

# Analisis Kinerja dan Harmonik Motor Induksi 3 Fasa dengan *Variable Frequency Drive* pada *Boiler Feed Water Pump* di PT. Cahaya Fajar Kaltim Menggunakan ETAP

Muhammad Hafiz Ashabullah<sup>1</sup>, Suratno<sup>2</sup>, Erry Yadie<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup>Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Samarinda  
Jl. Dr. Ciptomangunkusumo, Kampus Gunung Panjang, Samarinda, 75121  
Email: <sup>1</sup>hafizashabullah@gmail.com, <sup>2</sup>suratnopolnes@gmail.com

**Abstrak-** *Boiler Feed Water Pump (BFWP)* merupakan peralatan penting di Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) yang berfungsi mengalirkan air umpan dari deaerator ke boiler. Penggunaan *Variable Frequency Drive (VFD)* pada BFWP bertujuan untuk menghemat energi, namun dapat menimbulkan harmonik yang dapat mempengaruhi kualitas daya listrik. Penelitian ini menganalisis kinerja dan harmonik motor induksi 3 fase dengan VFD pada BFWP di PT. Cahaya Fajar Kaltim menggunakan ETAP 19.0.1. Metode penelitian meliputi studi literatur, pengumpulan data, dan simulasi. Hasil simulasi menunjukkan, dengan penambahan VFD tidak berdampak signifikan pada efisiensi motor, namun menghasilkan distorsi harmonik sebesar 8,52% pada tegangan dan 9,29% pada arus. Pemasangan bank kapasitor berhasil menekan distorsi harmonik tegangan menjadi 3,61%, namun distorsi harmonik arus meningkat menjadi 10,71%. Nilai harmonik ini masih berada di bawah batas aman standar IEEE 519-2014.

**Kata kunci:** *Boiler Feed Water Pump, Variable Frequency Drive, Harmonik, Motor Induksi 3 Fase, ETAP 19.0.1, Bank Kapasitor.*

## I. PENDAHULUAN

Dalam era industri 4.0 yang ditandai dengan kemajuan teknologi pesat, sektor pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) dituntut untuk terus meningkatkan efisiensi energi dan keandalan operasional. PT. Cahaya Fajar Kaltim, sebagai salah satu pelaku utama dalam industri ini, menyadari urgensi optimalisasi kinerja peralatannya, terutama komponen krusial seperti *Boiler Feed Water Pump (BFWP)*. BFWP, yang berfungsi mengalirkan air dari deaerator ke boiler, memiliki peran sentral dalam menjaga kelangsungan proses produksi listrik.

Secara historis, motor induksi tiga fase telah menjadi pilihan utama sebagai penggerak BFWP karena keandalan dan kemudahan perawatannya. Namun, metode pengendalian konvensional yang umum digunakan, seperti kontaktor magnet, memiliki keterbatasan dalam mencapai efisiensi energi optimal. Hal ini disebabkan oleh ketidakmampuan metode tersebut dalam mengatur kecepatan motor secara presisi sesuai dengan fluktuasi beban, sehingga mengakibatkan konsumsi energi yang boros pada kondisi beban parsial.

Untuk mengatasi kendala ini, *Variable Frequency Drive (VFD)* muncul sebagai solusi inovatif. VFD memungkinkan pengaturan kecepatan motor induksi secara akurat dengan memodifikasi frekuensi tegangan masukan. Dalam konteks BFWP, VFD dapat menyesuaikan laju aliran air secara dinamis

sesuai kebutuhan boiler, sehingga mengoptimalkan efisiensi energi dan memperpanjang umur pakai komponen.

Penerapan VFD pada BFWP di PT. Cahaya Fajar Kaltim diproyeksikan akan memberikan sejumlah manfaat signifikan. Selain penghematan energi listrik yang substansial, VFD juga diharapkan dapat meningkatkan produktivitas, memperkuat keandalan operasional, serta mereduksi biaya operasional dan perawatan.

Meskipun demikian, penggunaan VFD tidak luput dari tantangan teknis. Salah satu isu utama adalah munculnya harmonik pada sistem kelistrikan. Harmonik, yaitu gelombang sinusoidal dengan frekuensi kelipatan bilangan bulat dari frekuensi fundamental, dapat memicu berbagai masalah seperti peningkatan suhu motor, penurunan efisiensi, dan gangguan pada peralatan listrik lainnya. Oleh karena itu, analisis mendalam terhadap kinerja dan harmonik motor induksi tiga fase dengan VFD pada BFWP menjadi langkah krusial untuk memastikan implementasi teknologi ini berjalan lancar dan tidak menimbulkan dampak negatif pada sistem kelistrikan PT. Cahaya Fajar Kaltim.

Dalam penelitian ini, perangkat lunak ETAP (*Electrical Transient Analyzer Program*) akan digunakan untuk menganalisis kinerja dan harmonik motor induksi tiga fase dengan VFD pada BFWP di PT. Cahaya Fajar Kaltim. ETAP, sebagai perangkat lunak simulasi yang telah teruji dan banyak digunakan dalam industri tenaga listrik, diharapkan dapat memberikan gambaran komprehensif mengenai dampak penerapan VFD terhadap kinerja BFWP dan sistem kelistrikan secara keseluruhan [1].

## II. TINJAUAN PUSTAKA

### A. Penelitian yang Sudah Ada Sebelumnya

Penelitian tentang pengaruh penggunaan *Variable Frequency Drive (VFD)* pada motor induksi 3 fase telah banyak dilakukan, menunjukkan bahwa dengan penggunaan VFD dapat menyebabkan Harmonik.

Salah satu penelitian terdahulu yang relevan dengan pengaruh penggunaan VFD, dilakukan oleh Ir. Mohammad Amir, M.Sc tahun 2017 menunjukkan bahwa pengaruh harmonik pada motor induksi tiga fase akibat penggunaan *Variable Speed Drive (VSD)* menemukan bahwa pada beban 750 W, harmonik orde 9, 11, dan 13 melampaui batas standar IEC61000-3-2 kelas D. *Total Harmonic Distortion* arus (THDi) fase-netral untuk fase R dan S masing-masing

mencapai 94,35% dan 101,03%, melebihi batas 10%. Pada beban 12 kW, hampir semua orde harmonik melebihi batas standar, dengan THDi fase-netral berkisar antara 41,86% hingga 49,26%. Selain itu, terdapat peningkatan rugi tembaga pada rotor motor induksi 12 kW akibat harmonik, dengan nilai tertinggi 0,4702 W dan terendah 1,236 mW. Harmonik ke-5 juga mempengaruhi torsi motor, menghasilkan torsi sebesar 4,02E-03 N.m [2].

