

Training Kit Kendali Motor Induksi berbasis Inverter Tiga Fasa: Analisis Uji Kelayakan

Doni Tri Putra Yanto^{*1}, Hastuti², Andrian³, Putri Ani⁴, Nizwardi Jalinus⁵, Ridwan⁶

¹²³⁴⁶Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Padang

³Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Padang

^{*}Corresponding author, donitriputra@ft.unp.ac.id

Abstrak

Penelitian ini membahas tentang analisis uji kelayakan terhadap perangkat Training Kit Kendali Motor Induksi (TKKMI) berbasis inverter tiga fasa yang dilakukan sebelum dapat digunakan dan diterapkan di laboratorium sebagai media atau peralatan praktikum pada proses pembelajaran Praktikum Kendali Motor Listrik. Analisis uji kelayakan ini dilakukan untuk memastikan bahwa perangkat telah memenuhi kriteria sebagai peralatan praktikum atau media pembelajaran praktikum serta dapat berfungsi dengan baik sesuai dengan fungsinya. Analisis uji kelayakan merupakan aktivitas pengujian di laboratorium yang mencakup pengujian aspek keamanan, aspek parameter kelistrikan, serta unjuk kerja perangkat. Hasil penelitian menunjukkan bahwa perangkat TKKMI berbasis inverter tiga fasa telah memenuhi kriteria dan standar sebagai media atau peralatan praktikum pada proses pembelajaran praktikum kendali motor listrik untuk mahasiswa Pendidikan vokasi bidang studi D3 teknik listrik. Dengan demikian maka dapat disimpulkan bahwa perangkat TKKMI telah layak untuk digunakan sebagai peralatan praktikum di laboratorium untuk proses pembelajaran praktikum kendali motor induksi 3 fasa.

Abstract

This study discusses the analysis of the feasibility test of the three-phase inverter-based Induction Motor Control Training Kit (TKKMI) which is carried out before it can be used and applied in the laboratory as a medium or practicum equipment in the learning process of the Electric Motor Control Practicum. This feasibility test analysis is carried out to ensure that the device meets the criteria as practicum equipment or practicum learning media and can function properly according to its function. Feasibility test analysis is a testing activity in a laboratory that includes testing the safety aspects, aspects of electrical parameters, as well as device performance. The results showed that the TKKMI device based on a three-phase inverter met the criteria and standards as a media or practicum equipment in the learning process of electric motor control practicum for D3 electrical engineering vocational education students. Thus, it can be concluded that the TKKMI device is feasible to be used as practicum equipment in the laboratory for the learning process of the 3-phase induction motor control practicum.

INFO.

Info. Artikel:

No. 345

Received. January, 17, 2023

Revised. February, 02, 2023

Accepted. March, 20, 2023

Page. 91 – 104

Kata kunci:

- ✓ Analisis Uji Kelayakan
- ✓ Training Kit Kendali Motor Induksi
- ✓ Inverter Tiga Fasa

PENDAHULUAN

Ilmu Pengetahuan dan Teknologi pada bidang sistem tenaga listrik telah mengalami perkembangan dan perubahan yang sangat pesat. Hal ini dapat terlihat dengan munculnya teknologi kendali mesin – mesin listrik yang terbaru. Suatu sistem tenaga listrik dapat dikatakan baik apabila memiliki efisiensi tenaga listrik yang tinggi [1], [2]. Motor-motor listrik memiliki kegunaan yang sangat penting di dalam dunia perindustrian. Tanpa adanya motor-motor listrik yang handal, maka suatu industri akan mendapatkan permasalahan dalam produksi dan operasionalnya. Hampir semua sector di dunia industry telah memanfaatkan motor-motor listrik dalam operasionalnya. Banyak jenis motor listrik yang telah diterapkan, namun salah satu yang umum digunakan dan diaplikasikan di dunia industry adalah motor induksi [3], [4]. Pada motor-motor listrik, terdapat beberapa faktor yang dapat

menyebabkan gangguan dan juga kerusakan baik dari dalam ataupun dari luar motor yang membuat suatu sistem tenaga listrik dalam penyediaan energi listrik menjadi terganggu.

Motor induksi merupakan jenis motor listrik yang membutuhkan suplai listrik arus bolak balik (AC) yang pada umumnya banyak digunakan sebagai tenaga penggerak untuk mesin-mesin yang digunakan di dunia industri [5], [6]. Motor induksi mempunyai banyak kelebihan jika dibandingkan dengan beberapa jenis motor listrik lainnya. Kelebihan dari motor induksi jika dibandingkan dengan jenis motor lainnya diantaranya adalah (1) konstruksi yang sederhana [7]; (2) tindakan perawatan yang relative mudah [8], [9]; (3) lebih ekonomis karena harga dipasaran yang relatif murah [8]; dan (4) memiliki efisiensi yang relative lebih tinggi jika dibandingkan dengan motor arus searah (DC) [8], [9]. Akan tetapi, dibalik beberapa kelebihan yang dimiliki oleh motor induksi, motor jenis ini juga memiliki beberapa kelemahan dan kekurangan diantaranya adalah (1) arus awal atau arus *start* yang relative besar yaitu sekitar 3 sampai 8 kali dari besar arus nominal; dan (2) putarannya yang relative konstan sehingga membutuhkan system kendali kecepatan yang sedikit kompleks [7], [8], [10], [11]. Ketika diterapkan di dunia industry, maka motor listrik sebagai penggerak akan mendapatkan jenis beban yang tidak konstan atau bervariasi sehingga dibutuhkan system kendali kecepatan putaran motor yang dapat diatur dan berubah sesuai dengan kebutuhan dan ketetapan yang direncanakan. Untuk itu system kendali motor induksi ini terus mengalami perkembangan dalam rangka meningkatkan efisiensi dan menyesuaikan dengan perkembangan kebutuhan yang ada di dunia industry [11], [12]. Namun pada dasarnya prinsip kendali tetap pada pengaturan tegangan dan frekuensi input. Perkembangan yang terjadi lebih kepada teknologi peralatan yang digunakan.

