Analisis Efisiensi Energi dan Kualitas Daya Pada Sistem Pompa Distribusi Air Berbasis VSD (Studi Kasus: Efisiensi Energi Listrik)

Heri Budi Utomo[1], Muhammad Salman Hanif[2]

[1]Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Bandung, Bandung 40012. E-mail: hbu@polban.ac.id
[2]Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Bandung, Bandung 40012. E-mail: salman.hanif@mahasiswa.poban.ac.id

ABSTRAK

Pompa distribusi merupakan beban listrik dominan pada instalasi pengolahan air minum, sehingga efisiensinya berpengaruh terhadap konsumsi energi dan biaya operasional. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi efisiensi sistem, Specific Energy Consumption (SEC), dan kualitas daya listrik pada tiga unit pompa distribusi berbasis Variable Speed Drive (VSD) di instalasi pengolahan air minum. Data diperoleh melalui pengukuran lapangan menggunakan Power Quality Analyzer serta parameter hidrolis (debit dan head), kemudian dianalisis untuk memperoleh efisiensi total, SEC aktual, dan parameter kualitas daya (faktor daya, ketidakseimbangan tegangan/arus, serta distorsi harmonik). Perbedaan efisiensi antar pompa diuji menggunakan One-Way ANOVA. Hasil menunjukkan SEC aktual rata-rata 0,2823 kWh/m³, di bawah ambang batas acuan 0,4 kWh/m³. Efisiensi total tertinggi dicapai Pompa 1 (61,36% siang; 59,37% malam), sedangkan Pompa 2 dan Pompa 3 berada di bawah standar 60%. Uji ANOVA menunjukkan perbedaan efisiensi antar pompa signifikan (Sig. = 0,039). Faktor daya hanya memenuhi standar pada Panel Utama siang hari (0,87), ketidakseimbangan arus mencapai 31,8% malam hari, dan Total Demand Distortion (TDD) arus melebihi batas IEEE 519-2022 di seluruh fase, tertinggi 44,43% pada Fase 2 malam hari. Hasil ini mengindikasikan perlunya optimasi setpoint VSD dan mitigasi kualitas daya untuk meningkatkan keandalan dan efisiensi sistem.

Kata Kunci
Audit energi, efisiensi pompa, SEC, kualitas daya, VSD

Distribution pumps are a dominant electrical load in drinking water treatment plants, so their efficiency affects energy consumption and operational costs. This study evaluates system efficiency, Specific Energy Consumption (SEC), and power quality of three VSD-based distribution pumps at a drinking water treatment plant. Data were collected through field measurements using a Power Quality Analyzer and hydraulic parameters (flow rate and head), then analyzed to obtain total efficiency, actual SEC, and power quality parameters (power factor, voltage/current unbalance, and harmonic distortion). Efficiency differences among pumps were tested using One-Way ANOVA. Results showed an average actual SEC of 0.2823 kWh/m³, below the 0.4 kWh/m³ reference threshold. The highest efficiency was achieved by Pump 1 (61.36% daytime; 59.37% at night), while Pumps 2 and 3 remained below the 60% standard. ANOVA showed the efficiency differences among pumps were statistically significant (Sig. = 0.039). Power factor only met the standard at the Main Panel during daytime (0.87), current unbalance reached 31.8% at night, and current Total Demand Distortion (TDD) exceeded the IEEE 519-2022 limit across all phases, peaking at 44.43% on Phase 2. These findings indicate the need for VSD setpoint optimization and power quality mitigation to improve system reliability.

Keywords
Energy audit, pump efficiency, SEC, power quality, VSD

1. PENDAHULUAN

Pompa distribusi air merupakan salah satu beban listrik dominan pada instalasi pengolahan air minum, sehingga efisiensi operasinya berkaitan langsung dengan besarnya konsumsi energi listrik dan biaya operasional yang ditanggung perusahaan air minum. Ketidakefisienan pada sistem pompa dapat disebabkan oleh berbagai faktor, mulai dari komponen mekanis hingga kondisi kelistrikan yang tidak ideal.