Penelitian oleh Reval Bangun Nugraha, I Made Wiwit Kastawan, dan Parno Raharjo tahun 2023 menunjukkan pengaruh *carrier frequency* VSD pada harmonik suplai daya motor induksi 3-fase menunjukkan bahwa terdapat hubungan positif antara nilai *carrier frequency* dan nilai THDi pada beban yang sama. Namun, pada nilai *carrier frequency* yang tetap, peningkatan beban justru menurunkan nilai THDi. Harmonik orde kelima menjadi harmonik dominan yang dihasilkan VSD dalam penelitian ini [3].

**B. Harmonik**

Harmonik adalah distorsi gelombang arus dan tegangan listrik dari bentuk sinusoidal idealnya karena adanya komponen frekuensi yang merupakan kelipatan bulat dari frekuensi dasar sistem tenaga listrik. Komponen-komponen frekuensi tambahan ini, yang dikenal sebagai harmonik, dapat menyebabkan berbagai masalah operasional dan gangguan pada peralatan dalam sistem tenaga.

Untuk mengkaji dampak harmonik terhadap kualitas tegangan dan arus, digunakan indeks harmonik sebagai parameter acuan. Indeks ini memberikan gambaran kuantitatif mengenai tingkat distorsi harmonik pada sistem tenaga listrik. Dua parameter utama yang digunakan dalam analisis harmonik adalah *Total Harmonic Distortion* (THD) dan *Individual Harmonic Distortion* (IHD) [4].

1) *Total Harmonic Distortion* (THD)

*Total Harmonic Distortion* (THD) adalah ukuran yang digunakan untuk mengukur tingkat distorsi harmonik pada kualitas arus, tegangan, dan daya jaringan listrik. Biasanya dinyatakan dalam persentase (%), THD adalah rasio nilai akar kuadrat rata-rata (RMS) komponen harmonik terhadap nilai RMS fundamental. Indeks ini menunjukkan seberapa besar bentuk gelombang periodik menyimpang dari bentuk gelombang sinusoidal murni akibat adanya kandungan harmonik [5].

2) *Individual Harmonic Distortion* (IHD)

*Individual Harmonic Distortion* (IHD) adalah rasio nilai akar kuadrat rata-rata (RMS) dari harmonik individu terhadap nilai RMS fundamental. IHD digunakan untuk menggambarkan kontribusi masing-masing komponen harmonik terhadap distorsi harmonik total pada arus dan tegangan [5].

3) Standar Harmonik

Standar IEEE 519-2014, dan menjadi acuan utama dalam pengelolaan harmonik pada sistem tenaga listrik. Standar ini tidak hanya memberikan panduan teknis, tetapi juga menetapkan batasan-batasan yang harus dipatuhi untuk menjaga kualitas daya dan keandalan sistem. Distorsi

harmonik melibatkan dua kriteria utama yaitu pembatasan harmonik arus dan pembatasan harmonik tegangan [6].

Tabel 1. Standar Harmonik Tegangan Sesuai IEEE 519-2014

Tegangan Sistem (kV)	IHD <sub>V</sub> (%)	THD <sub>V</sub> (%)
V ≤ 1 kV	5.0	8.0
1 kV < V ≤ 69 kV	3.0	5.0
69 kV < V ≤ 161 kV	1.5	2.5
V ≥ 161 kV	1.0	1.5

Tabel 2. Standar Harmonik Arus Sesuai IEEE 519-2014

Tegangan Sistem (kV)	I <sub>sc</sub> /I <sub>Load</sub> (A)	THD <sub>i</sub> (%)
V ≤ 69 kV	< 20	5.0
	20 - 50	8.0
	50 - 100	12.0
	100 - 1000	15.0
	> 1000	20.0
69 kV < V ≤ 161 kV	< 20	2.5
	20 - 50	4.0
	50 - 100	6.0
	100 - 1000	7.5
	> 1000	10.0
V ≥ 161 kV	< 25	1.5
	25 - 50	2.5
	≥ 50	3.75

Tabel 3. Standar Orde Harmonik Arus Sesuai IEEE 519-2014

I <sub>sc</sub> /I <sub>L</sub>	Orde Harmonik (%)					Total Demand Distortion
	3 ≤ h < 11	11 ≤ h < 17	17 ≤ h < 23	23 ≤ h < 35	35 ≤ h	
<20	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5
20<50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8
50<100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12
100<1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15
>1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20

**C. Variable Frequency Drive (VFD)**

*Variable Frequency Drive* (VFD), atau sering disebut *inverter*, adalah perangkat yang umum digunakan untuk mengendalikan kecepatan motor induksi tiga fase. Prinsip kerjanya melibatkan manipulasi frekuensi tegangan masukan melalui pengaturan *Pulse Width Modulation* (PWM) dalam sistem kendali. Lebar pulsa yang berbeda menghasilkan tegangan rata-rata yang bervariasi, sehingga memungkinkan pengendalian kecepatan putaran motor. Penggunaan VFD dapat meningkatkan efisiensi operasional motor dengan menyesuaikan kecepatan putaran sesuai beban kerja. Hal ini berkontribusi pada penghematan energi yang signifikan, dengan potensi pengurangan konsumsi listrik motor mencapai 30-60% dalam berbagai aplikasi [7]. Gambar 1 mengilustrasikan contoh *Variable Frequency Drive* (VFD)



Gambar 1. Variable Frequency Drive [8]

D. Motor induksi tiga fase

Motor induksi tiga fase merupakan jenis motor yang umum digunakan di industri untuk mengubah energi listrik menjadi energi mekanik dalam bentuk putaran [9]. Salah satu karakteristik utama motor ini adalah adanya perbedaan antara kecepatan putaran rotor dan medan stator, yang dikenal sebagai slip. Motor induksi tiga fase terdiri dari dua komponen utama, yaitu rotor yang berputar dan stator yang diam. Untuk gambar motor induksi tiga fase dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Motor Induksi Tiga Fase [8]