Sistem kendali motor listrik jika ditinjau dari perkembangannya secara garis besar dapat dibagi menjadi tiga jenis utama yaitu kendali motor listrik secara manual, kendali motor listrik secara semi-otomatis, dan kendali motor listrik secara otomatis [13], [14]. Karakteristik kontrol manual adalah motor dikontrol langsung dengan tangan, maksudnya menjalankan dan menghentikan motor hanya memakai peralatan start dan stop saja dan peralatan kontrolnya ditempatkan pada peralatan mesin tersebut. operator harus pergi keposisi pengontrol untuk memulai perubahan apapun dalam status sistem control [15], [16]. Kontrol semi otomatis adalah Sistem pengontrolan yang menggunakan kontaktor magnet dan tombol tekan yang dilengkapi dengan kontrol perlindungan (*protection*), pada sistem pengontrolan ini pengendalian pertama tetap dilakukan dengan tangan (*start/stop*), dan pelayanan atau penyaluran tenaga ke motornya dihubungkan melalui kontaktor magnet [17], [18]. Sedangkan untuk kendali motor listrik otomatis merupakan sistem pengontrolan motor listrik yang dikontrol oleh satu atau lebih alat pengontrol otomatis *start* dan *stop* bekerja secara otomatis dengan alat bantu kontrol, misalnya saklar tekan batas (*limit switch*), saklar penunda waktu saklar apung, saklar *thermis* dan sebagainya [15], [19], [20]. Kontrol otomatis banyak dijumpai di industri dalam instalasi mesin produksi. Ketika kontrol motor tidak lagi sekedar *ON/OFF* saja dan kebutuhan untuk mengatur kecepatan motor semakin meningkat maka pengendalian dengan menggunakan kontaktor sudah mulai banyak digantikan dengan sistem otomatis yaitu menggunakan teknologi elektronika daya seperti inverter. Inverter merupakan suatu alat yang memiliki sebuah rangkaian yang berfungsi sebagai pengubah tegangan searah (DC) menjadi tegangan bolak-balik (AC) [21], [22]. Dengan memanfaatkan rangkaian pengendali komponen *switching* maka tegangan dan frekuensi keluaran dari inverter dapat dikendalikan secara otomatis sehingga perubahan tegangan dan frekuensi tersebut dapat mengendalikan kecepatan dan arah putaran motor induksi tiga fasa.

Pemanfaatan teknologi inverter untuk kendali motor induksi ini dikenal dengan istilah *Variable Frequency Drive* (VFD). Perangkat VFD ini tersedia di pasar elektronik dan listrik mulai dari aplikasi terkait motor kecil hingga motor induksi daya tinggi. Rangkaian VFD terdiri dari tiga bagian yaitu Bagian penyearah (*rectifier*), Bagian filter, dan Bagian *switching* atau *inverter*. VFD merupakan solusi untuk system kendali putaran motor sesuai bebannya atau sesuai nilai yang kita inginkan. Secara sederhana untuk drive AC [20], [22]. *inverter* akan mengubah AC ke DC yang kemudian diatur dengan suatu teknik penyaklaran '*switching*' mengubah DC menjadi tegangan dan frekuensi keluaran AC yang bervariasi.

Perkembangan sistem kendali motor listrik yang diterapkan di dalam dunia industri tersebut menuntut mahasiswa pada bidang yang relevan untuk dapat memahami dan mempelajari konsep,

prinsip kerja, dan penggunaan sistem kendali tersebut sehingga pengetahuan yang didapatkan selama proses pembelajaran adaptif dengan perkembangan yang terjadi. Salah bidang yang relevand alam dunia Pendidikan adalah mahasiswa Pendidikan vokasi bidang teknik listrik [23], [24]. System kendali motor listrik merupakan salah satu materi yang harus dikuasai oleh baik secara teori maupun praktik, sehingga nantinya setelah lulus, mereka dapat segera beradaptasi dengan perkembangan teknologi dan kebutuhan yang terjadi di dunia industri. Akan tetapi, agar tujuan dari pelaksanaan pembelajaran tersebut dapat tercapai, maka dibutuhkan suatu peraltan praktikum atau media pembelajaran praktikum yang juga adaptif dengan perkembangan system kendali motor listrik yang terjadi [25]–[27].

Peran Media pembelajaran dalam pelaksanaan proses pembelajaran praktikum sangatlah penting. Hal ini dikarenakan media pembelajaran merupakan salah satu unsur yang sangat penting dalam mempengaruhi pelaksanaan proses pembelajaran praktikum terutama dalam mencapai tujuannya hingga menjadi optimal, Terutama untuk proses pembelajaran yang membutuhkan pengalaman langsung untuk menggunakan peralatan-peralatan yang akan dipelajari [28], [29]. Praktikum Kendali Motor Listrik merupakan salah satu proses pembelajaran diikuti oleh setiap mahasiswa Program Studi Pendidikan Vokasi Teknik Listrik, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Padang. Proses pembelajaran ini membutuhkan proses pembelajaran praktikum langsung sehingga mahasiswa mendapatkan pengalaman untuk menguji dan membuktikan teori yang berkaitan dengan sistem kendali kecepatan dan arah putaran motor induksi tiga fasa[30]–[32]. Untuk mewujudkan proses pembelajaran yang optimal maka dibutuhkan peralatanatau media pembelajaran yang bisa digunakan sebagai media pembelajaran praktikum mahasiswa dan mampu mengakomodasi materi sistem kendali motor induksi tiga fasa. Hal inilah yang menjadi latar belakang dikembangkannya perangkat TTKMI berbasis inverter 3 fasa yang digunakan sebagai media pembelajaran praktikum pada proses pembelajaran praktikum system kendali motor listrik[33]. Sebelum dapat digunakan sebagai peralatan atau media pembelajaran praktikum, perangkat TTKMI yang dikembangkan ini harus melalui beberapa proses pengujian. Diantaranya adalah uji kelayakan yang bertujuan untuk memastikan bahwa perangkat TTKMI yang dikembangkan telah memenuhi kriteria dan standar sebagai peralatan atau media pembelajaran praktikum [28], [32].