Berbagai penelitian audit energi pada pompa distribusi air telah dilakukan pada instalasi PDAM/Perumda di beberapa kota, antara lain di Kota Pontianak (1), Kota Semarang (2), Kota Surabaya (3), Kota Banjarmasin (4), dan Kota Denpasar (5), yang secara umum berfokus pada perhitungan efisiensi pompa dan Specific Energy Consumption (SEC). Beberapa penelitian lain juga membahas nilai acuan SEC

pada instalasi pompa sejenis (6) serta evaluasi kinerja pompa sentrifugal pada sistem pemompaan (7), sementara audit energi motor induksi dibahas pada (8).

Penerapan Variable Speed Drive (VSD) terbukti memberikan dampak signifikan terhadap optimalisasi daya, yang secara prinsip mekanika fluida mengikuti hukum afinitas (9). Namun demikian, sebagian besar penelitian tersebut belum menyertakan evaluasi kualitas daya listrik secara menyeluruh sebagai bagian dari evaluasi sistem pompa berbasis Variable Speed Drive (VSD), padahal VSD dikenal dapat menimbulkan distorsi harmonik dan ketidakseimbangan arus yang berpotensi menurunkan keandalan sistem (10). Standar IEEE 519-2022 menetapkan batas distorsi harmonik yang diperkenankan pada sistem tenaga listrik (11), sementara ketidakseimbangan tegangan/arus juga menjadi perhatian dalam berbagai studi kualitas daya (12).

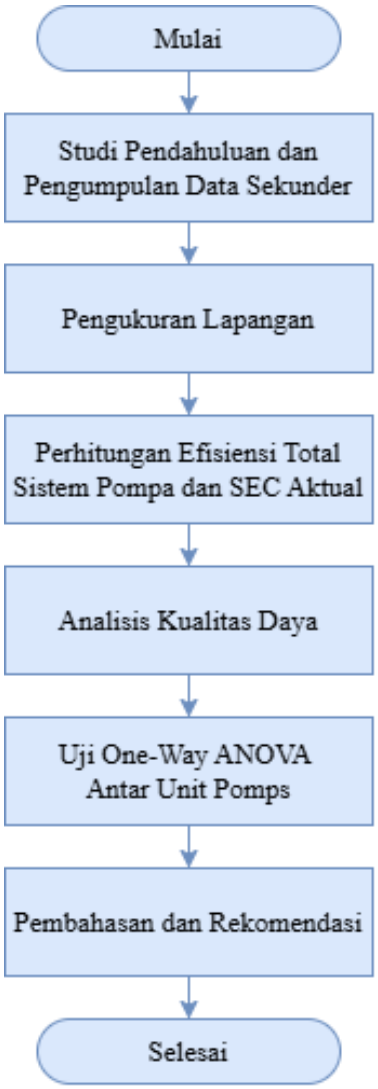
Salah satu kualitas daya yang sering terlupakan dari sistem berbasis VSD adalah faktor daya leading (mendahului), yaitu kondisi arus mendahului tegangan akibat karakteristik kapasitif rangkaian penyearah dan kapasitor DC bus pada VSD, terutama saat pompa beroperasi pada beban rendah. Kondisi ini berbeda dengan faktor daya lagging yang umum dibahas pada beban induktif konvensional, sehingga strategi perbaikannya pun berbeda dan berpotensi masih dapat dioptimalkan melalui penyesuaian parameter operasi VSD maupun kompensasi daya reaktif yang tepat, bukan sekadar pemasangan kapasitor bank statis yang justru dapat memperburuk kondisi leading (13).

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengintegrasikan pengukuran efisiensi sistem pompa, perhitungan SEC, uji statistik (One-Way ANOVA) antar unit pompa, serta evaluasi kualitas daya listrik (faktor daya termasuk fenomena leading, ketidakseimbangan tegangan/arus, dan distorsi harmonik) pada sistem pompa distribusi berbasis VSD di instalasi pengolahan air minum, sehingga diperoleh gambaran performa sistem yang lebih komprehensif dibandingkan penelitian audit energi pompa sejenis sebelumnya.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian dilaksanakan di Instalasi Pengolahan Air di salah satu wilayah Kabupaten Bandung, pada tiga unit pompa sentrifugal berdaya 11 kW (efisiensi IE3) yang dilengkapi VSD. Pola operasi terdiri atas dua pompa yang beroperasi pada kondisi siang (frekuensi 50 Hz, pukul 03.00-22.00) dan satu pompa pada kondisi malam (frekuensi 40 Hz, pukul 22.00-03.00). Penugasan pompa yang beroperasi pada kondisi malam dirotasi setiap hari secara bergantian.

