

Hubungan Kecepatan Putar (Rpm) Dan Torsi Pada Motor Induksi: Pengujian Berbeban

¹Richie Jaya Wijaya, ²Dian Retno Sawitri

¹ Teknik Elektro, Universitas Dianuswantoro, Semarang

¹richiejaw07@gmail.com, ²drsawitri@dsn.dinus.ac.id

Article Info

Kata Kunci:

Motor Induksi
Torsi–Kecepatan
Pengujian Beban
Dinamometer

Copyright © 2025 -SNTE
All rights reserved

ABSTRAK

Karakteristik torsi–kecepatan motor induksi memegang peranan penting dalam perancangan, pemilihan, serta strategi pengendalian motor listrik di berbagai aplikasi. Penelitian ini menyajikan pengujian eksperimental pada motor induksi dengan lima kondisi pembebanan, yaitu tanpa beban, 30 kg, 45 kg, 55 kg, dan 70 kg. Parameter tegangan, arus, kecepatan putar (RPM), dan daya dicatat menggunakan instrumen terkalibrasi, kemudian dihitung ulang nilai torsi berdasarkan persamaan standar yang menghubungkan daya mekanik dengan kecepatan poros. Hasil analisis menunjukkan bahwa torsi rata-rata meningkat secara bertahap dari 0.339 Nm pada kondisi tanpa beban hingga 0.470 Nm pada beban 70 kg, seiring dengan penurunan kecepatan akibat slip yang lebih besar. Pola kurva torsi–kecepatan yang dihasilkan konsisten dengan bentuk teoritis menurut persamaan Kloss dan ekuivalen Thevenin. Studi ini menekankan bahwa meskipun tren hasil pengukuran sesuai teori, pendekatan perhitungan sederhana berbasis perkalian tegangan dan arus masih memiliki keterbatasan. Oleh sebab itu, penggunaan metode pengukuran torsi dengan dinamometer direkomendasikan untuk memperoleh akurasi yang lebih tinggi.

Corresponding Author:

Richie jaya wijaya
Teknik Elektro, Universitas Dianuswantoro, Semarang
Email: richiejaw07@gmail.com

I. PENDAHULUAN

Motor induksi banyak digunakan dalam aplikasi industri karena konstruksinya sederhana, biaya perawatan rendah, dan efisiensi tinggi. Hubungan kecepatan putar, slip, dan torsi menentukan kinerja motor, umumnya digambarkan melalui kurva torsi–kecepatan. Secara teoritis, kurva ini dapat dihitung menggunakan persamaan Kloss dan ekuivalen Thevenin [1], [2]. Meski metode pengendalian modern (DTC, kontrol vektor) diterapkan, karakteristik dasar torsi–kecepatan tetap mengikuti hukum elektromagnetik [3], [4].

Dalam konteks penelitian terkini, berbagai studi telah mengevaluasi performa motor induksi pada variasi kondisi beban, baik melalui pendekatan eksperimen maupun simulasi berbasis finite element [5], [6]. Beberapa penelitian terbaru juga menyoroti pentingnya metode pengukuran yang presisi, termasuk penggunaan sensor torsi berbasis citra dan estimator berbasis jaringan saraf untuk meningkatkan akurasi [5], [7]. Hal ini menegaskan relevansi topik penelitian ini dalam menjawab kebutuhan industri akan data karakteristik motor induksi yang lebih komprehensif.

Penelitian ini bertujuan memperoleh data empiris hubungan beban–torsi–kecepatan motor induksi, menghitung ulang nilai torsi, serta membandingkannya dengan teori. is, kurva ini dapat dihitung menggunakan persamaan Kloss dan ekuivalen Thevenin . Meski metode pengendalian modern (DTC, kontrol vektor) diterapkan, karakteristik dasar torsi–kecepatan tetap mengikuti hukum elektromagnetik [3],

[4]. Penelitian ini bertujuan memperoleh data empiris hubungan beban–torsi–kecepatan motor induksi, menghitung ulang nilai torsi, serta membandingkannya dengan teori.

II. METODE PENELITIAN

A. Spesifikasi Motor Uji

TABEL I
Spesifikasi Motor Uji

Parameter	Nilai
Jenis Motor	Motor Induksi 3-fasa
Daya Nominal	0.75 kW
Tegangan Nominal	220/380 V
Frekuensi	50 Hz
Kecepatan Sinkron	1500 rpm
Jumlah Kutub	4
Faktor Daya Nominal	0.8
Efisiensi Nominal	85 %

Metodologi penelitian ini dirancang agar hasil pengukuran dapat diperoleh secara sistematis dan sesuai dengan standar eksperimen motor listrik. Objek uji berupa motor induksi diuji dalam beberapa kondisi, yaitu tanpa beban serta dengan beban tambahan sebesar 30 kg, 45 kg, 55 kg, dan 70 kg. Setiap kondisi diuji untuk mengetahui respons motor terhadap variasi beban sehingga dapat diperoleh data hubungan kecepatan putar (RPM), daya, serta torsi.