METODE PENELITIAN

Analisis uji kelayakan terhadap perangkat TTKMI yang dikembangkan dilaksanakan dalam dua tahap secara berurutan yaitu uji parameter kelistrikan komponen dan uji unjuk kerja rangkaian [34], [35]. Kedua tahap ini dilakukan secara berurutan dan dilakukan pada tingkat pengujian laboratorium. Pengujian ini dilakukan untuk memastikan bahwa tidak terdapat permasalahan teknis pada perangkat, dan perangkat dapat beroperasi sesuai dengan fungsinya.

Uji Parameter Kelistrikan Perangkat TTKMI

Uji parameter ini dilakukan dengan cara mengukur parameter-parameter kelistrikan pada setiap komponen dan rangkaian yang terpasang pada perangkat TTKMI secara keseluruhan. Hasil pengukuran kemudian disesuaikan dan dibandingkan dengan datasheet komponen. Perangkat TTKMI ini secara keseluruhan menggunakan supali listrik 3 fasa. Oleh karena itu, maka dibutuhkan pengukuran parameter kelistrikan berupa tegangan fasa-fasa atau biasa disebut dengan tegangan line (V_L) dan tegangan fasa-netral atau biasa disebut dengan tegangan fase (V_F). Selain pengukuran terhadap parameter tegangan, parameter lain yang juga diukur adalah batas kemampuan maksimum arus yang dapat dialirkan pada perangkat TTKMI yang secara bersamaan memastikan komponen proteksi yang terpasang pada perangkat TTKMI tersebut telah memenuhi syarat keandalan.

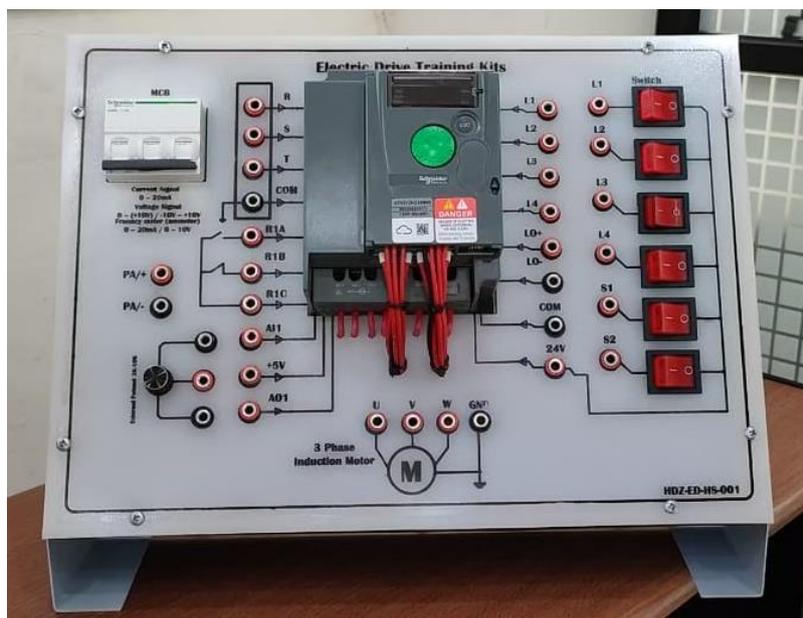
Uji Unjuk Kerja Rangkaian

Pengujian ini merupakan kegiatan pengujian terhadap kinerja perangkat TTKMI secara keseluruhan. Sesuai dengan dasar pengembangannya, perangkat TTKMI ini dikembangkan untuk memenuhi fungsi sebagai kendali motor listrik induksi 3 fasa dengan memanfaatkan teknologi inverter

3 fasa. Untuk itu, pada uji unjuk kerja rangkaian ini akan dilakukan dengan mengoperasikan perangkat TKKMI untuk mengendalikan kecepatan putaran motor induksi 3 fasa. Meskipun banyak pilihan mode pengoperasian dari perangkat TKKMI ini, namun yang akan digunakan dalam uji unjuk kinerja ini adalah kendali dengan *Panel Mode*. *Panel Mode* merupakan mode kendali menggunakan panel yang tersedia pada perangkat TKKMI khususnya pada komponen VFD yang digunakan. Dengan *set point* frekuensi, kecepatan putaran motor induksi 3 fasa akan dilakukan dalam beberapa *set point*, setiap *set point* tersebut akan dilakukan pengukuran. Hasil pengukuran kemudian dibandingkan dengan data yang ditampilkan melalui jendela monitor perangkat TKKMI [19], [33]. Apabila hasil unjuk kinerja menunjukkan bahwa perangkat dapat beroperasi dan berfungsi dengan baik dan sesuai dengan fungsinya yaitu mengendalikan kecepatan putaran motor, maka perangkat TKKMI telah memenuhi standar dan kriteria sebagai peralatan laboratorium atau sebagai media pembelajaran praktikum di laboratorium.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Tujuan dari penelitian ini adalah mendapatkan hasil analisis uji kelayakan dari perangkat TKKMI yang dikembangkan. Hasil analisis uji kelayakan ini dibutuhkan untuk memastikan perangkat yang dikembangkan telah memenuhi standar dan kriteria sebagai peralatan praktikum di laboratorium. Perangkat TKKMI yang dikembangkan ini, telah didesain dan dikembangkan berdasarkan kebutuhan dalam pelaksanaan proses pembelajaran praktikum kendali motor listrik untuk mahasiswa Pendidikan vokasi program studi teknik listrik. Perangkat TKKMI yang dikembangkan pada penelitian ini disajikan pada gambar 1.



Gambar 1. Perangkat TKKMI berbasis Inverter 3 Fasa

Uji Parameter Kelistrikan

Pengujian parameter kelistrikan dilakukan dengan cara mengukur masing-masing keluaran sumber 3 fasa yang digunakan untuk perangkat TKKMI yang dikembangkan pada penelitian ini. parameter yang menjadi acuan untuk diukur adalah tegangan dan arus maksimum pada perangkat TKKMI tersebut. Hasil pengukuran parameter kelistrikan perangkat TKKMI berbasis inverter tiga fasa ini disajikan pada tabel 1.