E. Rugi Daya dan Efisiensi Motor

Motor induksi memiliki sejumlah kerugian daya yang disebabkan oleh komponen-komponen internalnya, seperti kerugian tembaga pada lilitan stator dan rotor, kerugian inti besi, serta kerugian mekanis akibat gesekan dan hambatan udara. Kerugian-kerugian ini secara keseluruhan meningkatkan kebutuhan daya listrik motor untuk beroperasi [8]. Berikut merupakan rumus untuk menghitung rugi daya dan efisiensi motor induksi:

$$P = P_{in} - P_{out} \tag{1}$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \tag{2}$$

Keterangan :

- P = Rugi daya
- P<sub>in</sub> = Daya masukkan
- P<sub>out</sub> = Daya keluaran
- η = Efisiensi

F. Software ETAP 19.0.1

Electric Transient and Analysis Program (ETAP) adalah perangkat lunak serbaguna yang dirancang untuk mendukung berbagai aspek dalam sistem tenaga listrik. ETAP dapat digunakan dalam mode *offline* untuk simulasi sistem tenaga, mode online untuk pengelolaan data secara *real-time*, atau bahkan untuk mengendalikan sistem tenaga secara *real-time*. Perangkat lunak ini menawarkan beragam fitur yang mencakup analisis pembangkitan tenaga listrik, transmisi daya, hingga distribusi tenaga listrik [10]. Analisa tenaga listrik yang dapat dilakukan ETAP antara lain :

- a. Analisa aliran daya (*Load Flow*)
- b. Analisa hubung singkat (*Short Circuit*)
- c. *Arc Flash Analysis*
- d. Analisa kestabilan transien
- e. Analisa *harmonic*
- f. Analisa starting motor, dll

G. Bank Kapasitor

Bank kapasitor adalah sekelompok kapasitor yang dihubungkan secara paralel untuk memberikan daya reaktif ke sistem tenaga listrik. Daya reaktif diperlukan untuk mendukung beban induktif, seperti motor dan transformator, yang membutuhkan medan magnet untuk beroperasi. Tanpa daya reaktif yang cukup, tegangan sistem dapat turun, menyebabkan masalah seperti lampu berkedip, panas berlebihan pada peralatan, dan bahkan kerusakan peralatan [11].

III. METODE PENELITIAN

A. Tempat dan Waktu Penelitian

Tempat pengambilan data ini berada di lokasi Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) Embalut, PT. Cahaya Fajar Kaltim (PT. CFK). Waktu pengambilan data dilaksanakan pada tanggal 22 april 2024 hingga 30 mei 2024.



Gambar 3. Lokasi Penelitian

B. Jenis dan Sumber Data

Data yang didapatkan dari perusahaan meliputi data *nameplate* motor induksi tiga fase yang berfungsi sebagai *Boiler Feed Water Pump*, data *nameplate* generator sebagai sumber daya motor, data *nameplate auxiliary transformer*, data *single line* diagram instalasi 6 kV, serta data aktual motor induksi 3 fase dalam pengoperasian, untuk data aktual motor yang digunakan dalam simulasi yaitu pada hari selasa tanggal 30 bulan April tahun 2024, dengan daya yang tercatat sebesar 1500 kW dengan tegangan kerja 5916 V dan arus 161,3 A. Sesudah mendapatkan data selanjutnya yaitu mensimulasikan kedalam *software* ETAP 19.0.1. Untuk memberikan gambaran yang lebih jelas, jenis data yang digunakan dalam simulasi dirinci pada Tabel 4.

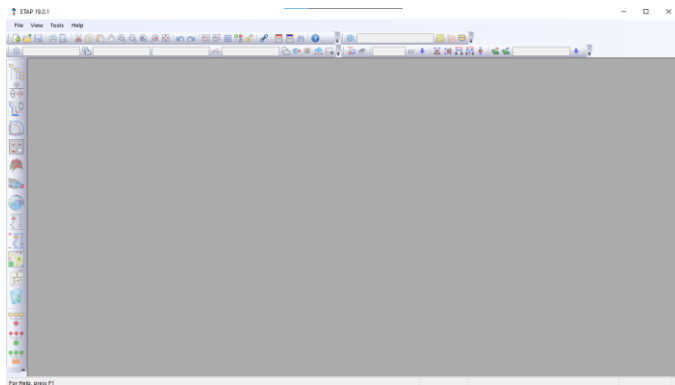
NO	Jenis Data
1	Name Plate Steam Turbine Generator
2	Name Plate Auxiliary Transformer
3	Name Plate Circuit Breaker
4	Name Plate Motor Induksi 3 Fase
5	Data Aktual Pembebanan Motor

C. Simulasi Dengan Software ETAP

Sesudah mendapatkan data selanjutnya yaitu mensimulasikan kedalam *software* ETAP.

- 1) Memulai Program ETAP 19.0.1

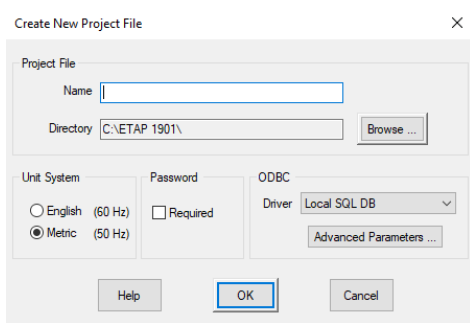
Langkah awal yaitu menjalankan software ETAP 19.0.1, maka tampilan akan seperti pada Gambar 4.



Gambar 4. Tampilan awal software ETAP 19.0.1

2) Membuat Studi Kasus

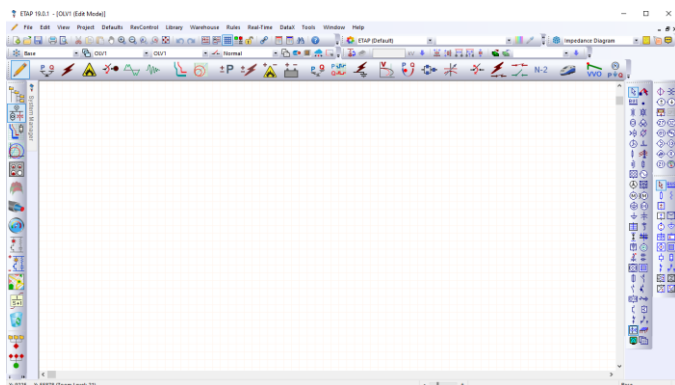
Setelah membuka software selanjutnya yaitu membuat studi kasus dengan pilihan unit system Metric (50 Hz) seperti pada Gambar 5.