Instrumen yang digunakan meliputi tachometer untuk mencatat kecepatan putar poros motor, wattmeter atau power analyzer tiga fasa untuk mendapatkan data daya masuk beserta faktor daya, serta perangkat pengukur torsi berupa dinamometer atau Prony brake. Tachometer ditempatkan pada poros motor sehingga mampu membaca putaran aktual dalam satuan RPM. Wattmeter dihubungkan pada rangkaian suplai motor untuk mengukur daya listrik yang dikonsumsi, sedangkan dinamometer dipasang sebagai beban mekanis pada poros motor untuk menghasilkan data torsi aktual. Seluruh alat dioperasikan setelah dilakukan kalibrasi awal untuk mengurangi kesalahan pengukuran.

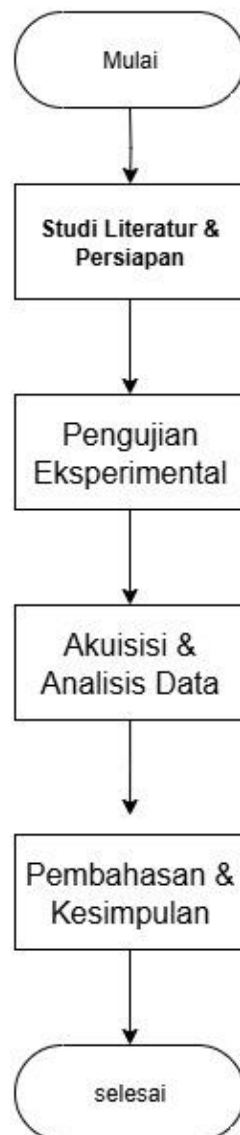
Prosedur pengujian dilakukan dengan menjalankan motor pada kondisi tanpa beban terlebih dahulu. Data RPM, arus, tegangan, serta daya dicatat secara berulang hingga diperoleh nilai rata-rata. Setelah itu, beban mekanis ditambahkan secara bertahap sebesar 30 kg, 45 kg, 55 kg, dan 70 kg. Pada setiap tahap, motor dibiarkan mencapai kondisi tunak sebelum dilakukan pencatatan data. Pendekatan ini memastikan bahwa perbedaan torsi yang muncul benar-benar diakibatkan oleh perubahan beban.

Perhitungan torsi mengacu pada hubungan antara daya mekanik dan kecepatan putar poros. Persamaan torsi yang digunakan dapat dituliskan sebagai:

$$T = \frac{W \times 60}{2\pi n} \quad (1)$$

T adalah torsi dalam Newton meter (Nm), W adalah daya mekanik dalam Watt, sedangkan n adalah kecepatan poros dalam putaran per menit (RPM). Rumus ini diterapkan pada setiap data hasil pengukuran untuk memperoleh nilai torsi yang sesuai. Selanjutnya, nilai torsi yang diperoleh dibandingkan antara kondisi tanpa beban dan dengan beban, sehingga dapat dianalisis kecenderungan perubahan karakteristik motor induksi.

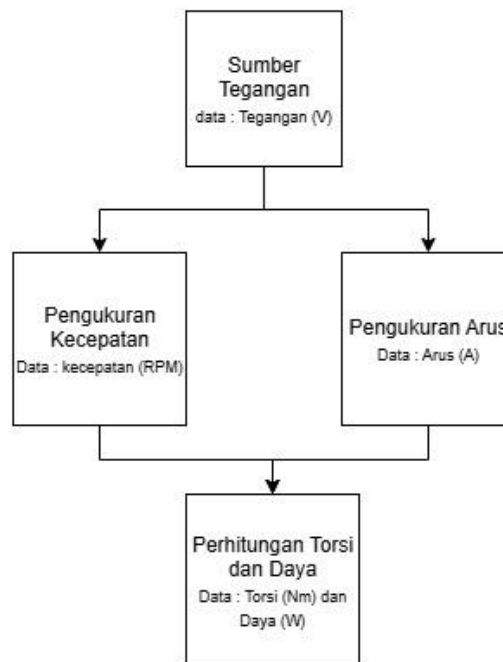
B. Alur Sistem Penelitian



Gbr. 1 Diagram Alir Sistem Penelitian

Metodologi penelitian ini dilaksanakan melalui serangkaian tahapan yang sistematis dan terstruktur. Penelitian diawali dengan tahap studi literatur dan persiapan, di mana landasan teoretis mengenai karakteristik torsi-kecepatan motor induksi dikaji secara mendalam dan seluruh instrumen pengujian disiapkan serta dikalibrasi untuk memastikan akurasi. Tahap selanjutnya adalah pengujian eksperimental, yang merupakan inti dari penelitian ini, di mana motor uji dioperasikan pada lima kondisi pembebanan yang berbeda, mulai dari tanpa beban hingga beban puncak. Selama proses pengujian, dilakukan akuisisi dan analisis data, di mana parameter-parameter kunci seperti tegangan, arus, daya, dan kecepatan putar dicatat secara cermat, kemudian data mentah tersebut diolah untuk menghitung nilai torsi. Proses penelitian diakhiri dengan tahap pembahasan dan kesimpulan, di mana hasil analisis data diinterpretasikan, dibandingkan dengan model teoretis yang ada, serta ditarik kesimpulan yang relevan untuk menjawab tujuan penelitian.