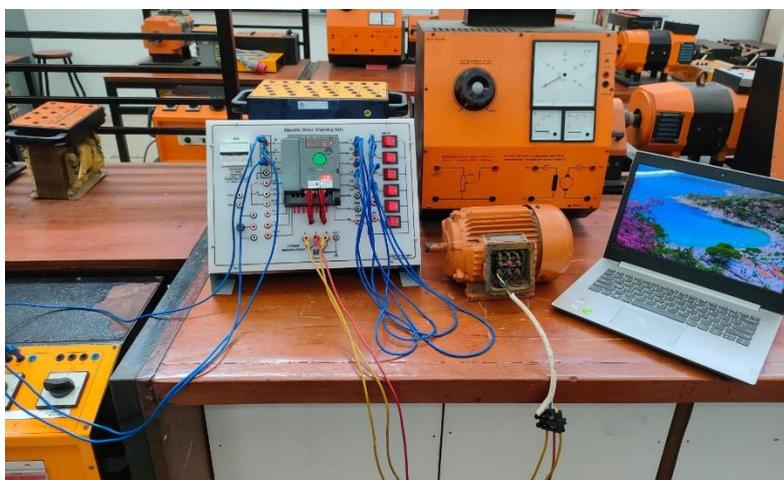
Tabel 1. Hasil Pengukuran Parameter Kelistrikan

Urutan Fasa	Tegangan		Arus Maksimum (Ampere)
	Standar (Volt)	Pngukuran (Volt)	
R - N	220	219	3,9
S - N	220	221	
T - N	220	220	
R - S	380	381	
S - T	380	381	
T - R	380	380	

Hasil pengukuran parameter kelsitrikan perangkat TTKMI pada tabel 1 menunjukkan bahwa parameter kelistrikan untuk pernagkat TTKMI berbasis inverter 3 fasa untuk kendali kecepatan moto induksi tiga fasa dalam keadaan normal dan sesuai dengan tegangan standar yang diharafkan. Walaupun terdapat beberapa perbedaan antara hasil pengukuran dengan standar. Namun, perbedaan tersebut tidak signifikan dan masih dibawah batas toleransi sebesar $\pm 5\%$. Seperti tegangan RN yang seharusnya 220 namun yang terukur adalah 221 volt. Walaupun terdapat selish 1 volt jika dibandingkan tegangan normal atau standar peralatan. Akan tetapi, angka tersebut masih berada pada taraf normal [16], [19]. Dan masih aman untuk digunakan pada saat pengujian rangkaian serta hasil pengukuran yang ditunjukkan juga masih tetap presisi untuk digunakan sebagai peralatan atau media pembelajaran praktkum di laboratorium.

Unjuk Kerja Rangkaian

Pengujian ini merupakan kegaitan pengujian terhadap kinerja perangkat TTKMI secara keseluruhan. Sesuai dengan dasar pengembangannya, perangkat TTKMI ini dikembangkan untuk memenuhi fungsi sebagai kendali motor listrik induksi 3 fasa dengan memanfaatkan teknologi inverter 3 fasa. Untuk itu, pada uji unjuk kerja rangkaian ini akan dilakukan dengan megoperasikan perangkat TTKMI untuk mengendalikan kecepatan putaran motor induksi 3 fasa. Meskipun banyak pilihan mode pengoperasian dari perangkat TTKMI ini, namun yang akan digunakan dalam uji unjuk kinerja ini adalah kendali dengan *Panel Mode*. *Panel Mode* merupakan mode kendali menggunakan panel yang tersedia pada perangkat TTKMI khususnya pada komponen VFD yang digunakan. Dengan *set point* frekkuensi, kecepatan putaran motor induksi 3 fasa akan dilakukan dalam beberapa variasi kecepatan. Set pon di atur dari 0 hingga 50 Hz dengan peninnngkatan 5 Hz. Gambar rangkaian unjuk kerja rangkaian disajikan pada gambar 2.



Gambar 2. Rangkaian Percobaan Uji Unjuk Kerja Perangkat TTKMI

Set Point 5 Hz

Pada uji coba ini, frekuensi diatur sebesar 5 Hz, pengaturan langsung dilakukan pada panel VFD yang digunakan pada perangkat TKKMI. Frekuensi 5Hz ini dijadikan *Set Point* atau referensi pengaturan kecepatan. Ketika TKKMI dioperasikan kemudian dilakukan pengukuran kecepatan putaran motor (rpm), arus motor (I_m) dan tegangan motor. Berdasarkan hasil uji coba ini didapatkan kecepatan putaran motor sebesar 162 rpm, arus motor 0,5A dan tegangan motor sebesar 45V. Gambar pengujian dan penunjukan alat ukur disajikan pada gambar 3.



Gambar 3. Hasil Pengukuran pada Set Point 5 Hz

Set Point 10 Hz

Pada uji coba ini, frekuensi diatur sebesar 10 Hz, pengaturan langsung dilakukan pada panel VFD yang digunakan pada perangkat TKKMI. Frekuensi 10 Hz ini dijadikan *Set Point* atau referensi pengaturan kecepatan. Ketika TKKMI dioperasikan kemudian dilakukan pengukuran kecepatan putaran motor (rpm), arus motor (I_m) dan tegangan motor. Berdasarkan hasil uji coba ini didapatkan kecepatan putaran motor sebesar 303 rpm, arus motor 0,5A dan tegangan motor sebesar 80 V. Gambar pengujian dan penunjukan alat ukur disajikan pada gambar 4.



Gambar 4. Hasil Pengukuran pada Set Point 10 Hz

Set Point 15 Hz

Pada uji coba ini, frekuensi diatur sebesar 15 Hz, pengaturan langsung dilakukan pada panel VFD yang digunakan pada perangkat TKKMI. Frekuensi 15 Hz ini dijadikan *Set Point* atau referensi pengaturan kecepatan. Ketika TKKMI dioperasikan kemudian dilakukan pengukuran kecepatan

putaran motor (rpm), arus motor (I_m) dan tegangan motor. Berdasarkan hasil uji coba ini didapatkan kecepatan putaran motor sebesar 461 rpm, arus motor 0,5A dan tegangan motor sebesar 117 V. Gambar pengujian dan penunjukan alat ukur disajikan pada gambar 5.



