fasa desain 6-fasa tak simetris dimana bentuk desain baru motor induksi yang telah di rewinding dengan mengganti bentuk kumparan yang semula 3-fasa konvensional menjadi desain 6-fasa tak simetris menggunakan slot sebanyak 24 slot dan dalam slot terdapat 110 lilitan tembaga. Lilitan pada stator motor induksi 3-fasa desain 6-fasa tak simetris menggunakan bentuk kumparan jerat yang berprinsip distribusi.



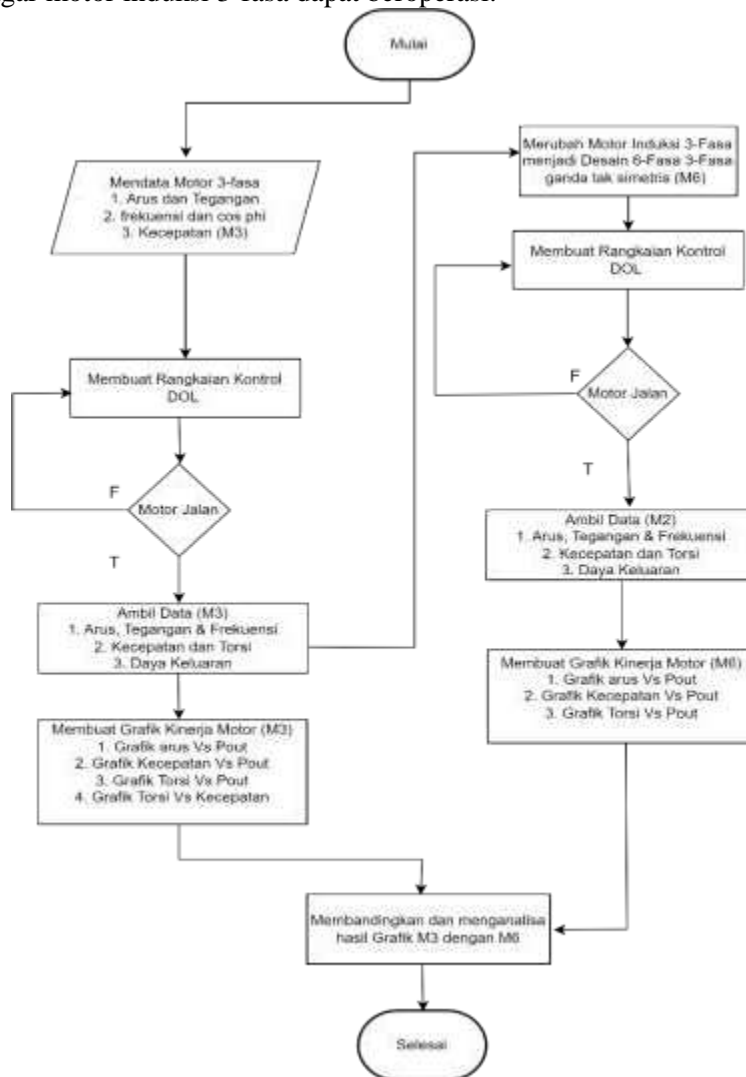
Gambar 4. Skema Pengujian Motor Induksi

Gambar 4 merupakan skema pengujian motor induksi yang terdiri dari dua jenis pengujian, yaitu pengujian tanpa beban dan pengujian berbeban. Pada pengujian tanpa beban komponen yang digunakan meliputi sumber tenaga, alat ukur, serta motor induksi 3-fasa konvensional dan motor induksi 3-fasa dengan desain 6-fasa tak simetris. Sebaliknya, pengujian berbeban menggunakan sumber tenaga, alat ukur, motor induksi 3-fasa konvensional, motor induksi 3-fasa dengan desain 6-fasa tak simetris, generator, dan beban seperti lampu pijar.



Gambar 5. Peralatan dan Bahan Penelitian

Gambar 5 merupakan gambar peralatan dan bahan yang digunakan pada saat pengujian, beban yang digunakan berupa lampu pijar yang divariasikan sebagai beban selama penelitian. Beban tersebut akan menggunakan sumber tegangan 1-fasa yang dihasilkan oleh generator. Generator 1-fasa ini berfungsi untuk mengkonversi energi gerak dari motor induksi menjadi energi listrik yang akan menyuplai listrik ke beban. Motor induksi 3-fasa dihubungkan dengan sumber 3-fasa sebagai sumber tenaga agar motor induksi 3-fasa dapat beroperasi.