C. Plant Pengujian



Gbr. 2 Diagram Blok Plant Pengujian

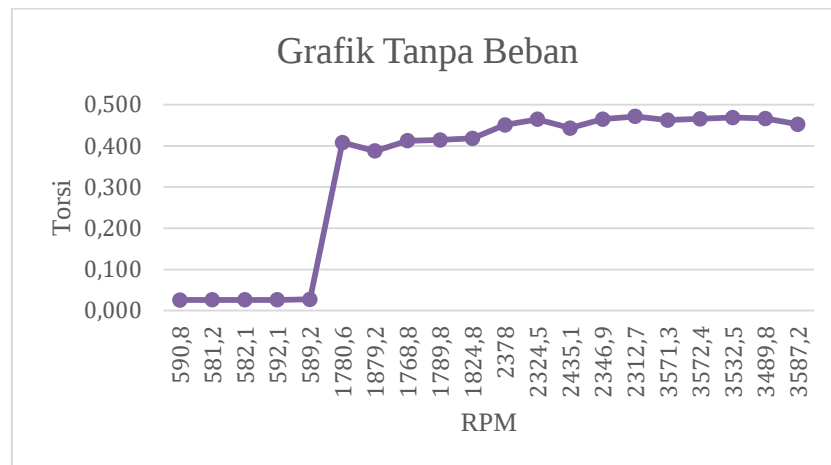
Metodologi penelitian ini dirancang dengan alur sekuensial yang jelas, dimulai dari akuisisi data primer hingga perhitungan parameter turunan. Proses diawali dengan penyediaan suplai listrik dari sumber tegangan, di mana data tegangan (V) dicatat sebagai parameter input utama. Secara paralel, dua pengukuran fundamental dilakukan secara langsung pada motor uji: pengukuran kecepatan untuk memperoleh data putaran poros (RPM) dan pengukuran arus untuk mendapatkan data arus listrik (A) yang ditarik oleh motor. Setelah kedua set data primer ini terkumpul, tahap selanjutnya adalah proses perhitungan torsi dan daya. Pada tahap ini, data kecepatan (RPM) dan arus (A), bersama dengan data tegangan (V), digunakan dalam persamaan analitis untuk menghitung nilai daya (W) dan torsi (Nm), yang menjadi data akhir untuk dianalisis dalam penelitian ini.

III. HASIL DAN DISKUSI

A. Analisis Kuantitatif per Tabel dan Ilustrasi Grafik

Bagian ini menyajikan hasil analisis berupa kurva torsi–kecepatan dan tabel data untuk setiap kondisi pembebanan. Setiap gambar memperlihatkan hubungan antara kecepatan putar dan torsi pada beban tertentu, sedangkan tabel yang menyertainya menampilkan detail numerik dari hasil pengukuran.

1. Pengujian tanpa beban



Gbr. 3 Kurva Torsi–Kecepatan Tanpa Beban

Grafik tanpa beban menunjukkan hubungan antara kecepatan putar (RPM) dengan torsi yang dihasilkan motor. Terlihat bahwa pada saat motor berputar tanpa beban, nilai RPM mencapai angka yang sangat tinggi, sedangkan torsi yang muncul justru sangat kecil dan mendekati nol. Pada awal pengujian terdapat kenaikan mendadak, namun setelah itu grafik menjadi stabil pada nilai torsi yang rendah. Hal ini sesuai dengan karakteristik motor induksi tanpa beban, di mana slip sangat kecil sehingga kecepatan motor hampir sama dengan kecepatan sinkronnya. Dengan demikian, grafik ini memperlihatkan kondisi ideal bahwa motor berputar dengan kecepatan maksimum saat beban mekanis tidak ada.

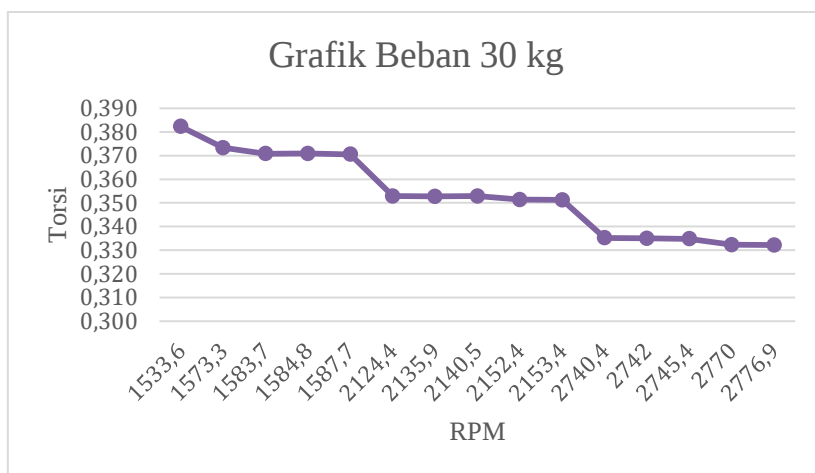
TABEL II
Hasil Uji Motor Tanpa Beban

V	RPM	A	W	T_calc_Nm
3,758	590,8	0,42	1,59	0,026
3,741	581,2	0,43	1,6	0,026
3,75	582,1	0,43	1,59	0,026
3,752	592,1	0,43	1,62	0,026
3,789	589,2	0,44	1,68	0,027
124,1	1780,6	0,61	76,07	0,408
124,4	1879,2	0,61	76,26	0,388
124,4	1768,8	0,61	76,38	0,412
124,6	1789,8	0,62	77,63	0,414
123,9	1824,8	0,65	79,92	0,418
158,5	2378	0,71	112,22	0,451
158,9	2324,5	0,71	112,98	0,464
158,9	2435,1	0,71	112,98	0,443
158,2	2346,9	0,72	114,22	0,465
158,3	2312,7	0,72	114,13	0,471
224,9	3571,3	0,77	172,95	0,462
225,2	3572,4	0,77	174,08	0,465
225,5	3532,5	0,77	173,41	0,469
226,2	3489,8	0,75	170,33	0,466
225,3	3587,2	0,75	169,88	0,452