Gambar 5. Hasil Pengukuran pada *Set Point* 15 Hz

Set Point 20 Hz

Pada uji coba ini, frekuensi diatur sebesar 20 Hz, pengaturan langsung dilakukan pada panel VFD yang digunakan pada perangkat TKKMI. Frekuensi 20 Hz ini dijadikan *Set Point* atau referensi pengaturan kecepatan. Ketika TKKMI dioperasikan kemudian dilakukan pengukuran kecepatan putaran motor (rpm), arus motor (I_m) dan tegangan motor. Berdasarkan hasil uji coba ini didapatkan kecepatan putaran motor sebesar 593 rpm, arus motor 0,5A dan tegangan motor sebesar 153 V. Gambar pengujian dan penunjukan alat ukur disajikan pada gambar 6.



Gambar 6. Hasil Pengukuran pada *Set Point* 20 Hz

Set Point 25 Hz

Pada uji coba ini, frekuensi diatur sebesar 25 Hz, pengaturan langsung dilakukan pada panel VFD yang digunakan pada perangkat TKKMI. Frekuensi 25 Hz ini dijadikan *Set Point* atau referensi pengaturan kecepatan. Ketika TKKMI dioperasikan kemudian dilakukan pengukuran kecepatan putaran motor (rpm), arus motor (I_m) dan tegangan motor. Berdasarkan hasil uji coba ini didapatkan kecepatan putaran motor sebesar 600 rpm, arus motor 0,5 A dan tegangan motor sebesar 190 V. Gambar pengujian dan penunjukan alat ukur disajikan pada gambar 7.



Gambar 7. Hasil Pengukuran pada Set Point 25 Hz

Set Point 30 Hz

Pada uji coba ini, frekuensi diatur sebesar 30 Hz, pengaturan langsung dilakukan pada panel VFD yang digunakan pada perangkat TKKMI. Frekuensi 30 Hz ini dijadikan *Set Point* atau referensi pengaturan kecepatan. Ketika TKKMI dioperasikan kemudian dilakukan pengukuran kecepatan putaran motor (rpm), arus motor (I_m) dan tegangan motor. Berdasarkan hasil uji coba ini didapatkan kecepatan putaran motor sebesar 793 rpm, arus motor 0,5A dan tegangan motor sebesar 227 V. Gambar pengujian dan penunjukan alat ukur disajikan pada gambar 8.



Gambar 8. Hasil Pengukuran pada Set Point 30 Hz

Set Point 35 Hz

Pada uji coba ini, frekuensi diatur sebesar 35 Hz, pengaturan langsung dilakukan pada panel VFD yang digunakan pada perangkat TKKMI. Frekuensi 35 Hz ini dijadikan *Set Point* atau referensi pengaturan kecepatan. Ketika TKKMI dioperasikan kemudian dilakukan pengukuran kecepatan putaran motor (rpm), arus motor (I_m) dan tegangan motor. Berdasarkan hasil uji coba ini didapatkan kecepatan putaran motor sebesar 1043 rpm, arus motor 0,5A dan tegangan motor sebesar 263 V. Gambar pengujian dan penunjukan alat ukur disajikan pada gambar 9.



Gambar 9. Hasil Pengukuran pada Set Point 35 Hz

Set Point 40 Hz

Pada uji coba ini, frekuensi diatur sebesar 40 Hz, pengaturan langsung dilakukan pada panel VFD yang digunakan pada perangkat TKKMI. Frekuensi 40Hz ini dijadikan Set Point atau referensi pengaturan kecepatan. Ketika TKKMI dioperasikan kemudian dilakukan pengukuran kecepatan putaran motor (rpm), arus motor (Im) dan tegangan motor. Berdasarkan hasil uji coba ini didapatkan kecepatan putaran motor sebesar 1199 rpm, arus motor 0,5A dan tegangan motor sebesar 298 V. Gambar pengujian dan penunjukan alat ukur disajikan pada gambar 10.



Gambar 10. Hasil Pengukuran pada Set Point 40 Hz

Set Point 45 Hz

Pada uji coba ini, frekuensi diatur sebesar 45 Hz, pengaturan langsung dilakukan pada panel VFD yang digunakan pada perangkat TKKMI. Frekuensi 45 Hz ini dijadikan Set Point atau referensi pengaturan kecepatan. Ketika TKKMI dioperasikan kemudian dilakukan pengukuran kecepatan putaran motor (rpm), arus motor (Im) dan tegangan motor. Berdasarkan hasil uji coba ini didapatkan kecepatan putaran motor sebesar 1337 rpm, arus motor 0,5A dan tegangan motor sebesar 330 V. Gambar pengujian dan penunjukan alat ukur disajikan pada gambar 11.



Gambar 11. Hasil Pengukuran pada Set Point 45 Hz

Set Point 50 Hz

Pada uji coba ini, frekuensi diatur sebesar 50 Hz, pengaturan langsung dilakukan pada panel VFD yang digunakan pada perangkat TKKMI. Frekuensi 50 Hz ini dijadikan *Set Point* atau referensi pengaturan kecepatan. Ketika TKKMI dioperasikan kemudian dilakukan pengukuran kecepatan putaran motor (rpm), arus motor (I_m) dan tegangan motor. Berdasarkan hasil uji coba ini didapatkan kecepatan putaran motor sebesar 1485 rpm, arus motor 0,5A dan tegangan motor sebesar 330 V. Adapun gambar pengujian dan penunjukan alat ukur disajikan pada gambar 12.