Data yang digunakan terdiri atas data sekunder berupa rekening listrik PLN dan volume produksi air tahun 2025, serta data primer hasil pengukuran lapangan menggunakan Power Quality Analyzer untuk parameter kelistrikan, dan pengukuran debit serta head untuk parameter hidrolis. Tahapan penelitian secara ringkas disajikan pada Gambar 1.



Gambar 1. Tahapan penelitian

Efisiensi total sistem pompa (ηt) dihitung dari perkalian efisiensi motor (ηm) dan efisiensi pompa (ηp) sebagaimana persamaan (1), sedangkan SEC aktual dihitung dari rasio energi listrik yang dikonsumsi terhadap volume air yang didistribusikan sebagaimana persamaan (2).

$$\eta t = \frac{(\text{P hidrolik})}{(\text{P input})} \times 100\% \quad (1)$$

$$\text{SEC} = \frac{\text{E konsumsi}}{\text{V produksi}} \quad (2)$$

Kedua persamaan beserta kriteria evaluasinya ($\eta t \geq 60\%$ dikategorikan baik) mengacu pada kriteria evaluasi efisiensi pompa PDAM yang umum digunakan dalam audit energi instalasi air minum (14).

Pengukuran parameter kelistrikan dilakukan pada Panel Utama dan masing-masing pompa menggunakan Power Quality Analyzer dengan interval perekaman 10 menit selama periode operasi siang dan malam hari, mencakup tegangan, arus, daya, faktor daya, serta harmonik.

Perbedaan efisiensi antar pompa diuji menggunakan One-Way ANOVA dengan bantuan perangkat lunak SPSS.

Evaluasi kualitas daya mengacu pada parameter faktor daya (PF), ketidakseimbangan tegangan/arus (NEMA/ANSI), Total Harmonic Distortion tegangan (THD-V), dan Total Demand Distortion arus (TDD) yang dibandingkan terhadap batas IEEE 519-2022 (11). Faktor daya dihitung sebagaimana persamaan (3), dengan tanda leading atau lagging ditentukan dari sudut fasa antara arus dan tegangan. Ketidakseimbangan tegangan/arus dihitung menggunakan metode deviasi maksimum terhadap rata-rata sebagaimana persamaan (4), sedangkan TDD arus dihitung sebagaimana persamaan (5).

$$\mathrm{PF} = \frac{P}{S} = \cos\varphi \tag{3}$$

$$\text{Unbalance (\%)} = \frac{\text{Deviasi maks. terhadap rata2}}{\text{Rata2}} \text{ x } 100\% \tag{4}$$

$$\mathrm{TDD} = \left(\frac{\sqrt{\Sigma\, \mathrm{Ih}^2}}{\mathrm{IL}}\right) \times 100\% \tag{5}$$

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Profil Beban dan Specific Energy Consumption

Berdasarkan data historis tahun 2025, konsumsi energi total tercatat 236.545,60 kWh dengan volume produksi 326.377 m³, sehingga diperoleh Intensitas Konsumsi Energi (IKE) rata-rata sebesar 0,725 kWh/m³. Nilai ini termasuk kategori boros berdasarkan baseline internal, dengan kecenderungan meningkat sejak bulan Juni sebagaimana disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Rekapitulasi IKE bulanan tahun 2025 (April-Juli)

Bulan	Energi (kWh)	Produksi (m³)	IKE (kWh/m³)
April	18.920	27.150	0,697
Mei	19.145	26.980	0,710
Juni	20.310	25.640	0,792
Juli	21.480	24.980	0,860

Tabel 1 menyajikan cuplikan data rekapitulasi pada periode April hingga Juli untuk menyoroti tren peningkatan pemborosan energi (IKE). Kenaikan IKE sejak bulan Juni sejalan dengan penurunan volume produksi air, sehingga beban listrik yang relatif tetap (terutama akibat konsumsi daya pada kondisi beban rendah) terbagi pada volume produksi yang lebih kecil. Hal ini juga berkaitan dengan kondisi faktor daya leading yang dibahas pada bagian 3.3, karena efisiensi rendah pada beban ringan turut menyumbang pemborosan energi.