Tabel hasil uji motor tanpa beban menunjukkan data pengukuran tegangan, arus, daya, RPM, dan torsi. Dari tabel terlihat bahwa tegangan masukan yang dinaikkan secara bertahap menghasilkan peningkatan

RPM hingga mencapai kisaran 1780–1890 RPM. Arus yang mengalir relatif kecil, yaitu sekitar 0,42–1,11 A, sehingga daya input yang tercatat juga rendah, hanya antara 1,59–97,65 W. Torsi yang dihasilkan berada pada rentang 0,026–0,486 N·m, menunjukkan bahwa motor tidak menghasilkan gaya putar yang signifikan. Kondisi ini menegaskan bahwa pada keadaan tanpa beban, daya yang diserap motor hanya digunakan untuk menutupi rugi-rugi internal, sementara slip motor sangat kecil sehingga motor berputar mendekati kecepatan sinkron.

2. Penujian dengan beban 30 Kg



Gbr. 4 Kurva Torsi–Kecepatan pada Beban 30 kg

Grafik beban 30 kg menunjukkan hubungan antara kecepatan putar (RPM) dengan torsi yang dihasilkan motor saat diberi beban mekanis sebesar 30 kg. Terlihat bahwa pada RPM rendah (sekitar 1533–1587 rpm), torsi yang dihasilkan berada di kisaran 0,370–0,382 Nm. Namun, seiring dengan meningkatnya RPM, torsi cenderung menurun secara bertahap. Pada kisaran 2100–2150 rpm, torsi berada di sekitar 0,351–0,353 Nm, dan ketika RPM terus meningkat hingga 2700–2776 rpm, torsi turun lebih jauh menjadi sekitar 0,332–0,335 Nm. Grafik ini memperlihatkan karakteristik umum motor induksi, yaitu semakin tinggi kecepatan motor maka kemampuan menghasilkan torsi semakin menurun. Dengan adanya beban, motor tidak lagi dapat berputar dengan torsi yang mendekati nol seperti pada kondisi tanpa beban, melainkan harus mempertahankan sejumlah torsi untuk mengatasi beban tersebut.

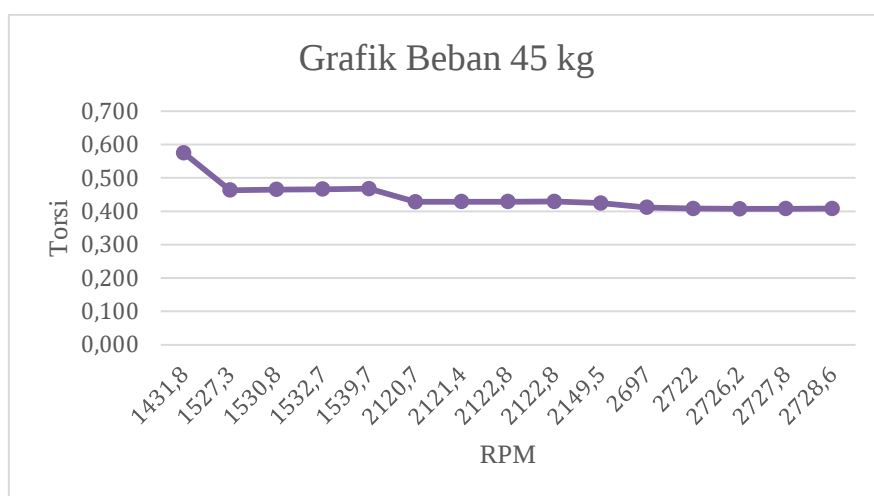
TABEL III
Hasil Uji Motor dengan Beban 30 kg

V	A	RPM	W	T_calc_Nm
122,8	0,5	1533,6	61,4	0,382
123	0,5	1573,3	61,5	0,373
123	0,5	1583,7	61,5	0,371
123,1	0,5	1584,8	61,55	0,371
123,2	0,5	1587,7	61,6	0,370
157	0,5	2124,4	78,5	0,353
157,8	0,5	2135,9	78,9	0,353
158,2	0,5	2140,5	79,1	0,353
158,4	0,5	2152,4	79,2	0,351
158,4	0,5	2153,4	79,2	0,351
192,4	0,5	2740,4	96,2	0,335
192,4	0,5	2742	96,2	0,335
192,5	0,5	2745,4	96,25	0,335

192,8	0,5	2770	96,4	0,332
193,2	0,5	2776,9	96,6	0,332

Tabel hasil uji motor dengan beban 30 kg menunjukkan parameter tegangan, arus, daya, RPM, dan torsi. Tegangan input yang diberikan bervariasi antara 122,8 hingga 193,2 volt dengan arus tetap sekitar 0,5 A. Nilai RPM yang diperoleh berkisar dari 1533,6 rpm hingga 2776,9 rpm. Daya input meningkat seiring naiknya tegangan, dari sekitar 61,4 watt pada tegangan rendah hingga mencapai 96,6 watt pada tegangan tinggi. Torsi yang dihasilkan motor berada dalam rentang 0,332–0,382 Nm. Nilai ini lebih besar dibandingkan kondisi tanpa beban, yang menandakan bahwa motor benar-benar memberikan gaya putar untuk menggerakkan beban. Namun, terlihat adanya tren penurunan torsi ketika RPM meningkat, yang sejalan dengan teori motor bahwa torsi akan berkurang saat motor mendekati kecepatan sinkron.