Gambar 6. Flowchart Penelitian

Torsi dan kecepatan berhubungan dengan kemampuan motor induksi untuk memberikan beban mekanik. Torsi secara umum dapat dirumuskan sebagai berikut.

$$(\tau) = \frac{P_m}{\omega_r} \dots \dots \dots (1)$$

Dimana :

$\omega_r$  = Kecepatan sudut (mekanik) dari rotor (rad/dt)

$P_m$  = Daya mekanik

Untuk menentukan hasil dari nilai kecepatan sudut yaitu :

$$\omega_r = 2 \cdot \pi \cdot N_r / 60 \dots \dots \dots (2)$$

Dimana :

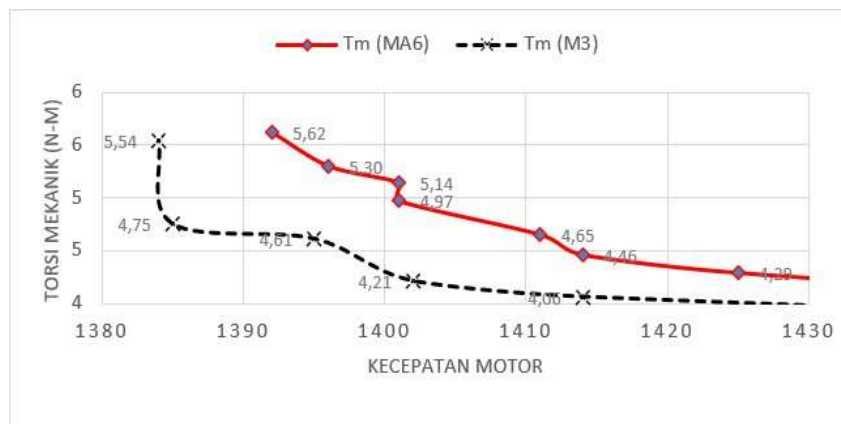
$\omega_r$  = kecepatan sudut.

$\pi$  = jari rumus 3,14

$N_r$  = kecepatan rotor (Rpm)

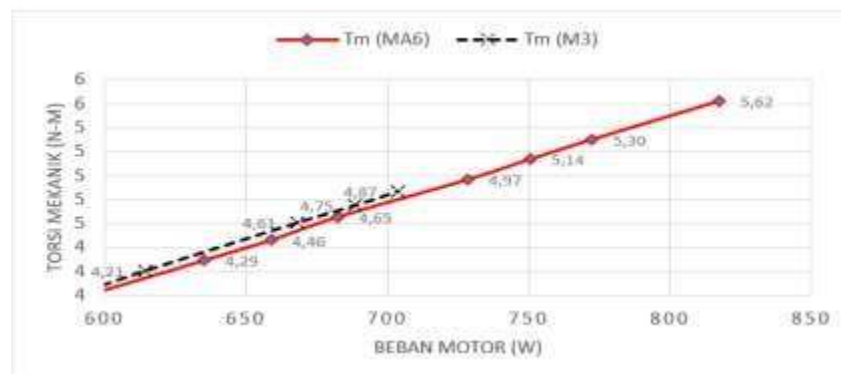
### 3. Hasil dan Pembahasan

Berdasarkan hasil penelitian mengenai kinerja motor induksi desain 6-fasa tak simetris terkait torsi dan kecepatan, karakteristik motor disajikan dalam bentuk grafik pada gambar 7 sebagai berikut.