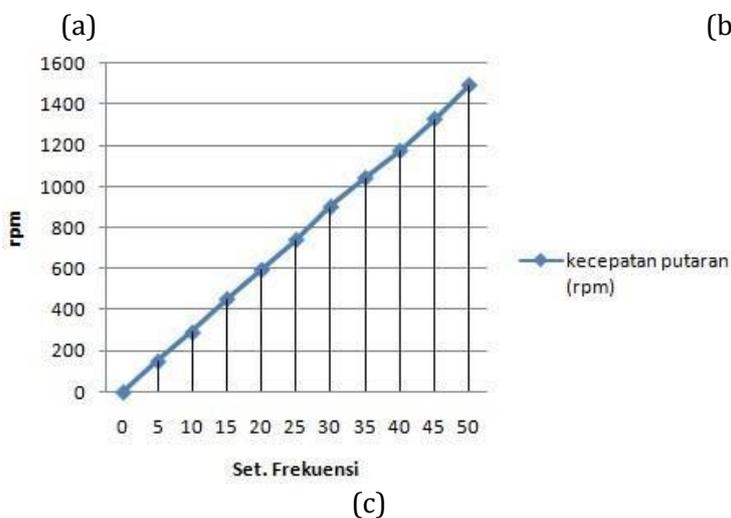
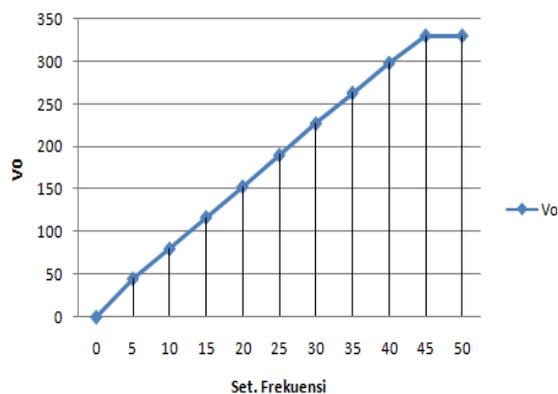
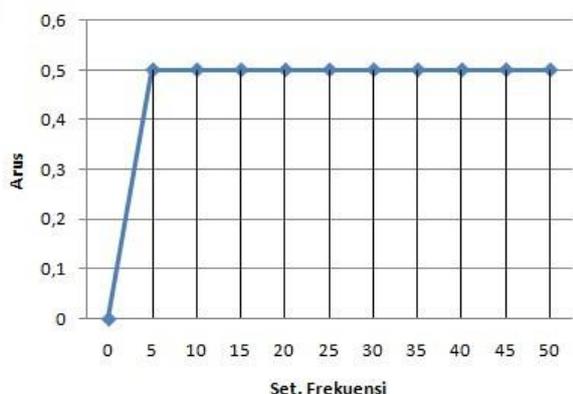


Gambar 12. Hasil Pengukuran pada Set Point 50 Hz

Hasil perbandingan pengukuran untuk semua set frekuensi pada pengujian unjuk kerja rangkaian dari perangkat TKKMI berbasis inverter ini disajikan pada tabel 2. Grafik perubahan kecepatan putaran motor, tegangan motor dan arus motor pada saat perubahan *set point* untuk pengujian perangkat TKKMI disajikan pada gambar 13.

Tabel 2. Hasil Uji Unjuk Kerja Rangkaian TTKMI

Set Point (Hz)	Kecepatan Putaran Motor (RPM)	Arus Motor (A)	Tegangan Motor (V)
0	0	0	0
5	162	0,5	45
10	250	0,5	80
15	452	0,5	117
20	594	0,5	153
25	593	0,5	190
30	793	0,5	227
35	1043	0,5	263
40	1199	0,5	298
45	1337	0,5	330
50	1485	0,5	330



Gambar 13. Grafik Perubahan Parameter Motor untuk Setiap Set Point (a) Arus Motor (b) Tegangan Motor (c) Kecepatan Putaran Motor

Pembahasan

TKKMI yang dikembangkan dalam penelitian ini merupakan perangkat peralatan kendali motor induksi 3 fasa berbasis *Variable Frequency Drive* (VFD) yang dapat digunakan dan diaplikasikan sebagai peralatan atau media pembelajaran praktikum pada proses pembelajaran kendali motor listrik industri. Perkembangan teknologi yang begitu cepat mengakibatkan beberapa perubahan dalam system kendali motor listrik yang digunakan di dunia industri [2], [11]. Perubahan ini perlu direspon cepat oleh pekerja dan mahasiswa yang sedang mempelajari tentang sistem kendali motor listrik industri [19], [21]. Agar dapat segera menyesuaikan kemampuan dan keahliannya dalam bidang system kendali motor listrik industri. Pengembangan perangkat TKKMI ini merupakan salah satu bentuk respon terhadap perubahan tersebut, yang diharapkan dapat digunakan sebagai peralatan atau media pembelajaran untuk mempelajari tentang system kendali motor listrik berbasis inverter yang umum disebut dengan *variable frekuensi drive* (VFD). VFD merupakan perangkat kendali motor listrik AC yang memanfaatkan teknologi inverter, yaitu inverter 3 fasa terkendali. fungsi inverter adalah mengatur frekuensi dan tegangan input pada motor dengan memanipulasi frekuensi *switching* komponen *switching* nya.

Hasil penelitian berupa analisis uji kelayakan perangkat TKKMI menunjukkan bahwa perangkat TKKMI yang dikembangkan telah layak untuk digunakan sebagai peralatan atau media pembelajaran praktikum sistem kendali motor listrik industri di laboratorium. Hal ini dapat diketahui berdasarkan dua hasil uji yaitu uji parameter kelistrikan dan uji unjuk kerja rangkaian seperti yang umum dilakukan dan digunakan untuk mengambil keputusan kelayakan penggunaan suatu peralatan laboratorium oleh beberapa peneliti berdasarkan hasil penelitian yang relevan sebelumnya [2], [19], [28], [34]. Uji parameter kelistrikan terhadap perangkat TKKMI menunjukkan bahwa semua parameter kelistrikan terukur dengan baik sesuai dengan *datasheet* atau *manual book* dari perangkat inverter 3 fasa dan komponen pengaman yang digunakan, selain itu tegangan dan arus tiga fasa yang digunakan sebagai input dan output dari perangkat TKKMI juga relative sama dan seimbang [3], [4]. Hasil pengujian unjuk kerja rangkaian menunjukkan bahwa perangkat TKKMI telah berfungsi dengan baik sesuai dengan fungsinya yaitu kendali motor induksi 3 fasa [2], [19]. Setiap perubahan *set point* frekuensi yang dilakukan direspon dengan perubahan tegangan pada inverter dan perubahan kecepatan putaran motor induksi 3 fasa. Hal ini sesuai dengan beberapa hasil penelitian sebelumnya yang berhubungan dengan unjuk kinerja inverter dalam kendali motor induksi baik untuk motor induksi 1 fasa maupun 3 fasa.