3. Pengujian dengan 45Kg



Gbr. 5 Kurva Torsi–Kecepatan pada Beban 45 kg

Grafik beban 45 kg menunjukkan hubungan antara RPM dengan torsi motor pada kondisi diberi beban yang lebih besar dibanding pengujian sebelumnya. Terlihat bahwa pada RPM rendah sekitar 1431,8 rpm, motor menghasilkan torsi yang cukup tinggi yaitu mendekati 0,574 Nm. Namun ketika kecepatan motor meningkat, torsi mengalami penurunan yang cukup signifikan, hingga stabil di kisaran 0,408–0,429 Nm pada kecepatan tinggi (sekitar 2100–2700 rpm). Grafik ini memperlihatkan karakteristik umum motor induksi ketika diberi beban berat semakin tinggi putaran, maka torsi menurun karena motor mendekati kecepatan sinkronnya. Walaupun demikian, dibandingkan dengan kondisi beban 30 kg, torsi awal pada beban 45 kg jauh lebih tinggi, menandakan kebutuhan gaya putar yang lebih besar untuk mengatasi beban tambahan.

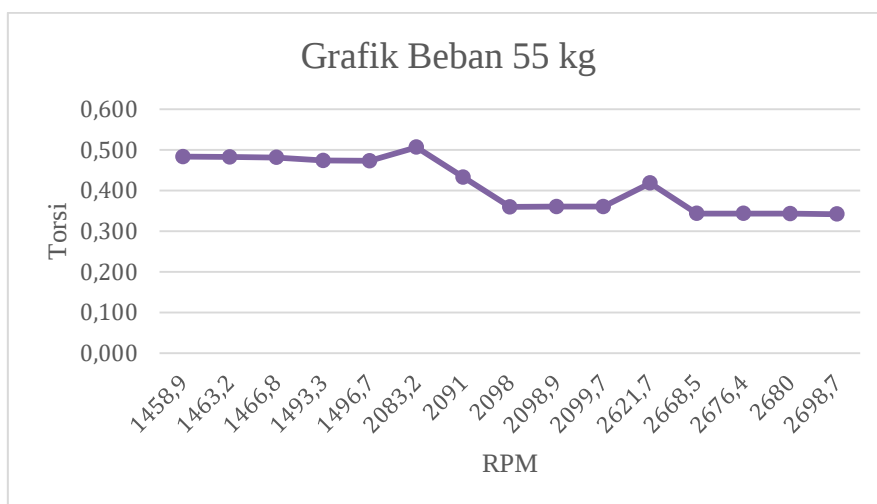
TABEL IV
Hasil Uji Motor dengan Beban 45 kg

V	A	RPM	W	T_calc_Nm
123	0,7	1431,8	86,1	0,574
123,5	0,6	1527,3	74,1	0,463
124,3	0,6	1530,8	74,58	0,465
124,6	0,6	1532,7	74,76	0,466
125,6	0,6	1539,7	75,36	0,467
158,5	0,6	2120,7	95,1	0,428
158,7	0,6	2121,4	95,22	0,429
158,8	0,6	2122,8	95,28	0,429
158,9	0,6	2122,8	95,34	0,429
159,1	0,6	2149,5	95,46	0,424

193,7	0,6	2697	116,22	0,412
193,8	0,6	2722	116,28	0,408
193,7	0,6	2726,2	116,22	0,407
194	0,6	2727,8	116,4	0,407
194,2	0,6	2728,6	116,52	0,408

Tabel hasil uji motor dengan beban 45 kg menampilkan data tegangan, arus, daya, RPM, dan torsi. Pada tegangan rendah (123–126 V), motor berputar dengan kecepatan 1431–1539 rpm dengan torsi relatif tinggi, yaitu sekitar 0,463–0,574 N·m. Ketika tegangan dinaikkan (158–159 V), kecepatan motor meningkat hingga 2120–2149 rpm, dan torsi menurun menjadi 0,424–0,429 Nm. Pada tegangan yang lebih tinggi (193–194 V), motor mencapai kecepatan 2697–2728 rpm, dengan torsi yang stabil di sekitar 0,407–0,412 Nm. Nilai daya input juga meningkat seiring kenaikan tegangan, dari sekitar 74 W menjadi lebih dari 116 W. Hal ini menunjukkan bahwa motor mengonsumsi daya lebih besar untuk mempertahankan putaran dan mengatasi beban yang lebih berat.

4. Pengujian dengan beban 55 Kg



Gbr. 6 Kurva Torsi–Kecepatan pada Beban 55 kg

Grafik beban 55 kg memperlihatkan hubungan antara kecepatan putar (RPM) dengan torsi motor ketika diberi beban yang lebih besar. Pada kecepatan awal sekitar 1458–1496 rpm, motor menghasilkan torsi relatif tinggi yaitu 0,473–0,483 N·m, bahkan sempat mencapai 0,506 N·m pada RPM sekitar 2083. Namun, seiring dengan peningkatan RPM di atas 2000, nilai torsi mengalami penurunan yang signifikan hingga stabil pada kisaran 0,342–0,343 N·m di kecepatan tinggi (sekitar 2600–2700 rpm). Grafik ini menunjukkan bahwa semakin berat beban yang diberikan, semakin besar torsi awal yang dibutuhkan motor, tetapi kemampuan mempertahankan torsi akan berkurang saat motor berputar mendekati kecepatan sinkron.