Adapun SEC aktual hasil pengukuran langsung pada sistem pompa distribusi diperoleh rata-rata 0,2823 kWh/m³, berada di bawah ambang batas acuan 0,4 kWh/m³ sehingga termasuk kategori baik. Perbedaan antara IKE historis dan SEC aktual disebabkan cakupan IKE yang meliputi seluruh beban instalasi (termasuk pompa intake dan penerangan), sedangkan SEC hanya mencakup pompa distribusi. Perbedaan ini menegaskan pentingnya melakukan audit energi yang terpilah per subsistem, bukan hanya pada tingkat instalasi secara keseluruhan, agar upaya efisiensi dapat diarahkan secara lebih tepat sasaran.

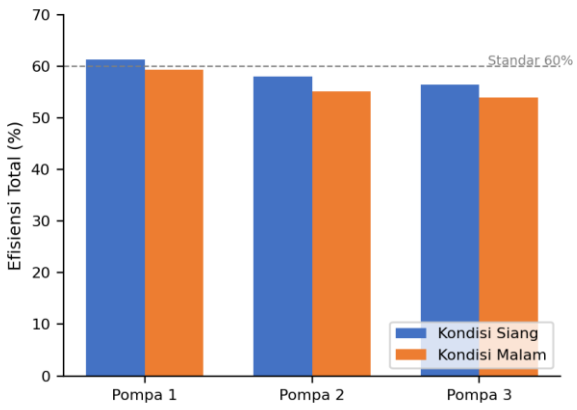
3.2 Efisiensi Sistem Pompa dan Analisis Statistik

Tabel 2 menyajikan rekapitulasi efisiensi total sistem pompa pada kondisi siang dan malam hari.

Tabel 2. Efisiensi total sistem pompa

Pompa	ηt Siang (%)	ηt Malam (%)	Ket.
Pompa 1	61,36	59,37	Baik
Pompa 2	58,10	55,20	Kurang
Pompa 3	56,42	53,95	Kurang

Pompa 1 secara konsisten menunjukkan efisiensi tertinggi, sedangkan Pompa 2 dan Pompa 3 berada di bawah standar acuan 60%, terutama pada kondisi malam hari. Gambar 2 memperlihatkan perbandingan efisiensi total ketiga pompa.



Gambar 2. Perbandingan efisiensi total sistem pompa

Berdasarkan data tersebut, Pompa 1 secara konsisten menunjukkan efisiensi tertinggi (61,36% pada siang hari) dan nyaris memenuhi standar acuan pada kondisi malam hari (59,37%). Sementara itu, Pompa 2 dan Pompa 3 beroperasi jauh di bawah standar acuan 60% pada kedua kondisi operasi.

Tabel 3. Statistik deskriptif efisiensi total sistem pompa

Pompa	Rata-rata (%)	Std. Dev.
Pompa 1	60,37	1,41
Pompa 2	56,65	2,05
Pompa 3	55,19	2,63

Hasil uji One-Way ANOVA dari keseluruhan data pengukuran aktual per unit pompa menunjukkan nilai signifikansi sebesar 0,039 (< 0,05). Hal ini berarti terdapat perbedaan efisiensi yang signifikan secara statistik antar ketiga unit pompa, meskipun ketiganya memiliki spesifikasi teknis yang sama. Pompa 3 menunjukkan simpangan baku tertinggi (2,63), mengindikasikan fluktuasi kondisi operasi yang lebih besar dibandingkan pompa lainnya selama periode pengamatan.

3.3 Kualitas Daya Listrik

Kualitas daya listrik dikatakan baik apabila tegangan, arus, dan frekuensi sistem relatif konstan tanpa perubahan signifikan (15). Tabel 4 merangkum parameter kualitas daya listrik pada Panel Utama.