KESIMPULAN

Perangkat TKKMI yang dikembangkan dalam penelitian ini merupakan perangkat peralatan kendali motor induksi 3 fasa berbasis *Variable Frequency Drive* (VFD) yang dapat digunakan dan diaplikasikan sebagai peralatan atau media pembelajaran praktikum pada proses pembelajaran kendali motor listrik industri. Hasil analisis uji kelayakan dengan menggunakan metode pengujian parameter kelistrikan dan unjuk kerja rangkaian menunjukkan bahwa perangkat TKKMI memiliki parameter kelistrikan yang normal dan sesuai dengan *datasheet* peralatan serta perangkat TKKMI juga dapat berfungsi dengan baik sesuai dengan fungsinya untuk mengendalikan kecepatan motor induksi 3 fasa dalam beberapa *mode* kendali. Dengan demikian maka dapat diketahui bahwa hasil analisis uji kelayakan menunjukkan bahwa perangkat TKKMI telah layak untuk digunakan sebagai peralatan atau media pembelajaran praktikum di laboratorium khususnya pada proses pembelajaran praktikum kendali motor listrik industri.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih diucapkan kepada civitas akademika Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Padang dan semua pihak yang telah banyak membantu dalam melaksanakan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Narendran and R. Sureshkumar, "Hysteresis-controlled - landsman converter based multilevel inverter fed induction-motor system using PIC," *Microprocess Microsyst*, vol. 76, 2020, doi: 10.1016/j.micpro.2020.103099.
- [2] J. J. Guedes, M. F. Castoldi, A. Goedel, C. M. Agulhari, and D. S. Sanches, "Parameters estimation of three-phase induction motors using differential evolution," *Electric Power Systems Research*, vol. 154, pp. 204–212, 2018, doi: 10.1016/j.epsr.2017.08.033.
- [3] B. L. G. Costa, C. L. Graciola, B. A. Angélico, A. Goedel, M. F. Castoldi, and W. C. D. A. Pereira, "A practical framework for tuning DTC-SVM drive of three-phase induction motors," *Control Eng Pract*, vol. 88, no. October 2018, pp. 119–127, 2019, doi: 10.1016/j.conengprac.2019.05.003.
- [4] V. S. Santos, J. J. C. Eras, A. S. Gutierrez, and M. J. C. Ulloa, "Assessment of the energy efficiency estimation methods on induction motors considering real-time monitoring," *Measurement*, 2018, doi: 10.1016/j.measurement.2018.12.080.
- [5] A. Ahyanuardi, O. Candra, D. T. P. Yanto, and A. A. A. Bata, "The Development of 1 Phase Induction Motor Training Kits," *International Journal of Scientific & Technology Research*, vol. 9, no. 08, pp. 541–545, 2020.
- [6] M. Aktas, K. Awailli, M. Ehsani, and A. Arisoy, "Direct torque control versus indirect field-oriented control of induction motors for electric vehicle applications," *Engineering Science and Technology, an International Journal*, no. xxxx, 2020, doi: 10.1016/j.jestch.2020.04.002.
- [7] A. Glowacz, "Acoustic based fault diagnosis of three-phase induction motor," *Applied Acoustics*, vol. 137, no. March, pp. 82–89, 2018, doi: 10.1016/j.apacoust.2018.03.010.
- [8] L. A. Pereira, M. Perin, L. F. A. Pereira, J. R. Ruthes, F. L. M. de Sousa, and E. C. P. de Oliveira, "Performance estimation of three-phase induction motors from no-load startup test without speed acquisition," *ISA Trans*, vol. 96, no. xxxx, pp. 376–389, 2020, doi: 10.1016/j.isatra.2019.05.028.
- [9] M. Frini, A. Soualhi, and M. el Badaoui, "Gear faults diagnosis based on the geometric indicators of electrical signals in three-phase induction motors," *Mech Mach Theory*, vol. 138, pp. 1–15, 2019, doi: 10.1016/j.mechmachtheory.2019.03.030.
- [10] A. Kouzou, P. Saifullah, A. Iqbal, and H. Abu-Rub, "Performance analysis of a five phase induction motor under unbalanced voltage supply," *2013 10th International Multi-Conference on Systems, Signals and Devices, SSD 2013*, pp. 1–8, 2013, doi: 10.1109/SSD.2013.6564086.
- [11] F. A. Hasan, A. T. Humod, and L. J. Rashad, "Robust decoupled controller of induction motor by combining PSO and Kharitonov's theorem," *Engineering Science and Technology, an International Journal*, no. xxxx, 2020, doi: 10.1016/j.jestch.2020.04.004.
- [12] S. Nandi, R. M. Bharadwaj, and H. A. Toliyat, "Performance analysis of a three-phase induction motor under mixed eccentricity condition," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 17, no. 3, pp. 392–399, 2002, doi: 10.1109/TEC.2002.801995.
- [13] H. Chuang, G. Li, and C. Lee, "The efficiency improvement of AC induction motor with constant frequency technology," *Energy*, vol. 174, pp. 805–813, 2019, doi: 10.1016/j.energy.2019.03.019.
- [14] E. El-kharashi, J. G. Massoud, and M. A. Al-ahmar, "The impact of the unbalance in both the voltage and the frequency on the performance of single and cascaded induction motors," *Energy*, vol. 181, pp. 561–575, 2019, doi: 10.1016/j.energy.2019.05.169.
- [15] H. Hastuti, P. Anugrah, D. T. P. Yanto, and E. Astrid, "Design and Development of Electric Drive Training Kit for Speed Control of Three-Phase Induction Motor," *Journal of Xidian University*, vol. 14, no. 12, pp. 385–392, 2020, doi: 10.37896/jxu14.12/040.
- [16] R. Baz, K. el Majdoub, F. Giri, and A. Taouni, "Self-tuning fuzzy PID speed controller for quarter electric vehicle driven by In-wheel BLDC motor and Pacejka's tire model," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 55, no. 12, pp. 598–603, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.ifacol.2022.07.377.
- [17] T. Yigit and H. Celik, "Speed controlling of the PEM fuel cell powered BLDC motor with FOPI optimized by MSA," *Int J Hydrogen Energy*, vol. 45, no. 60, pp. 35097–35107, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.04.091.
- [18] R. Kalai Selvi and R. Suja Mani Malar, "A bridgeless Luo converter based speed control of switched reluctance motor using Particle Swarm Optimization (Pso) tuned proportional integral (Pi) controller," *Microprocess Microsyst*, vol. 75, p. 103039, 2020, doi: 10.1016/j.micpro.2020.103039.
- [19] M. H. N. Talib *et al.*, "An improved simplified rules Fuzzy Logic Speed Controller method applied for induction motor drive," *ISA Trans*, no. xxxx, 2020, doi: 10.1016/j.isatra.2020.05.040.

