

Studi Pengaruh Metode Pengendalian Motor Terhadap Konsumsi Energi Pada Sistem *Cooling Tower*

Andina Meilani Putri¹, Rishal Asri^{2*}, Putty Yunesti³

^{1,2,3}Program Studi Teknik Sistem Energi, Institut Teknologi Sumatera

^{1,2,3}Jln. Terusan Ryacudu, Way Huwi, Kecamatan Jati Agung, Kabupaten Lampung Selatan, Lampung 35365, Indonesia

E-mail: andinameilaniputri3105@gmail.com¹, rishal.asri@tse.itera.ac.id², putty.yunesti@tse.itera.ac.id³

Abstrak

Info Naskah:

Naskah masuk: 29 Mei 2025

Direvisi: 30 Juni 2025

Diterima: 11 Juli 2025

Motor fan pada *cooling tower* umumnya masih menggunakan sistem *direct-on-line* (DOL) dengan kecepatan tetap, yang menyebabkan konsumsi energi tinggi. Penelitian ini bertujuan membandingkan konsumsi energi antara sistem DOL dan *variable speed drive* (VSD), serta mengevaluasi kelayakan ekonominya. Metode pendekatan kuantitatif digunakan melalui analisis data operasional dan simulasi *MATLAB simulink*. Dua skenario diuji, yaitu pengoperasian penuh dengan DOL dan VSD. Hasil simulasi menunjukkan bahwa VSD mampu menurunkan konsumsi energi sebesar 22,08 tanpa menurunkan efisiensi pendinginan. Evaluasi ekonomi dilakukan melalui perhitungan *payback period* berdasarkan biaya investasi dan penghematan energi tahunan. Hasil menunjukkan bahwa VSD layak diterapkan secara bertahap sebagai strategi efisiensi energi pada sistem pendinginan beban tinggi.

Abstract

Keywords:

cooling tower;
energy efficiency;
electrical energy;
consumption.

Cooling tower fan motors commonly still operate using a *direct-on-line* (DOL) system with constant speed, which leads to high energy consumption. This study aims to compare the energy consumption between the DOL system and the *variable speed drive* (VSD), as well as to evaluate their economic feasibility. A quantitative approach is applied through operational data analysis and simulations using *MATLAB Simulink*. Two operating scenarios are tested: full operation using DOL and using VSD. The simulation results showed that VSD was able to reduce energy consumption by 22.08 without reducing cooling efficiency. The economic evaluation is carried out through a *payback period* analysis based on investment costs and annual energy savings. These findings demonstrate that VSD is economically viable and can be gradually implemented as an energy efficiency strategy in high-load cooling systems.

*Penulis korespondensi:

Rishal Asri

E-mail: rishal.asri@tse.itera.ac.id

1. Pendahuluan

Energi listrik memiliki peran penting dalam berbagai aspek kehidupan mulai dari sektor industri, transportasi, hingga kebutuhan rumah tangga. Permintaan listrik di Indonesia terus meningkat setiap tahunnya, seiring dengan pertumbuhan populasi dan meningkatnya aktivitas ekonomi. Data dari Direktorat Jenderal Energi Baru Terbarukan dan Konservasi Energi (EBTKE) menunjukkan bahwa konsumsi listrik di Indonesia pada tahun 2024 telah mencapai 1.411 kWh/kapita, meningkat dari 1.337 kWh/kapita pada tahun 2023 [1]. Kenaikan ini menunjukkan bahwa kebutuhan energi listrik semakin mendesak, dan jika tidak diimbangi dengan penyediaan energi yang berkelanjutan, Indonesia berisiko menghadapi krisis energi di masa depan.