Gambar 5. Menu membuat studi kasus

3) Membuat Single Line Diagram

Setelah memilih dan membuat studi kasus maka tahapan selanjutnya yaitu membuat *single line diagram* dengan menggunakan *instrumens* komponen yang terdapat disebelah kanan tampilan jendela sesuai dengan data *single line diagram* motor induksi 3 fase *Boiler Feed Water Pump* (BFWP) yang diperoleh dari perusahaan. Pada Gambar 6 merupakan tampilan jendela pembuatan *single line diagram*.



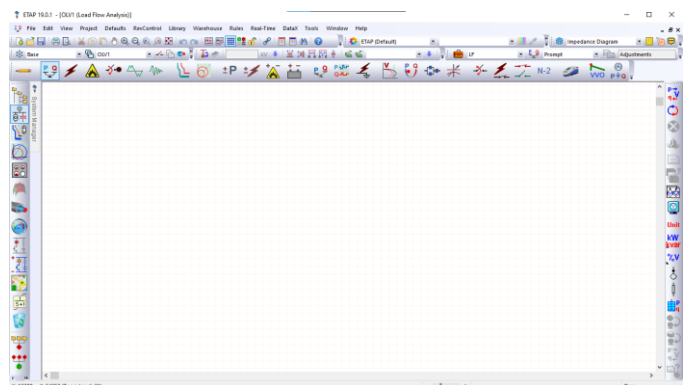
Gambar 6. Tampilan jendela pembuatan single line diagram

4) Masukkan Data Parameter

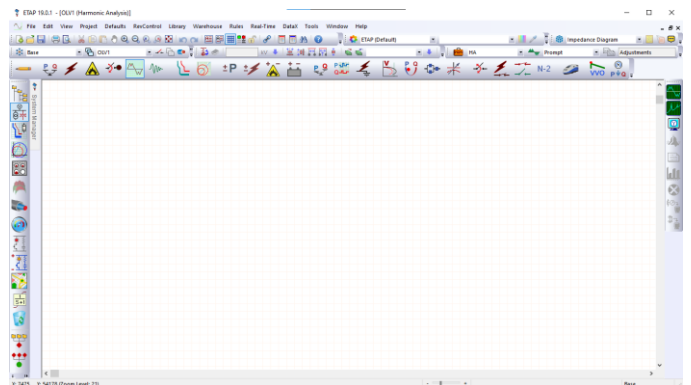
Setelah membuat gambar *single line diagram*, tahapan selanjutnya yaitu mengisi data pada tiap komponen sesuai dengan data yang diperoleh dari perusahaan.

5) Menjalankan Simulasi

Lalu jalankan simulasi dengan cara melakukan *run* pada mode *Load Flow Analysis*. Sebelum melakukan *run* peneliti mengatur metode menjadi Metode Newton Rhapsod pada bagian *Load Flow Analysis*. Jika pada *Load Flow Analysis* sudah berjalan maka akan muncul nilai angka pada *single line diagram*. Setelah berjalan di mode *Load Flow Analysis* maka selanjutnya yaitu menuju menu *Harmonic Analysis* dan melakukan *run Harmonic Load Flow* untuk dapat melihat nilai harmonik. Pada Gambar 7 dan Gambar 8 merupakan gambar dari tampilan *Load Flow Analysis* dan *Harmonic Analysis*.



Gambar 7. Tampilan load flow analysis



Gambar 8. Tampilan harmonik analisis

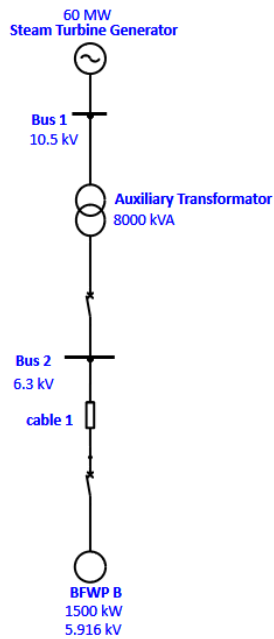
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Simulasi Data Pada ETAP 19.0.1

1) Single Line Diagram Motor Induksi 3 Fase Tanpa Penambahan VFD

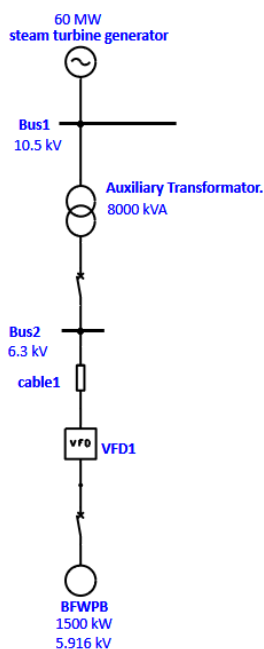
Diagram garis tunggal (*single line diagram*) seperti pada Gambar 9, yang menggambarkan konfigurasi motor induksi 3 fase *Boiler Feed Water Pump* (BFWP) yang digunakan oleh perusahaan. Dalam analisis ini, daya operasional motor induksi akan diasumsikan setara dengan data yang tercatat pada hari Selasa, tanggal 30 April 2024, yaitu sebesar 1500 KW.





Gambar 9. Single line diagram pada perusahaan

2) Single Line Diagram Motor Induksi 3 Fase Dengan VFD  
 Diagram garis tunggal (*single line diagram*) motor induksi 3 fase yang telah ditambahkan VFD dapat dilihat pada Gambar 10.