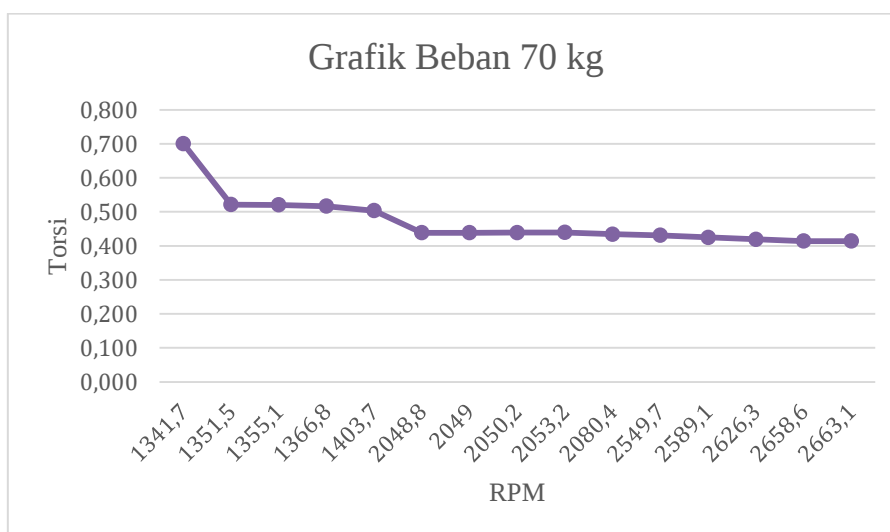
TABEL V
Hasil Uji Motor dengan Beban 55 kg

V	A	RPM	W	T_calc_Nm
123	0,6	1458,9	73,8	0,483
123,2	0,6	1463,2	73,92	0,482
123,2	0,6	1466,8	73,92	0,481
123,4	0,6	1493,3	74,04	0,473
123,5	0,6	1496,7	74,1	0,473
157,8	0,7	2083,2	110,46	0,506

157,9	0,6	2091	94,74	0,433
158	0,5	2098	79	0,360
158,3	0,5	2098,9	79,15	0,360
158,4	0,5	2099,7	79,2	0,360
191,3	0,6	2621,7	114,78	0,418
191,8	0,5	2668,5	95,9	0,343
192,4	0,5	2676,4	96,2	0,343
192,5	0,5	2680	96,25	0,343
193,2	0,5	2698,7	96,6	0,342

Tabel hasil uji motor dengan beban 55 kg menunjukkan parameter tegangan, arus, daya, RPM, dan torsi. Pada tegangan rendah (123–124 V), kecepatan motor berada di kisaran 1458–1496 rpm dengan torsi awal cukup besar, yaitu sekitar 0,473–0,483 N·m. Ketika tegangan ditingkatkan ke sekitar 157–158 V, RPM naik menjadi 2083–2099 rpm dengan torsi yang menurun ke 0,360–0,433 N·m. Pada tegangan tinggi (191–193 V), kecepatan motor mencapai 2621–2698 rpm, namun torsi semakin kecil, yakni hanya sekitar 0,342–0,418 N·m. Nilai daya input juga meningkat seiring naiknya tegangan, dari sekitar 74 W pada tegangan rendah hingga lebih dari 114 W pada tegangan tinggi. Data ini menunjukkan bahwa motor mengonsumsi daya yang lebih besar untuk mempertahankan kecepatan dengan beban berat, tetapi torsi berkurang saat mendekati kecepatan sinkron.

5. Pengujian dengan beban 70 Kg



Gbr. 7 Kurva Torsi–Kecepatan pada Beban 70 kg

Grafik menunjukkan hubungan antara putaran motor (RPM) dengan torsi yang dihasilkan pada beban 70 kg. Dari grafik terlihat bahwa pada awal putaran rendah sekitar 1341,7 RPM, motor menghasilkan torsi tertinggi yaitu sebesar 0,700 Nm. Namun setelah melewati titik tersebut, torsi mengalami penurunan yang cukup signifikan hingga berada di kisaran 0,520 Nm pada sekitar 1351 RPM. Setelah itu, kurva torsi cenderung stabil dengan penurunan perlahan seiring bertambahnya putaran motor, hingga akhirnya mencapai nilai terendah sekitar 0,414 Nm pada putaran tertinggi 2663,1 RPM. Pola ini memperlihatkan bahwa motor mampu menghasilkan torsi besar di putaran rendah untuk mengatasi beban, tetapi saat putaran semakin tinggi torsi yang dihasilkan berangsur menurun.