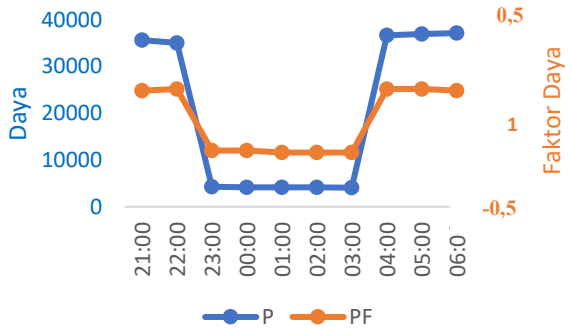
Tabel 4. Parameter kualitas daya listrik Panel Utama

Parameter	Siang	Malam	Batas
Faktor daya	0,87 (lagging)	0,79 (leading)*	≥ 0,85
Unbalance arus (%)	6,7-9,0	31,8	5-10
THD-V (%)	2,1	2,2	< 8
TDD-I (%)	25-27	44,43**	< 15

** faktor daya bersifat leading (bukan lagging) akibat karakteristik kapasitif VSD pada beban rendah, sehingga meskipun 0,85, kondisi ini tetap tidak dalam kondisi normal; ** nilai tertinggi pada Fase 2 malam hari; nilai rentang pada kolom siang mencerminkan variasi karena dua pompa beroperasi bersamaan, sedangkan kondisi malam menggunakan satu pompa.*

3.3.1 Faktor Daya Leading pada Kondisi Beban Rendah

Faktor daya hanya memenuhi standar acuan (≥0,85) secara konsisten pada kondisi siang hari dengan sifat lagging yang umum dijumpai pada beban motor induksi. Pada kondisi malam hari, faktor daya berubah menjadi leading, yaitu arus mendahului tegangan, pada kisaran 0,79 meskipun demikian, sifat leading ini tetap tidak dapat dikatakan kondisi yang baik, sehingga kondisi malam hari tetap dikategorikan perlu penanganan. Gambar 3 memperlihatkan hubungan antara faktor daya dan faktor pembebanan pompa sepanjang periode pengukuran.



Gambar 3. Hubungan faktor daya dan faktor pembebanan Pompa

Fenomena leading ini terjadi karena rangkaian penyearah (rectifier) dan kapasitor DC bus pada VSD bersifat kapasitif terhadap jaringan suplai, khususnya ketika arus beban motor menurun signifikan pada operasi frekuensi rendah (40 Hz) dan faktor pembebanan di bawah 40%. Pada kondisi tersebut, komponen reaktif kapasitif dari sisi VSD menjadi lebih dominan dibandingkan komponen induktif motor, sehingga total faktor daya sistem bergeser ke arah leading.

Kondisi faktor daya leading ini masih dapat dimaksimalkan atau diperbaiki melalui beberapa pendekatan. Pertama, penyesuaian setpoint frekuensi minimum VSD agar pompa malam tidak beroperasi terlalu jauh dari titik efisiensi optimalnya, sehingga faktor pembebanan tetap terjaga pada rentang yang tidak memicu dominasi kapasitif berlebih. Kedua, evaluasi ukuran dan strategi pengendalian kompensasi daya reaktif secara dinamis (automatic power factor correction) yang responsif terhadap perubahan arah faktor daya, mengingat pemasangan kapasitor bank statis konvensional justru berisiko memperparah kondisi leading alih-alih memperbaikinya. Ketiga, koordinasi antara pengaturan VSD dan kapasitas motor terpasang, karena motor yang jauh lebih besar dari kebutuhan beban aktual akan memperbesar rentang operasi beban rendah yang rentan terhadap fenomena ini. Dengan optimasi tersebut, faktor daya sistem berpotensi dipertahankan mendekati satu pada seluruh kondisi operasi, baik siang maupun malam hari, sehingga turut mengurangi rugi-rugi jaringan dan meningkatkan efisiensi pemanfaatan daya secara keseluruhan.

3.3.2 Ketidakseimbangan Tegangan dan Arus

Ketidakseimbangan tegangan pada seluruh titik pengukuran berada dalam batas aman (<1%), namun ketidakseimbangan arus pada malam hari mencapai 31,8%, jauh melampaui batas standar 5%. Ketidakseimbangan arus yang tinggi ini konsisten dengan rendahnya faktor pembebanan pada malam hari, di mana ketimpangan kecil pada distribusi arus antar fasa menjadi lebih menonjol secara persentase ketika arus total yang mengalir relatif kecil.