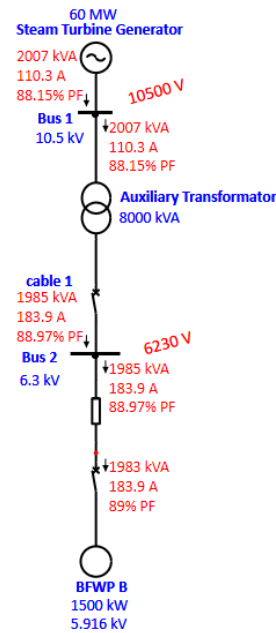
Gambar 10. Single line diagram dengan penambahan VFD

**B. Load Flow Analysis**

Analisis aliran beban dilakukan untuk mendapatkan gambaran kondisi sistem kelistrikan pada hari Selasa, 30 April 2024. Analisis ini penting untuk memahami distribusi daya dan tegangan dalam sistem, serta mengidentifikasi potensi masalah seperti kelebihan beban atau tegangan rendah.

1) Analisis aliran beban tanpa VFD

Diagram satu garis pada Gambar 11 menyajikan hasil analisis aliran daya aktif dan reaktif pada setiap elemen sistem, termasuk saluran distribusi daya trafo, dan beban.

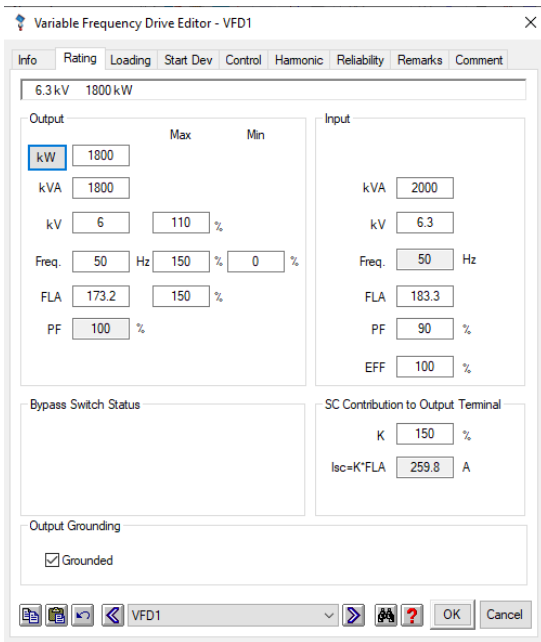


Gambar 11. Hasil analisis aliran beban tanpa VFD

Gambar 11 menunjukkan sedikit perbedaan antara hasil analisis aliran beban dengan data aktual pada hari Selasa, 30 April 2024. Tegangan dan arus pada motor induksi dalam simulasi adalah 6230 V dan 183.9 A, sedangkan data aktual menunjukkan 5916 V dan 161,3 A. Perbedaan ini kemungkinan disebabkan oleh faktor-faktor yang tidak dimasukkan dalam simulasi, seperti beban mekanis tambahan atau variasi kondisi operasional di lokasi sebenarnya.

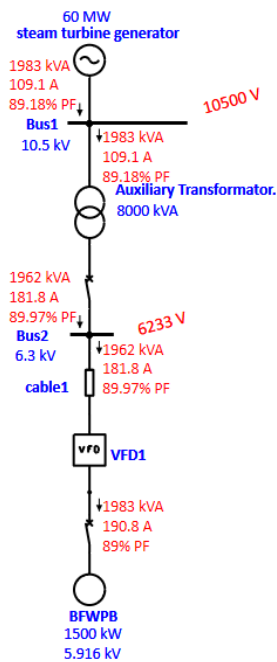
2) Analisis aliran beban dengan penambahan VFD

Sebelum melakukan analisis aliran beban, data pada halaman editor perlu di isi. Pemilihan jenis dan tipe *Variable Frequency Drive (VFD)* didasarkan pada kebutuhan spesifik aplikasi motor induksi 3 fase *Boiler Feed Water Pump*, mengingat tidak adanya standar spesifik yang mengatur batasan minimum daya VFD. Oleh karena itu, diputuskan untuk menggunakan VFD dengan daya yang lebih besar dari *nameplate* motor induksi 3 fase BFWP, yaitu 1800 kW, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 12. Keputusan ini diambil dengan mempertimbangkan kesesuaian daya VFD dengan karakteristik beban, serta untuk mengoptimalkan kinerja dan efisiensi sistem secara keseluruhan.



Gambar 12. Halaman editor Variable Frequency Drive

Setelah pemodelan VFD selesai, analisis aliran beban dilakukan kembali pada sistem yang telah dilengkapi VFD seperti pada Gambar 13.



Gambar 13. Hasil analisis aliran beban dengan VFD

Hasil analisis aliran beban menunjukkan bahwa penambahan *Variable Frequency Drive* (VFD) tidak menyebabkan perubahan signifikan pada pengoperasian motor induksi. Perbedaan karakteristik sistem sebelum dan sesudah penambahan VFD dapat diamati pada Tabel 5.

TABEL 5  
PERBANDINGAN SIMULASI ALIRAN BEBAN DENGAN DAN TANPA VFD

Kondisi	Tegangan (V)	Arus (A)	PF	P (kW)	S (kVA)
Tanpa VFD	6238	183.9	89 %	1765	1983
Dengan VFD	6233	190.8	89 %	1765	1983

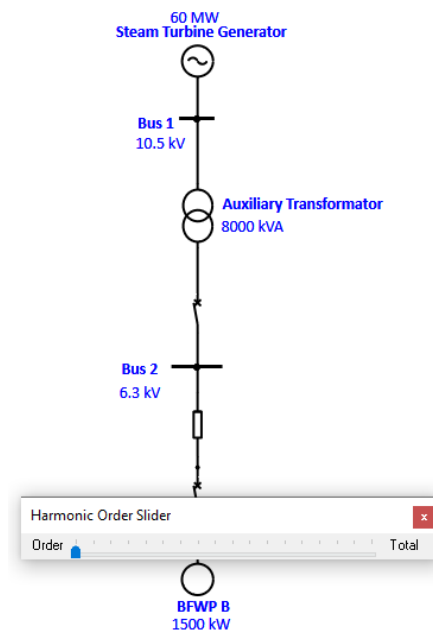
Tabel 5 menunjukkan penambahan VFD tidak mempengaruhi nilai secara signifikan dibandingkan tanpa VFD. Ini mengindikasikan pengendalian motor induksi dengan VFD tidak berdampak besar pada operasi motor. Oleh karena itu, VFD aman dan efektif untuk mengendalikan motor induksi tanpa dampak negatif signifikan pada kinerja sistem.