Gambar 7. Grafik Torsi dan Kecepatan

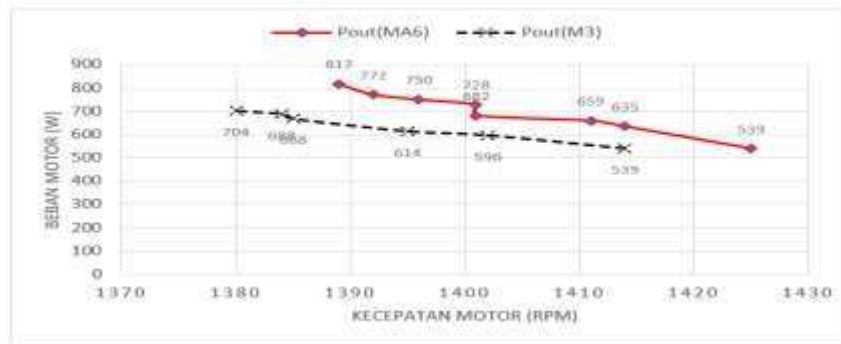
Gambar 7 menunjukkan hubungan antara torsi (Nm) dan kecepatan (Rpm) motor induksi 3-fasa ditandai dengan garis hitam dan motor induksi 3-fasa desain 6-fasa ditandai dengan garis garis merah. pada grafik 7 terlihat bahwa motor induksi desain 6-fasa memiliki nilai torsi yang lebih tinggi dibandingkan dengan motor induksi 3-fasa konvensional. Hal ini dibuktikan pada desain 6-fasa nilai torsi dan kecepatan sebesar 5,62 Nm dan 1389 Rpm sedangkan pada motor induksi 3-fasa memiliki torsi dan kecepatan sebesar 4,87 Nm dan 1380 Rpm selisih peningkatan sebesar 21,98% pada torsi dan 0,29% Rpm pada kecepatan motor induksi. Sehingga dapat dinyatakan desain motor induksi desain baru memiliki keunggulan dari segi torsi dan kecepatan. Oleh karena itu desain baru ini dapat direkomendasikan untuk di operasikan pada desain kumparan motor induksi 3-fasa dengan kualitas yang lebih unggul dengan harga yang murah.



Gambar 8. Grafik Torsi terhadap Pout Motor

Gambar 8. menunjukkan hubungan antara beban motor dan torsi mekanik pada motor induksi. Motor 3-fasa ditandai dengan garis hitam, sedangkan motor 6-fasa ditandai dengan garis merah. torsi motor induksi 6-fasa lebih besar dibandingkan dengan torsi motor induksi 3-fasa pada beban

yang bervariasi. Saat beban meningkat, slip motor bertambah (kecepatan rotor berkurang jika dibandingkan dengan kecepatan sinkron), sehingga torsi meningkat. Torsi berbanding lurus dengan daya keluaran( acuan persamaan 2.17). Dengan demikian motor induksi desain 6-fasa memiliki nilai torsi yang lebih unggul dibandingkan motor induksi 3-fasa konvensional.



Gambar 9. Grafik Kecepatan Terhadap Beban Motor

Gambar 9. menunjukkan hubungan antara kecepatan motor (Rpm) dan beban motor (W) pada motor induksi. Dimana motor 3-fasa ditandai dengan garis hitam dan motor induksi desain 6-fasa ditandai dengan garis merah. grafik tersebut membandingkan antara beban dan kecepatan pada motor induksi 3-fasa konvensional dengan motor induksi 6-fasa.

Pada motor induksi 3-fasa berbeban dan kecepatan puncak yaitu sebesar 703,74 dan 1380 Rpm dan pada desain baru yaitu 750,44 Watt dengan kecepatan 1396 Watt. Jadi motor desain baru memiliki keunggulan dari segi beban motor (Pout) dan kecepatan. Terlihat bahwa terjadi peningkatan beban menyebabkan penurunan kecepatan pada motor induksi yang disebabkan oleh bertambahnya slip pada motor. Saat beban bertambah, slip akan meningkat sehingga kecepatan Putaran rotor menurun. Sebaliknya, saat motor tanpa beban dioperasikan, slip sangat kecil dan kecepatan rotor mendekati kecepatan sinkron. Hubungan ini menunjukkan semakin besar beban, maka semakin menurun kecepatan putaran rotor motor induksi akibat peningkatan slip.

Motor induksi 3-fasa konvensional dan motor induksi 3-fasa desain 6-fasa tak simetris, di uji di laboratorium Teknik Elektro ITP dengan variasi beban pada motor. Torsi dan kecepatan motor induksi 3-fasa konvensional dengan motor induksi 3-fasa desain 6-fasa tak simetris mengacu pada standar kecepatannya yang diperoleh pada tabel 1.