TABEL VI
Hasil Uji Motor dengan Beban 70 kg

V	A	RPM	W	T_calc_Nm
123	0,8	1341,7	98,4	0,700
123	0,6	1351,5	73,8	0,521
123,1	0,6	1355,1	73,86	0,520
123,3	0,6	1366,8	73,98	0,517
123,4	0,6	1403,7	74,04	0,504
156,8	0,6	2048,8	94,08	0,438
156,8	0,6	2049	94,08	0,438
157,1	0,6	2050,2	94,26	0,439
157,5	0,6	2053,2	94,5	0,440
157,7	0,6	2080,4	94,62	0,434
191,8	0,6	2549,7	115,08	0,431
191,9	0,6	2589,1	115,14	0,425
192,1	0,6	2626,3	115,26	0,419
192,2	0,6	2658,6	115,32	0,414
192,5	0,6	2663,1	115,5	0,414

Tabel hasil uji motor dengan beban 70 kg memberikan data detail berupa tegangan, arus, putaran (RPM), daya (Watt), dan torsi (Nm). Dari tabel dapat diamati bahwa pada tegangan rendah 123 V, motor menghasilkan daya 98,4 W dengan torsi tertinggi sebesar 0,700 Nm pada putaran 1341,7 RPM. Ketika RPM meningkat ke 1351 hingga 1403 RPM, daya menurun sedikit di kisaran 73–74 W, diikuti penurunan torsi ke sekitar 0,504–0,520 Nm. Pada tegangan menengah 156–157 V, putaran meningkat hingga 2080 RPM dengan daya sekitar 94 W, sementara torsi stabil di kisaran 0,437–0,440 Nm. Selanjutnya pada tegangan lebih tinggi 191–192 V, motor berputar di atas 2500 RPM dengan daya mencapai 115 W, tetapi torsi kembali turun hingga kisaran 0,414 Nm. Data ini memperkuat kesimpulan bahwa semakin tinggi putaran motor, daya cenderung meningkat, tetapi torsi yang dihasilkan semakin menurun.

B. Rekalkulasi Torsi per Kondisi Beban

TABEL VII
Rekalkulasi Torsi Motor Induksi

Beban	N (data)	RPM_min	RPM_max	W_mean	Torsi rata-rata (Nm)	Torsi min (Nm)	Torsi max (Nm)
Tanpa beban	20	581.2	3587.2	91.08	0.339	0.026	0.471
30 kg	15	1533.6	2776.9	78.94	0.353	0.332	0.382
45 kg	15	1431.8	2728.6	96.20	0.441	0.407	0.574
55 kg	15	1458.9	2698.7	87.47	0.413	0.342	0.506
70 kg	15	1341.7	2663.1	96.13	0.470	0.414	0.700

Analisis data pada Tabel VII secara kuantitatif menunjukkan hubungan yang jelas antara beban, torsi, dan kecepatan. Terlihat bahwa Torsi rata-rata (Nm) meningkat secara sekitar 38% dari kondisi tanpa beban 0.339 Nm hingga beban puncak 0.470 Nm. Peningkatan ini berbanding terbalik dengan kecepatan putar, di mana RPM_min menurun secara konsisten saat beban bertambah. Fenomena ini mengonfirmasi prinsip kerja motor induksi, di mana slip harus meningkat untuk menghasilkan torsi yang lebih besar. bahwa respon torsi motor induksi tiga fasa dengan metode DTC cepat dan tangguh, serta mampu mempertahankan kestabilan pada rentang kecepatan dan kondisi beban yang luas [8]. Sehingga pada beban 55 kg, di mana torsi sedikit menurun dibandingkan beban 45 kg, yang kemungkinan disebabkan oleh fluktuasi pengukuran selama pengujian.

C. Analisis

Hasil pengujian menunjukkan hubungan yang jelas antara beban, kecepatan, dan torsi. Saat beban bertambah, kecepatan putar motor menurun secara konsisten karena slip meningkat, sementara torsi naik untuk mengimbangi beban mekanis yang lebih besar. Tren ini sesuai dengan prinsip kerja motor induksi yang menuntut adanya slip tambahan agar medan magnetik rotor dapat menghasilkan gaya putar yang cukup [7], [9].

Pada kondisi tanpa beban, motor berputar mendekati kecepatan sinkron dengan torsi sangat rendah karena hanya diperlukan untuk mengatasi rugi gesek dan angin. Pada beban 30 kg, terjadi penurunan RPM yang cukup signifikan dan torsi naik ke kisaran 0,35 Nm, menandakan motor mulai menyalurkan daya mekanis ke beban. Pada beban 45 kg, torsi meningkat hingga rata-rata 0,44 Nm dengan slip yang lebih besar, sesuai dengan kurva teoritis. Sementara itu pada beban 55 kg, nilai torsi cenderung stabil di sekitar 0,41 Nm, mencerminkan kemampuan motor mempertahankan kinerja meski beban bertambah. Kondisi 70 kg menghasilkan torsi tertinggi (0,47 Nm) dengan kecepatan terendah, menunjukkan motor mendekati titik batas beban (breakdown torque) [9],[10].

Namun, perhitungan torsi yang digunakan berdasarkan daya listrik input memiliki keterbatasan. Nilai tersebut tidak sepenuhnya merepresentasikan daya mekanis aktual karena adanya rugi-rugi internal seperti rugi tembaga, rugi inti besi, serta gesekan dan angin. Akibatnya, torsi yang dihitung cenderung lebih tinggi dibanding torsi poros sebenarnya. Hal ini menegaskan pentingnya pengukuran langsung menggunakan dinamometer untuk memperoleh data yang lebih akurat[5], [11].