Indonesia sampai saat ini masih menggunakan energi fosil sebagai sumber utama dalam pembangkitan listrik, yang menyumbang sekitar 89,1% dari total konsumsi energi [2]. Ketergantungan ini tidak hanya berpotensi mengakibatkan kehabisan sumber daya, tetapi juga berkontribusi pada dampak lingkungan yang negatif, seperti emisi gas rumah kaca. Oleh karena itu, Indonesia perlu mengoptimalkan pemanfaatan serta pengembangan sumber energi baru terbarukan (EBT), yang saat ini hanya digunakan sebesar 10,9% dari total konsumsi energi sebagai alternatif yang lebih berkelanjutan [3]. Energi baru terbarukan (EBT) merupakan energi yang berasal dari sumber daya alam yang dapat diperbarui secara terus-menerus, seperti energi panas bumi, air, matahari, angin, dan biomassa [4].

Salah satu sumber energi baru terbarukan dengan potensi terbesar di Indonesia adalah energi panas bumi. Panas bumi merupakan sumber energi berasal dari panas yang tersimpan di dalam bumi. Indonesia memiliki cadangan energi panas bumi diperkirakan mencapai sekitar 23.965,5 megawatt (MW), atau sekitar 40% dari potensi global [5]. Pemanfaatan energi panas bumi di Indonesia telah dimulai sejak tahun 1983, dan sejak saat itu pengembangannya terus dilakukan ke berbagai wilayah di Indonesia [6]. Salah satu bentuk implementasi pemanfaatan energi ini adalah dengan adanya Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) Ulubelu Tanggamus Unit 1 dan 2, yang masing-masing dirancang dengan kapasitas 55 MW dan mulai beroperasi pada tahun 2012.

Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) adalah teknologi yang memanfaatkan energi panas dari dalam bumi untuk menghasilkan listrik. Prinsip kerjanya serupa dengan Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) dalam hal operasi dasar. Perbedaan utama terletak pada sumber uap yang digunakan, di mana PLTU memproduksi uap secara buatan di permukaan melalui boiler, sementara PLTP memanfaatkan uap yang terbentuk secara alami di bawah permukaan bumi. PLTP mengambil keuntungan dari energi panas bumi yang tersedia langsung dari dalam bumi, tanpa perlu menciptakan uap secara manual seperti yang dilakukan di PLTU [7].

Penggunaan energi listrik menjadi salah satu faktor utama untuk menjaga keberlanjutan serta mengoptimalkan kinerja operasional pembangkit. Salah satu komponen penting yang mempengaruhi efisiensi tersebut yaitu *cooling tower* atau menara pendingin, yang berfungsi dalam menurunkan suhu air kondensat sebelum digunakan kembali

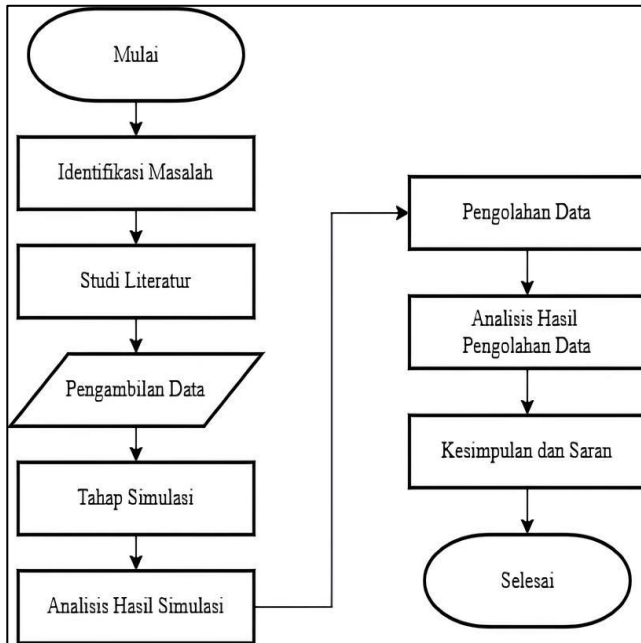
dalam sistem. Bagian penting dari *cooling tower* adalah motor *fan*, yang digunakan untuk menggerakkan kipas (*fan*) dalam mendinginkan air kondensat melalui proses penguapan yang dilepaskan ke atmosfer [8]. Motor *fan cooling tower* ini merupakan salah satu beban listrik terbesar di *circulating water system*, sehingga konsumsi energi listriknya perlu dioptimalkan. Penggunaan energi listrik yang tidak optimal pada motor *fan cooling tower* dapat menyebabkan konsumsi energi berlebih (*overconsumption*), yang pada akhirnya menurunkan efisiensi sistem pembangkit dan meningkatkan biaya operasional [9].