-
- [20] T. Arun Srinivas, G. Themozhi, and S. Nagarajan, "Current mode controlled fuzzy logic based inter leaved cuk converter SVM inverter fed induction motor drive system," *Microprocess Microsyst*, vol. 74, p. 103002, 2020, doi: 10.1016/j.micpro.2020.103002.
- [21] G. S. Memon, M. A. Mahar, C. Kumar, M. M. Shaikh, and S. K. Guriro, "Performance Analysis of Induction Motor Drive at Various Conduction Modes Using 3-phase Bridge Inverter," *Proceedings of the 21st International Multi Topic Conference, INMIC 2018*, pp. 206–212, 2018, doi: 10.1109/INMIC.2018.8595527.
- [22] O. Ammari, K. el Majdoub, and F. Giri, "Modeling and control of a half electric vehicle including an inverter, an in-wheel BLDC motor and Pacejka's tire model," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 55, no. 12, pp. 604–609, Jan. 2022, doi: 10.1016/J.IFACOL.2022.07.378.
- [23] Y. Yang, Y. Pian, and Q. Liu, "Design of energy harvester using rotating motion rectifier and its application on bicycle," *Energy*, vol. 179, pp. 222–231, 2019, doi: 10.1016/j.energy.2019.05.036.
- [24] P. N. D. Mehta, P. A. M. Haque, and P. M. V Makwana, "Modeling and simulation of P, PI and PID controller for speed control of DC Motor Drive," vol. 8, no. 7, pp. 556–562, 2017.
- [25] O. Candra, C. Dewi, D. T. P. Yanto, and H. Hastuti, "The Implementation of Power Electronics Training to Enhance Student Learning Activities in the Power Electronics Learning Process," *International Journal of Innovation, Creativity and Change*, vol. 11, no. 4, pp. 362–373, 2020, [Online]. Available: <https://www.ijicc.net/index.php/ijicc-editions/2020/155-vol-11-iss-4>
- [26] D. T. P. Yanto, S. Sukardi, and D. Puyada, "Effectiveness of Interactive Instructional Media on Electrical Circuits Course : The Effects on Students Cognitive Abilities," *Proceedings of 4rd International Conference On Technical And Vocational Education And Training*, vol. 2017, pp. 75–80, 2017.
- [27] M. Korber and D. Oesch, "Vocational versus general education: Employment and earnings over the life course in Switzerland," *Adv Life Course Res*, vol. 40, pp. 1–13, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.alcr.2019.03.003>.
- [28] D. T. P. Yanto, R. Hidayat, and H. Hamdani, "Design of a Power Electronics Trainer : Controlled and Uncontrolled Rectifier," *Prosiding Seminar Nasional Hasil Penelitian 2018 POLITEKNIK Ujung Pandang*, vol. 2018, pp. 83–88, 2018, [Online]. Available: <http://jurnal.poliupg.ac.id/index.php/snp/article/view/771>
- [29] S. J. Choi, J. C. Jeong, and S. N. Kim, "Impact of vocational education and training on adult skills and employment: An applied multilevel analysis," *Int J Educ Dev*, vol. 66, no. March, pp. 129–138, 2019, doi: 10.1016/j.ijedudev.2018.09.007.
- [30] S. Mikkonen, L. Pylväs, H. Rintala, P. Nokelainen, and L. Postareff, "Guiding workplace learning in vocational education and training: A literature review," *Empirical Research in Vocational Education and Training*. 2017. doi: 10.1186/s40461-017-0053-4.
- [31] M. Mulder, T. Weigel, and K. Collins, "The concept of competence in the development of vocational education and training in selected EU member states: A critical analysis," *Journal of Vocational Education and Training*, vol. 59, no. 1, pp. 67–88, 2007, doi: 10.1080/13636820601145630.
- [32] C. Dewi, D. T. P. Yanto, and H. Hastuti, "The Development of Power Electronics Training Kits for Electrical Engineering Students : A Validity Test Analysis," *Jurnal Pendidikan Teknologi Kejuruan*, vol. 3, no. 2, pp. 114–120, 2020, doi: <https://doi.org/10.24036/jptk.v3i2.9423>.
- [33] D. T. P. Yanto, M. Muskhir, and R. Maulana, "Peningkatan Kompetensi Profesional Guru melalui Pelatihan Kendali Motor Listrik berbasis Variable Speed Drive," *JTEV (Jurnal Teknik Elektro dan Vokasional)*, vol. 8, no. 2, pp. 451–458, 2022, doi: 10.24036/jtev.v8i2.119577.
- [34] D. T. P. Yanto, E. Astrid, R. Hidayat, and S. Islami, "Feasibility Test Analysis of the Power Electronics Trainer Kit : 3 Phase Half-Wave and Full-Wave Uncontrolled Rectifier," *Jurnal Teknik Elektro dan Vokasional*, vol. 5, no. 1.1, pp. 121–125, 2019.
- [35] I. Fl *et al.*, "Assessing the feasibility of using the heat demand-outdoor temperature function for a long-term district heat demand forecast," *Energy Procedia*, vol. 137, pp. 406–413, 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2017.10.365.
-