C. Harmonic Analysis

Analisis aliran beban harmonik perlu dilakukan untuk memeriksa distorsi harmonik atau pengaruh sumber harmonik pada jaringan pengoperasian motor induksi, baik dalam kondisi tanpa maupun dengan penggunaan VFD.

1) Analisis aliran beban harmonik tanpa VFD

Analisis harmonik pada kondisi awal motor beroperasi di perusahaan, sebelum penggunaan VFD, ditampilkan pada Gambar 14.

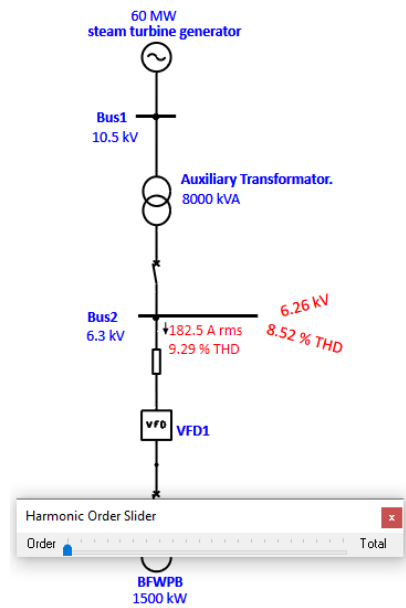


Gambar 14. Hasil aliran beban harmonik tanpa VFD

Hasil simulasi aliran beban harmonik pada motor induksi yang beroperasi di perusahaan menunjukkan tidak adanya nilai *Total Harmonic Distortion* (THD). Hal ini disebabkan oleh tidak adanya beban *non-linier* yang terhubung dalam sistem pengoperasian motor induksi tersebut. Dengan demikian, bentuk gelombang arus yang digunakan oleh motor induksi tetap mendekati sinusoidal murni, sehingga tidak menghasilkan harmonik yang dapat mempengaruhi kualitas daya secara signifikan.

2) Analisis aliran beban harmonik dengan penambahan VFD

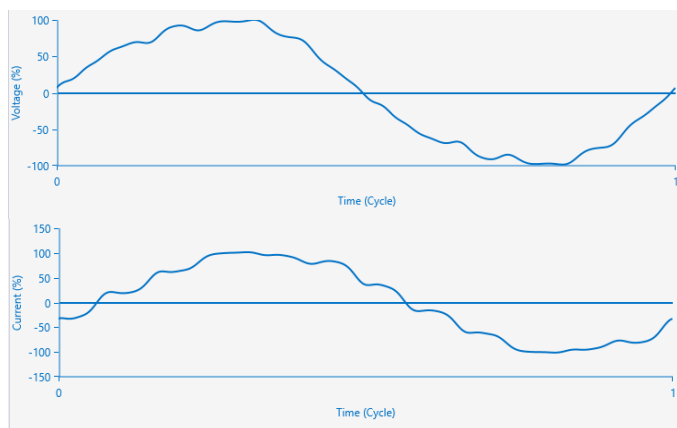
Gambar 15 menunjukkan hasil aliran beban dengan penambahan VFD.



Gambar 15. Hasil aliran beban harmonik dengan penambahan VFD

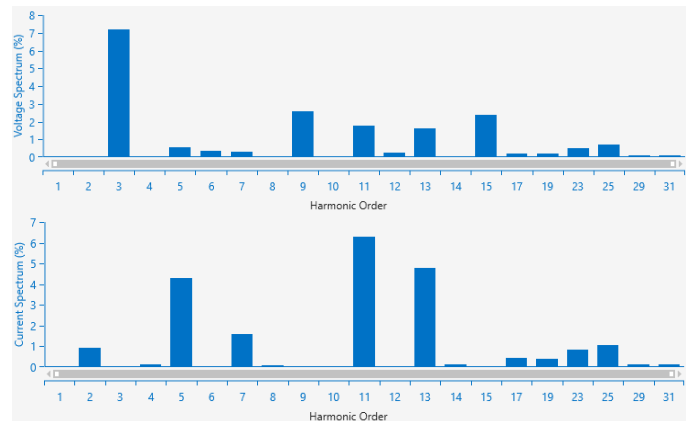
Hasil analisis aliran beban harmonik dengan penambahan VFD menunjukkan adanya beberapa frekuensi harmonik yang memiliki magnitudo melebihi batas standar *Total Harmonic Distortion voltage* (THDv) dan *Total Harmonic Distortion Current* (THDi). Nilai total harmonik tegangan yang muncul akibat penggunaan VFD mencapai 8.52 % yang melebihi batas standar THD yang telah ditentukan yaitu sebesar 5% untuk tegangan dan nilai total harmonik arus sebesar 9.29 %, nilai ini tidak melebihi batas standar THD yang telah ditentukan yaitu sebesar 12% untuk arus.

Temuan ini mengindikasikan bahwa penggunaan VFD pada sistem tenaga listrik berkontribusi pada peningkatan distorsi harmonik. Hal ini dapat disebabkan oleh karakteristik *non-linier* VFD yang menghasilkan arus harmonik saat mengendalikan kecepatan motor. Tingkat distorsi harmonik sebesar 8.52% mengindikasikan adanya potensi masalah kualitas daya yang dapat mengganggu kinerja peralatan lain dalam sistem, meningkatkan rugi-rugi daya, dan memperpendek umur peralatan. Untuk bentuk gelombang tegangan dan arus pada aliran beban dapat dilihat pada Gambar 16.



Gambar 16. Bentuk gelombang tegangan (atas) dan arus (bawah) aliran beban harmonik

Gambar 16 menunjukkan bentuk gelombang yang terdistorsi selama satu periode pada tegangan dan arus, akibat adanya harmonik setelah penambahan VFD. Gelombang yang dihasilkan tidak lagi sinusoidal murni, melainkan mengalami perubahan bentuk, akibat adanya komponen frekuensi tambahan yang mengganggu bentuk gelombang asli.