Efisiensi pendinginan di *cooling tower* dipengaruhi oleh berbagai faktor, seperti suhu lingkungan, kelembapan udara, dan beban pembangkit [10]. Pada saat suhu air kondensat telah sesuai kebutuhan, motor *fan cooling tower* seharusnya dapat beroperasi pada kecepatan yang lebih rendah guna mengoptimalkan konsumsi energi listrik, namun pada kondisi eksisting di Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) Ulubelu Tanggamus penggunaan sistem *direct on-line* (DOL) dengan komponen kontaktor pada motor *fan cooling tower* membuat pengaturan kecepatan menjadi tidak fleksibel. Sistem ini hanya memungkinkan operasi motor *fan cooling tower* secara *on* atau *off*, sehingga motor bekerja pada kapasitas penuh atau mati sepenuhnya. Kondisi ini juga menyebabkan arus beban puncak ketika *starting*, yang mengakibatkan konsumsi energi listrik menjadi lebih tinggi [11].

Salah satu solusi yang dapat diterapkan untuk mengatasi permasalahan tersebut adalah dengan menerapkan penggunaan metode kontrol kecepatan motor yang lebih fleksibel dan efisien, seperti *variable speed drive* (VSD). Pada beberapa studi penelitian, menunjukkan bahwa penggunaan VSD mampu meningkatkan efisiensi energi serta mengurangi lonjakan arus *starting* [12], [13], [14], [15]. Oleh karena itu, penelitian ini berjudul Analisis Konsumsi Energi Listrik Pada Motor *Fan Cooling tower* di PLTP Ulubelu Tanggamus, yang akan membandingkan konsumsi energi listrik antara penggunaan metode kontaktor dengan penggunaan metode *variable speed drive* (VSD), serta mengevaluasi biaya investasi pemasangan VSD berdasarkan penghematan biaya energi listrik yang dicapai. Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat meningkatkan efisiensi operasional di PLTP Ulubelu Tanggamus serta memberikan kontribusi signifikan dalam pengembangan strategi pengelolaan konsumsi energi yang lebih efektif di sektor pembangkit listrik secara keseluruhan.

2. Metode

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan metode analisis komparatif untuk membandingkan konsumsi energi listrik antara penggunaan kontaktor (*direct-on-line*/DOL) dan *variable speed drive* (VSD) pada motor *fan cooling tower* di PLTP Ulubelu, Unit 1 dan Unit 2. Tujuan dari pendekatan ini adalah untuk mengukur serta mengevaluasi konsumsi energi dan potensi penghematan biaya operasional sebagai dampak penerapan VSD, yang secara teoritis mampu mengatur kecepatan motor secara dinamis sesuai kebutuhan beban [16]. Pada Gambar 1 menunjukkan tahapan-tahapan yang dilakukan pada penelitian ini.