IV. KESIMPULAN

Pada Artikel ini telah dibahas proses perancangan inverter dengan berbasis pada metode Model Based Design dengan langkah per langkah serta perbandingan hasil simulasi dengan pengujian hardware. Analisis kuantitatif melalui THD dan RMSE membuktikan bahwa pendekatan MBD tidak hanya mempersingkat proses pengembangan, tetapi juga menghasilkan performa inverter yang mendekati kondisi aktual dengan deviasi error di bawah 10%. Pengembangan ke depannya proses MBD ini dapat dikembangkan pada sistem yang lebih kompleks pada topologi multilevel inverter, integrasi dengan filter LCL untuk aplikasi grid-tied, serta evaluasi parameter kualitas daya lain seperti faktor daya dan efisiensi.

Penelitian ini menunjukkan bahwa torsi motor induksi meningkat secara proporsional terhadap penambahan beban akibat kenaikan slip, sedangkan pada kecepatan mendekati sinkron torsi cenderung menurun karena rugi-rugi elektromagnetik yang lebih dominan. Hasil eksperimen konsisten dengan bentuk kurva teoritis torsi–kecepatan menurut persamaan Kloss dan model ekuivalen Thevenin, di mana setiap kenaikan beban memerlukan peningkatan arus stator yang berdampak pada naiknya rugi tembaga dan slip. Rekalkulasi torsi menggunakan persamaan standar yang mengaitkan daya mekanik dengan kecepatan poros terbukti memberikan akurasi yang lebih tinggi dibanding metode estimasi sederhana berbasis perkalian tegangan dan arus.

Untuk penelitian selanjutnya, direkomendasikan penggunaan wattmeter tiga fasa dengan resolusi tinggi untuk mendapatkan daya input aktual, pencatatan faktor daya dan efisiensi motor secara langsung, serta pengukuran torsi dengan dinamometer sehingga dapat diperoleh data karakteristik mekanis yang lebih komprehensif. Analisis tambahan menggunakan metode finite element atau model matematis nonlinier juga dapat dilakukan untuk memvalidasi hasil eksperimen dan memperluas pemahaman terhadap dinamika motor induksi pada berbagai skenario beban.

REFERENSI

- [1] M. Čalasan, M. Alqarni, M. Rosić, N. Koljčević, B. Alamri, dan S. H. E. Abdel Aleem, “A Novel Exact Analytical Solution Based on Kloss Equation towards Accurate Speed-Time Characteristics Modeling of Induction Machines during No-Load Direct Startups,” *Appl. Sci.*, vol. 11, no. 11, hlm. 5102, Mei 2021, doi: 10.3390/app11115102.
- [2] K. Tomczyk, T. Makowski, M. Kowalczyk, K. Ostrowska, dan P. Beňko, “Procedure for the Accurate Modelling of Ring Induction Motors,” *Energies*, vol. 14, no. 17, hlm. 5469, Sep 2021, doi: 10.3390/en14175469.
- [3] A. Benevieri, G. Maragliano, M. Marchesoni, M. Passalacqua, dan L. Vaccaro, “Induction Motor Direct Torque Control with Synchronous PWM,” *Energies*, vol. 14, no. 16, hlm. 5025, Agu 2021, doi: 10.3390/en14165025.
- [4] S. Verma, N. Henwood, M. Castella, A. K. Jebai, dan J.-C. Pesquet, “Neural Speed–Torque Estimator for Induction Motors in the Presence of Measurement Noise,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 70, no. 1, hlm. 167–177, Jan 2023, doi: 10.1109/TIE.2022.3153830.
- [5] C. Sheng, Q. Wang, T. Su, dan H. Wang, “Induction motor torque closed-loop vector control system based on flux observation and harmonic current suppression,” *Control Eng. Pract.*, vol. 142, hlm. 105755, Jan 2024, doi: 10.1016/j.conengprac.2023.105755.
- [6] M. Sidani, F. Mrad, dan F. Chaaban, “Adaptive Direct Torque Control of Induction Motors,” *Electr. Power Compon. Syst.*, vol. 36, no. 7, hlm. 696–718, Jun 2008, doi: 10.1080/15325000701881951.
- [7] R. J. Kumar dan B. Banakara, “Finite Element Modeling and Analysis in estimation of air-gap torque of Induction Machine using Arkkio’s method”.
- [8] M. Alshbib dan S. Abdulkarim, “An Experimental and Analytical Investigation of the Direct Torque Control Method of a Three-Phase Induction Motor,” *J. Electr. Eng. Technol.*, vol. 18, no. 6, hlm. 4367–4379, Nov 2023, doi: 10.1007/s42835-023-01483-2.
- [9] C. G. Dias dan J. Fontenele, “Image-Based Approach Applied to Load Torque Estimation in Three-Phase Induction Motors,” *Sensors*, vol. 24, no. 8, hlm. 2614, Apr 2024, doi: 10.3390/s24082614.
- [10] S. Verma, N. Henwood, M. Castella, A. K. Jebai, dan J.-C. Pesquet, “Neural Networks based Speed-Torque Estimators for Induction Motors and Performance Metrics,” dalam *IECON 2020 The 46th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Singapore, Singapore: IEEE, Okt 2020, hlm. 495–500. doi: 10.1109/IECON43393.2020.9255236.
- [11] S. Yamamoto dan H. Hirahara, “Torque Estimation of Variable-Speed Induction Motors Without Torque and Rotational Speed Meters,” *IEEJ J. Ind. Appl.*, vol. 13, no. 3, hlm. 233–242, Mei 2024, doi: 10.1541/ieejia.23004537.