ACUAN STANDAR KECEPATAN MOTOR INDUKSI 1390 RPM				
No	Objek Kajian	3-fasa	6-fasa	Peningkatan %
1	Tm	4,61 Nm	5,62 Nm	21,98%
2	Kecepatan	1385 Rpm	1389 Rpm	0,29%

Tabel 1. Data Pengujian Torsi dan Kecepatan pada Motor dengan Mengacu pada Standar Kecepatan Motor

#### 4. Kesimpulan

Dari hasil penelitian motor induksi desain 6-fasa tak simetris di peroleh bahwa motor desain baru memiliki keunggulan dari segi torsi dan kecepatan hal ini dibuktikan dengan kenaikan nilai torsi sebesar 21,98% dan nilai kecepatan sebesar 0,29% dibandingkan dengan motor induksi 3-fasa konvensional. Hal ini disebabkan oleh kerapatan fluks yang terjadi antara lapisan kumparan pertama dengan lapisan kumparan kedua sebesar  $30^{\circ}$ . Berdasarkan hasil penelitian motor induksi

desain baru ini direkomendasikan untuk diaplikasikan pada desain kumparan motor induksi 3-fasa dengan kualitas yang lebih baik dengan biaya lebih murah. Pengujian motor induksi 3-fasa konvensional dan motor induksi 3-fasa desain 6-fasa tak simetris dilakukan di Laboratorium Teknik Elektro ITP dengan beban yang berbeda-beda. Perbandingan torsi dan kecepatan motor mengacu pada tabel 1. Dengan tabel tersebut diketahui berapa besar peningkatan yang terjadi antara desain motor induksi konvensional dengan desain baru.

## References

- [1]. R. H. Cunha, I. Nunes, A. Goedel, and W. F. Godoy, "A comprehensive evaluation of intelligent classifiers for fault identification in three-phase induction motors," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 127, pp. 249–258, 2015, doi: 10.1016/j.epsr.2015.06.008.
- [2]. S. T. Elektro, F. Teknik, and U. N. Surabaya, "ANALISIS PENGENDALIAN MOTOR INDUKSI TIGA FASA MENGGUNAKAN FUZZY Akbar Kurniawan," pp. 733–740, 2016.
- [3]. W. Dsl and D. N. K. Hardani, "Analisis Torsi dan Efisiensi pada Motor Induksi Tiga Fasa Rotor Sangkar," *Techno (Jurnal Fak. Tek. Univ. Muhammadiyah Purwokerto)*, vol. 19, no. 2, p. 79, 2018, doi: 10.30595/techno.v19i2.3070.
- [4]. Y. Xie, C. Pi, and Z. Li, "Study on design and vibration reduction optimization of high starting torque induction motor," *Energies*, vol. 12, no. 7, 2019, doi: 10.3390/en12071263.
- [5]. Y. J. Wang, L. Pierrat, and E. Helerea, "Balancing a three-phase induction motor supplied from a single-phase source with two SVCs," *Proc. - 2017 Int. Conf. Optim. Electr. Electron. Equipment, OPTIM 2017 2017 Intl Aegean Conf. Electr. Mach. Power Electron. ACEMP 2017*, no. 3, pp. 268–274, 2017, doi: 10.1109/OPTIM.2017.7974982.
- R. Rinkevičiene, Z. Savickiene, D. Uznys, A. Pitrenas, and A. Šlepikas, "Scalar control of six-phase induction motor," *2017 Open Conf. Electr. Electron. Inf. Sci. eStream 2017 - Proc. Conf.*, pp. 0–5, 2017, doi: 10.1109/eStream.2017.7950304.
- [6]. P. Studi, T. Elektro, and F. T. Industri, "PADA MOTOR INDUKSI UNTUK PENGHEMATAN KONSUMSI ENERGI LISTRIK," vol. 2, no. 2, pp. 30–37, 2012.
- [7]. Z. Anthony, "Kajian Pengembangan Lilitan Motor Induksi 1-Fasa Dengan Bentuk Lilitan 4-Fasa (Studi Kasus: Daya Keluaran dan Faktor Daya)," *J. Tek. Elektro ITP*, vol. 7, no. 2, pp. 95–100, 2018, doi: 10.21063/jte.2018.3133713.
- [8]. Z. Anthony and E. Erhaneli, "Kinerja Motor Induksi 1-fasa Disain 4 Kumparan dengan Kapasitansi Kapasitor Jalan Terkendali," *Elkha*, vol. 12, no. 1, p. 7, 2020, doi: 10.26418/elkha.v12i1.37857.
- [9]. W. Fei, P. C. K. Luk, J. Ma, J. X. Shen, and G. Yang, "A high-performance line-start permanent magnet synchronous motor amended from a small industrial three-phase induction motor," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 45, no. 10, pp. 4724–4727, 2009, doi: 10.1109/TMAG.2009.2022179.
- [10]. R. Ni *et al.*, "Efficiency Enhancement of General AC Drive System by Remanufacturing Induction Motor with Interior Permanent-Magnet Rotor," *IEEE Trans.*



---

*Ind. Electron.*, vol. 63, no. 2, pp. 808–820, 2016, doi: 10.1109/TIE.2015.2477478.