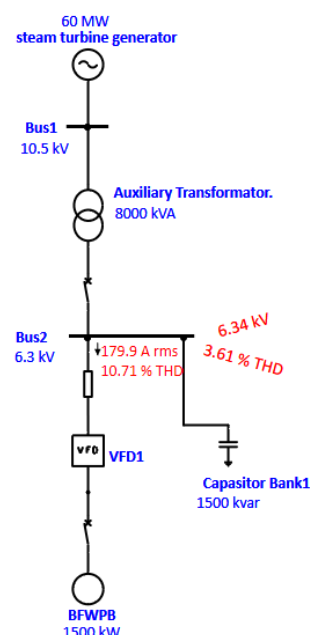


Gambar 17. Spektrum tegangan (atas) dan arus (bawah) aliran beban harmonik

Pada Gambar 17 ditunjukkan bahwa nilai *Individual Harmonic Distortion voltage* (IHDv) terbesar terdapat pada orde ke-3 sebesar 7.17%. Nilai ini melebihi standar maksimum yang diizinkan, yaitu 3%. Dan untuk nilai *Individual Harmonic Distortion current* (IHDi) terbesar terdapat pada orde ke-11 sebesar 6.30 %, nilai ini masih berada dalam batas aman karena berada di bawah standar maksimum yang diizinkan, yaitu 12%.

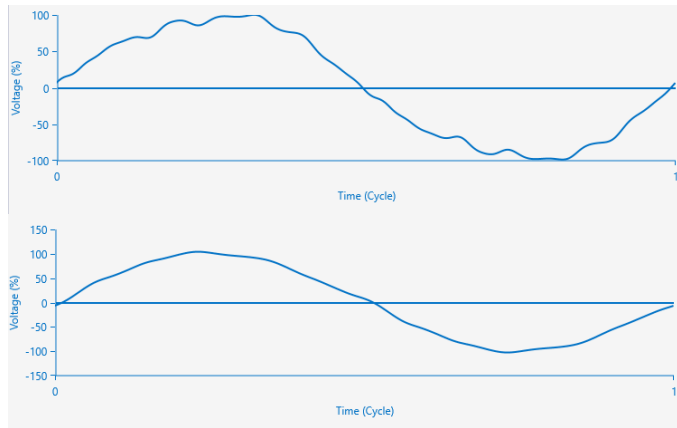
#### D. Mereduksi Harmonik Menggunakan Bank Kapasitor

Bank kapasitor 1500 kvar digunakan untuk mengurangi harmonik dalam sistem motor induksi 3 fase dengan VFD. Nilai Mvar ini dipilih untuk mengontrol tegangan dan diharapkan dapat menurunkan distorsi THD dan IHD dalam batas yang diizinkan saat analisis aliran beban harmonik.



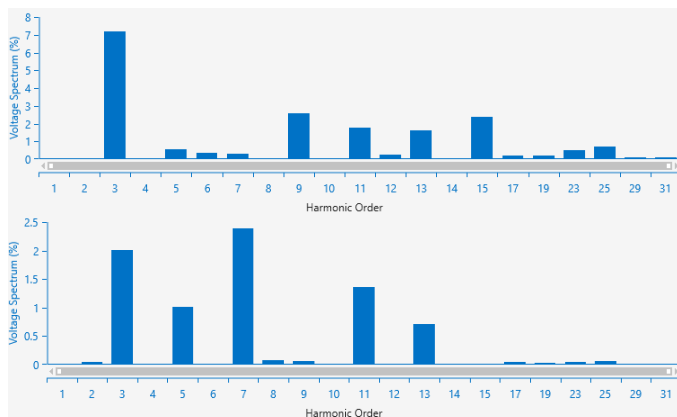
Gambar 18. Hasil mereduksi harmonik menggunakan bank kapasitor

Setelah menghubungkan bank kapasitor, Pada Gambar 18 dapat dilihat dalam diagram garis, terdapat pengurangan nilai *Total Harmonic Distraction voltage* (THDv) secara signifikan yang semula dari 8.52% menjadi 3.61% dibawah standar yaitu 5%. Untuk nilai *Total Harmonic Distraction current* (THDi) yang awalnya 9.29% naik menjadi 10.71% namun kenaikan ini masih terbilang aman dari batas yang telah ditentukan yaitu sebesar 12%.



Gambar 19. Gambar gelombang tegangan sebelum (atas) dan sesudah (bawah) direduksi menggunakan bank kapasitor

Pemasangan bank kapasitor efektif mengubah gelombang tegangan beban harmonik yang awalnya terdistorsi menjadi gelombang sinusoidal yang lebih ideal.



Gambar 20. Gambar spektrum tegangan sebelum (atas) dan sesudah (bawah) direduksi menggunakan bank kapasitor

Terlihat jelas bahwa bank kapasitor berhasil menekan orde harmonik dominan (orde-3) dari 7.17% menjadi 2.02%, menunjukkan efektivitasnya dalam mengendalikan harmonik dan memastikan sistem beroperasi di bawah standar 3%.

**E. Efisiensi Sesudah dan Sebelum Penambahan VFD**

Untuk mengetahui perbedaan efisiensi motor induksi sebelum dan sesudah penggunaan VFD, akan digunakan data aktual perusahaan pada hari Selasa, 30 April sebagai acuan data sebelum penggunaan VFD yang telah dianalisis menggunakan Load Flow Analysis seperti pada Gambar 10. Data setelah penggunaan VFD akan mengacu pada Load Flow

Analysis pada single line diagram dengan penambahan VFD pada Gambar 12.

Perhitungan nilai efisiensi motor induksi akan mengacu pada (2), seperti berikut:

- 1) Efisiensi Motor Induksi Sebelum Penambahan VFD  
Dimana diketahui nilai dari daya masuk (Pin) sebesar 1500 kW dan daya keluar sebesar 1764 kw (Pout) maka

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\%$$

$$\eta = \frac{1764}{1500} \times 100\%$$

$$\eta = 85 \%$$

Jadi efisiensi motor iinduksi sebelum penambahan VFD yaitu 85%.

- 2) Efisiensi Motor Induksi Sesudah Penambahan VFD  
Dimana diketahui nilai dari daya masuk (Pin) sebesar 1500 kW dan daya keluar sebesar 1765 kw (Pout) maka

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\%$$

$$\eta = \frac{1765}{1500} \times 100\%$$

$$\eta = 84.98 \%$$

Jadi efisiensi motor iinduksi sebelum penambahan VFD yaitu 84.98%. Efisiensi motor induksi tetap stabil di angka 85% baik sebelum maupun setelah pemasangan VFD, menunjukkan bahwa penggunaan VFD tidak berdampak signifikan pada efisiensi motor. Oleh karena itu, kombinasi VFD dan bank kapasitor dapat menjadi solusi bagi perusahaan.