3.3.3 Distorsi Harmonik

Distorsi harmonik tegangan (THD-V) berada dalam batas aman (<8%), tetapi Total Demand Distortion arus (TDD-I) melebihi batas IEEE 519-2022 sebesar 15% pada seluruh fase dan kondisi operasi, dengan nilai tertinggi 44,43% pada Fase 2 malam hari, dan orde harmonik dominan pada orde ke-5 dan ke-7 yang merupakan ciri khas beban non-linier seperti VSD.

Kondisi ketidakseimbangan arus dan distorsi harmonik yang tinggi berisiko pemanasan berlebih pada motor dan kabel penghantar, penurunan umur pakai peralatan, serta potensi gangguan pada peralatan elektronik sensitif di sekitar panel. Mitigasi yang dapat dipertimbangkan antara lain optimasi setpoint VSD pada kondisi beban rendah, pemasangan line reactor atau passive harmonic filter, serta evaluasi kompensasi daya reaktif dinamis sebagaimana dibahas pada bagian 3.3.1.

3.4 Pembahasan Terintegrasi

Secara keseluruhan, temuan pada penelitian ini menunjukkan keterkaitan antara efisiensi mekanis pompa, faktor pembebanan, dan kualitas daya listrik. Efisiensi total yang lebih rendah pada Pompa 2 dan Pompa 3, khususnya pada kondisi malam hari, tidak hanya disebabkan oleh faktor mekanis, tetapi juga berkaitan dengan kondisi kelistrikan yang kurang optimal, yaitu faktor daya leading, ketidakseimbangan arus yang tinggi, dan distorsi harmonik yang melebihi standar. Ketiga aspek kualitas daya tersebut saling terkait: faktor pembebanan rendah pada malam hari

memicu faktor daya leading, yang dapat memperbesar persentase ketidakseimbangan arus dan mendukung komponen harmonik pada spektrum arus. Oleh karena itu, strategi perbaikan yang paling efektif, yaitu optimasi setpoint operasi VSD untuk menjaga faktor pembebanan pada rentang yang efisien, disertai kompensasi daya reaktif dinamis dan mitigasi harmonik, dibandingkan hanya menangani salah satu aspek secara terpisah.

3.5 Keterbatasan Penelitian

Penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan yang perlu menjadi perhatian pada pengembangan selanjutnya. Pertama, pengukuran kualitas daya dan parameter hidrolis hanya dilakukan pada satu instalasi pengolahan air minum dalam rentang waktu terbatas, sehingga hasil yang diperoleh belum tentu merepresentasikan kondisi pada instalasi lain dengan karakteristik beban yang berbeda. Kedua, evaluasi kualitas daya belum mencakup pengukuran jangka panjang yang dapat menangkap variasi faktor pembebanan akibat fluktuasi kebutuhan air sepanjang tahun. Ketiga, penelitian ini belum menguji secara langsung efektivitas strategi mitigasi yang direkomendasikan (optimasi setpoint VSD, kompensasi daya reaktif dinamis, dan pemasangan filter harmonik), sehingga besaran perbaikan kualitas daya dan efisiensi yang dapat dicapai masih bersifat estimatif. Penelitian lanjutan disarankan untuk melakukan pengukuran multi-lokasi dan multi-musim, serta menguji langsung penerapan strategi mitigasi tersebut pada sistem pompa distribusi berbasis VSD guna memvalidasi manfaatnya secara kuantitatif.

4. KESIMPULAN

Efisiensi total sistem pompa tertinggi dicapai oleh Pompa 1 (61,36% siang; 59,37% malam), sedangkan Pompa 2 dan Pompa 3 berada di bawah standar acuan 60%, dengan perbedaan yang terbukti signifikan secara statistik melalui uji One-Way ANOVA (Sig. = 0,039). SEC aktual rata-rata sebesar 0,2823 kWh/m³ termasuk kategori baik karena berada di bawah ambang batas 0,4 kWh/m³.