- [11]. D. Liang and V. Zhou, “Recent market and technical trends in Copper Rotors for High-Efficiency Induction Motors,” *2018 Int. Power Electron. Conf. IPEC-Niigata - ECCE Asia 2018*, pp. 1943–1948, 2018, doi: 10.23919/IPEC.2018.8507879.
- [12]. K. Sakai and N. Yuzawa, “Realizing high efficiency using pole-changing hybrid permanent magnet motors,” *Proc. 2013 IEEE Int. Electr. Mach. Drives Conf. IEMDC 2013*, pp. 462–467, 2013, doi: 10.1109/IEMDC.2013.6556137.
- [13]. S. F. Rabbi, P. Zhou, and M. A. Rahman, “Design and Performance Analysis of a Self-Start Radial Flux Hysteresis Interior Permanent Magnet Motor,” vol. 9464, no. c, pp. 10–13, 2017, doi: 10.1109/TMAG.2017.2695079.
- [14]. M. J. Duran, I. Gonzalez-Prieto, N. Rios-Garcia, and F. Barrero, “A Simple, Fast, and Robust Open-Phase Fault Detection Technique for Six-Phase Induction Motor Drives,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 33, no. 1, pp. 547–557, 2018, doi: 10.1109/TPEL.2017.2670924.
- [15]. V. Patel, “Analysis of Different Speed Control Techniques for A Six- Phase Asymmetrical Induction Motor Drive,” *2019 Fifth Int. Conf. Sci. Technol. Eng. Math.*, vol. 1, pp. 325–331, 2019.
- [16]. L. Livadaru, A. Bobu, A. Munteanu, B. Virlan, and A. Simion, “FEM-based analysis on the operation of three-phase induction motor connected to six-phase supply system part 2 - Study on fault-tolerance capability,” *2017 11th Int. Conf. Electromechanical Power Syst. SIELMEN 2017 - Proc.*, vol. 2017-Janua, pp. 125–130, 2017, doi: 10.1109/SIELMEN.2017.8123311.
- [17]. J. Listwan and K. Pienkowski, “Experimental studies of DTC-SVM control of six-phase induction motor with application of the super-twisting sliding mode controllers,” *2018 Int. Symp. Electr. Mach. SME 2018*, pp. 1–6, 2018, doi: 10.1109/ISEM.2018.8442606.
- [18]. Z. Anthony, S. Bandri, and Y. Warmi, “Analisa Pengaruh Desain 6 Kumparan Simetris pada Motor Induksi 3-fasa terhadap Efisiensi dan Faktor Daya Motor,” *Semin. Nas. Ris. Inov. Teknol.*, vol. 1, no. 1, pp. 233–242, 2022.
- [19]. A. S. Abdel-Khalik, A. M. Massoud, and S. Ahmed, “Nine-Phase Six-Terminal Induction Machine Modeling Using Vector Space Decomposition,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 66, no. 2, pp. 988–1000, 2019, doi: 10.1109/TIE.2018.2833041.
- [20]. A. Madhukar Rao, S. Keerthipati, B. Prathap Reddy, and M. Sahoo, “A fault-tolerant multilevel inverter for improving the performance of a pole-phase modulated nine-phase induction motor drive,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 65, no. 2, pp. 1107–1116, 2017, doi: 10.1109/TIE.2017.2733474.
- [21]. Z. Liu, Z. Zheng, and Y. Li, “Enhancing Fault-Tolerant Ability of a Nine-Phase Induction Motor Drive System Using Fuzzy Logic Current Controllers,” *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 32, no. 2, pp. 759–769, 2017, doi: 10.1109/TEC.2017.2692528.

- 
- [22]. A. Senior, M. Abdel-majeed, A. S. Abdel-khalik, and A. Senior, “Pengaruh Konfigurasi Belitan pada Enam- Parameter Mesin Induksi Fase dan Pertunjukan,” 2020.
- [23]. J. Paredes, B. Prieto, M. Satrústegui, I. Elósegui, and P. González, “Improving the Performance of a 1-MW Induction Machine by Optimally Shifting from a Three-Phase to a Six-Phase Machine Design by Rearranging the Coil Connections,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 68, no. 2, pp. 1035–1045, 2021, doi: 10.1109/TIE.2020.2969099.