**V. SIMPULAN DAN SARAN**

**A. Simpulan**

Berdasarkan hasil analisis dan simulasi dari penelitian yang telah dilakukan, maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Penambahan *Variable Frequency Drive* (VFD) pada motor induksi 3 fase BFWP tidak memberikan dampak signifikan terhadap efisiensi motor. Efisiensi motor tetap stabil di angka 85% baik sebelum maupun setelah pemasangan VFD.
2. Penggunaan VFD menyebabkan distorsi harmonik pada sistem tenaga listrik, terutama pada orde ke-3. Namun, distorsi harmonik ini dapat dikurangi secara efektif dengan menggunakan bank kapasitor.
3. Pemasangan bank kapasitor 1500 kvar berhasil menekan nilai *Total Harmonic Distraction voltage* (THDv) dari 8.52% menjadi 3.61%, berada di bawah standar yang diizinkan yaitu 5%. Meskipun nilai *Total Harmonic Distortion Current* (THDi) sedikit



meningkat dari 9.29% menjadi 10.71%, namun masih dalam batas aman yang ditentukan yaitu 12%.

#### B. Saran

Berdasarkan hasil analisis dan simulasi dari penelitian, penulis menyarankan:

1. Perusahaan dapat mempertimbangkan penggunaan VFD pada motor induksi 3 fase BFWP untuk meningkatkan efisiensi dan fleksibilitas operasional, mengingat tidak adanya dampak negatif yang signifikan terhadap efisiensi motor.
2. Pemasangan bank kapasitor sangat dianjurkan untuk mengurangi distorsi harmonik yang disebabkan oleh VFD. Nilai bank kapasitor dapat disesuaikan berdasarkan analisis harmonik yang lebih detail untuk mencapai hasil yang optimal.
3. Perlu dilakukan pemantauan berkala terhadap kualitas daya listrik, terutama harmonik, untuk memastikan sistem tetap beroperasi dalam kondisi yang aman dan efisien. Jika diperlukan, dapat dilakukan penyesuaian nilai bank kapasitor atau tindakan korektif lainnya untuk menjaga kualitas daya listrik.
4. Penelitian lebih lanjut dapat dilakukan untuk mengidentifikasi potensi penghematan energi yang lebih besar dengan mengoptimalkan penggunaan VFD dan bank kapasitor. Selain itu, dapat dilakukan studi komprehensif mengenai dampak harmonik pada peralatan lain dalam sistem untuk memastikan kompatibilitas dan keandalan sistem secara keseluruhan.

#### REFERENSI

- [1] Operation Technology Inc., "ETAP Electrical Power System Analysis Software." [Online]. Available: <https://etap.com/>. [Accessed: 25-Jul-2024].
- [2] M. Amir dan A. I. Firdaus, "Studi Analisis Pengaruh Harmonik Akibat Penggunaan Variable Speed Drive Pada Motor Induksi Tiga Fase," *SINUSOIDA*, vol. 19, no. 2, hal. 48–67, 2017.
- [3] R. B. Nugraha, I. M. W. Kastawan, dan P. Raharjo, "Pengaruh carrier frequency VSD terhadap harmonik suplai daya listrik motor induksi 3-fase," *JITEL (Jurnal Ilm. Telekomun. Elektron. dan List. Tenaga)*, vol. 3, no. 2, hal. 121–126, 2023, doi: 10.35313/jitel.v3.i2.2023.121-126.
- [4] DEVIANTO, *Analisa Pengaruh Pembebanan Terhadap Parameter Listrik Dan Harmonik Motor Induksi Tiga Fase Sebagai Penggerak Elevator Gedung Kasuari Pt. Multi Prada Mandiri*, 1 ed. Universitas Semarang, 2021. [Online]. Available: <https://eskripsi.usm.ac.id/files/skripsi/C41A/2016/C.431.16.0007/C.431.16.0007-15-File-Komplit-20210303113454.pdf>. [Accessed: 25-Jul-2024].
- [5] H. Masoud, M. Ahmed, dan M. Fadel, "Harmonic analysis and mitigation techniques in industrial power systems," *J. Electr. Comput. Eng.*, vol. 1, no. 1, hal. 1–14, 2018.
- [6] I. S. Association, *519-2014-IEEE recommended practices and requirements for harmonic control in electric power systems*. New York: IEEE.
- [7] Tresna Umar Syamsuri, Harrij Mukti K., dan R. Duanaputri, "Analisis Penggunaan Variable Speed Drive (VSD) pada Motor Kompresor," *ELPOSYS J. Sist. Kelistrikan*, vol. 8, no. 3, hal. 72–75, Des 2021, doi:10.33795/elposys.v8i3.82.
- [8] G. Arrachman, "Analisis Pengendalian Kecepatan Putaran Motor Induksi 3 Fase Terhadap Penghematan Energi Menggunakan Variable Speed Drive Pada PLTGU Tanjung Batu". Samarinda, 2019.
- [9] S. Buyung, "Analisis perbandingan daya dan torsi pada alat pemotong rumput elektrik (apre)," *J. Voering*, vol. 3, no. 1, hal. 1–4, 2018.
- [10] L. M. Hayusman, T. Hidayat, C. Saleh, I. M. Wartana, dan T. Herbasuki, "Pelatihan Software ETAP (Electrical Transient Analyzer Program) Bagi Siswa dan Guru SMK Nasional Malang," *Ind. Inov. J. Tek. Ind.*, vol. 7, no. 1, hal. 7–11, 2017, [Online]. Available: <https://ejournal.itn.ac.id/index.php/industri/article/view/856>. [Accessed: 25-Jul-2024].
- [11] Kusumawardhani, "Analisis Perbaikan Faktor Daya dengan Menggunakan Kapasitor Bank pada PT. PLN (Persero) UP3 Semarang," *Jurnal Teknik Elektro*, vol. 10, no. 2, pp. 77-84, 2021. [Online]. Available: <https://journal.uta45jakarta.ac.id/index.php/JKTE/article/view/1056>. [Accessed: 25-Jul-2024].