Dari sisi kualitas daya, faktor daya bersifat lagging dan memenuhi standar (≥0,85) pada kondisi siang, namun berubah menjadi leading pada kondisi malam hari akibat karakteristik kapasitif VSD saat faktor pembebanan rendah. Kondisi leading tersebut masih berpotensi dimaksimalkan melalui optimasi setpoint frekuensi VSD, penerapan kompensasi daya reaktif dinamis, serta koordinasi kapasitas motor terhadap beban aktual, alih-alih pemasangan kapasitor bank statis yang berisiko memperburuk kondisi leading. Ketidakseimbangan arus pada malam hari melampaui batas standar hingga 31,8%, dan TDD arus melebihi batas IEEE 519-2022 di seluruh fase dan kondisi operasi, dengan ketiga persoalan kualitas daya tersebut saling berkaitan dan bersumber pada kondisi faktor pembebanan rendah pada malam hari.

Berdasarkan temuan tersebut, direkomendasikan optimasi setpoint VSD pada kondisi beban rendah, penerapan kompensasi daya reaktif dinamis untuk memperbaiki faktor daya leading, mitigasi harmonik melalui line reactor atau passive harmonic filter, serta pemeriksaan preventif pada Pompa 2 dan Pompa 3 untuk meningkatkan efisiensi dan keandalan sistem pompa distribusi secara keseluruhan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Perumda Air Minum Tirta Raharja atas izin dan dukungan data untuk keperluan penelitian ini, serta kepada teknisi laboratorium SDTL POLBAN.

DAFTAR PUSTAKA

1. Alsey FK, Junaidi AM. Audit energi listrik pada Perusahaan Daerah Air Minum (PDAM) Tirta Khatulistiwa. J Tek Elektro Univ Tanjungpura. 2019;7.
2. Wahab GG, Nurhayati E. Audit Energi Awal Pada Pompa Distribusi Sampangan dan Pompa Transport Kaligarang Perumda Air Minum Tirta Moedal Kota Semarang. J Serambi Eng. 2024;9(4):10999-11005.
3. Rifaldi R, Masduqi A. Audit Energi Awal Pada Rumah Pompa Kandangan PDAM Surya Sembada Kota Surabaya. J Darma Agung. 2024:583-590.
4. Alam AR, Yuniarto A. Audit Energi Sederhana Pada Pompa Distribusi IPA 2 Pramuka PAM Bandarmasih Kota Banjarmasin. 2024;9(4):11326-11332.
5. Arif MN, Soedjono ES. Audit Energi Awal Pada Pompa Distribusi IPA Waribang II Perumda Air Minum Tirta Sewakadarma Kota Denpasar. J Serambi Eng. 2025;10(3):14772-14779.
6. Constantya Q, Slamet A. Analisis Peluang Peningkatan Efisiensi Energi Pada Instalasi Pompa Wendit 3 Perumda Air Minum Tugu Tirta Kota Malang. 2021;6(11):6.
7. Rumaherang WM, Refwalu C, Tupamahu CSE, Sarwuna SJE, Rumaherang EJ. Evaluasi Kinerja Pompa Sentrifugal Berkapasitas 600 KL/Hr pada Sistem Pemompaan Minyak. J METIKS. 2023;3(1):17-27.
8. Setiadji JS, Tanoto Y. Audit Energi Tipe-1 Motor Induksi TEFC: Studi Kasus pada Perusahaan Industri Makanan Ringan di Jawa Timur. J Ilm Elektrotek. 2025;24(2):177-188.
9. Juliansyah F, Fatkhurrokhman M. Perancangan Panel Kontrol Pengendali Kecepatan Motor Induksi AC 3 Fase dengan Menggunakan VSD. 2026;4(1).
10. Zabihi A, Badesa L, Hernandez A. Evaluation of Voltage Unbalance Metrics in Distribution Networks with High DER Penetration. 2025.
11. IEEE Power and Energy Society. IEEE Standard for Harmonic Control in Electric Power Systems (IEEE Std 519-2022). 2022.
12. Sinuraya EW, Soemantri M. Evaluation and Mitigation of Voltage and Current Unbalance at MSTP Undip Jepara. 2022.
13. Singh N, Yadav M. Power Quality Issue, Solution and Analysis: DFIG. 2022.
14. Marthen R, Slamet A. Audit Energi Awal Pompa Booster Makarya PERUMDA Delta Tirta Kabupaten Sidoarjo. J Teknol Lingkung Lahan Basah. 2024;12(4):927-933.
15. Brilliantie D, Rusda. Analisis Kualitas Daya Listrik Gedung Direktorat Politeknik Negeri Samarinda. J Electr Eng. 2024;5(1).