Gambar 1. Diagram alir penelitian

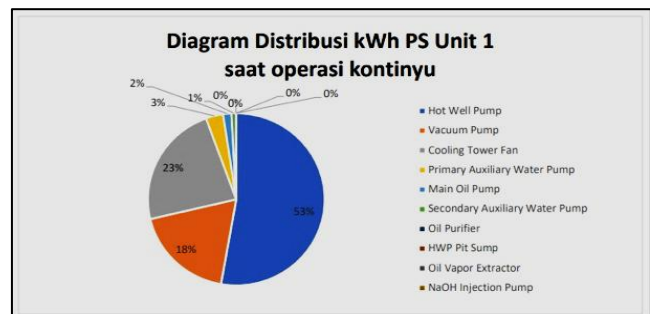
Pengumpulan data diawali dengan dokumentasi konsumsi energi listrik internal (pemakaian sendiri) pada Unit 1 dan Unit 2 PLTP Ulubelu. Fokus utama pengambilan data ditujukan pada sistem cooling tower yang terdiri atas 12 *cell*, dengan masing-masing unit memiliki 6 *cell*. Data diperoleh selama dua periode operasional yang berbeda, yaitu pada bulan Desember 2024 saat seluruh *cell* dioperasikan, dan pada bulan Januari 2025 saat hanya 5 *cell* yang dijalankan. Pengurangan jumlah *cell* tersebut merupakan bagian dari strategi efisiensi energi yang diterapkan oleh PLTP, dan dapat pula dipengaruhi oleh kondisi cuaca serta variasi beban pembangkit. Perbedaan kondisi operasional ini digunakan untuk mengevaluasi apakah konsumsi energi sistem DOL yang mengoperasikan 5 *cell* sebagai upaya penghematan energi, akan lebih rendah dibandingkan dengan sistem VSD yang tetap mengoperasikan 6 *cell* secara penuh, sehingga validitas perbandingan tetap terjaga karena analisis dilakukan berdasarkan data total konsumsi energi dari masing-masing kondisi.

Simulasi dilakukan menggunakan perangkat lunak MATLAB/Simulink dalam dua skenario, yakni skenario penggunaan kontaktor (DOL) dan skenario penggunaan VSD. Hasil simulasi telah divalidasi menggunakan data aktual dari spesifikasi motor yang digunakan di lapangan, dengan tingkat akurasi dalam rentang sebesar 1–5%. Analisis difokuskan pada konsumsi energi listrik motor *fan cooling tower* dalam kedua skenario, disertai estimasi biaya listrik yang dikeluarkan serta perhitungan *payback period* dari investasi pemasangan VSD. Dengan pendekatan ini, penelitian diharapkan dapat memberikan rekomendasi teknis yang berbasis data untuk meningkatkan efisiensi energi sistem pendingin di PLTP.

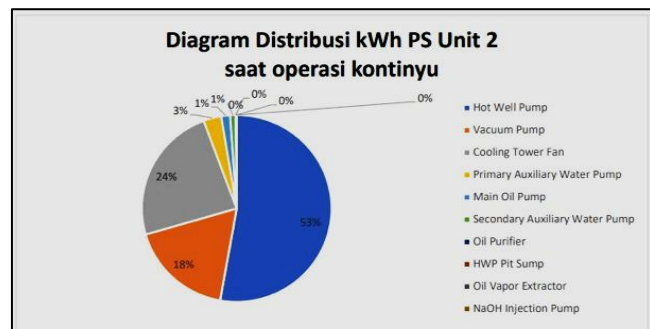
3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Konsumsi Listrik Pemakaian Sendiri PLTP Ulubelu

Pada Gambar 2 menunjukkan distribusi konsumsi energi listrik pemakaian sendiri (PS) pada *circulating water system* di unit 1 selama kondisi operasi kontinu. *Cooling tower fan* menyumbang konsumsi energi sebesar 23%, diikuti oleh *hot well pump* sebesar 53%, dan *vacuum pump* sebesar 18%. Komponen lainnya seperti *primary auxiliary water pump* (3%), *main oil pump* (2%), dan *secondary auxiliary water pump* (1%) hanya menyumbang sebagian kecil dari total energi. Peralatan pendukung lainnya seperti *oil purifier*, *HWP pit sump*, *oil vapor extractor*, dan *NaOH injection pump* masing-masing menyumbang kurang dari 1%



Gambar 2. Diagram distribusi pemakaian sendiri unit 1



Gambar 3. Diagram distribusi pemakaian sendiri unit 2

Distribusi konsumsi energi listrik pemakaian sendiri (PS) pada *circulating water system* di unit 2 yang ditampilkan pada Gambar 3 memiliki pola yang sangat mirip dengan unit 1. *Cooling tower fan* menyumbang sebesar 24%, diikuti oleh *hot well pump* sebesar 53%, dan *vacuum pump* sebesar 18%. Komponen lainnya, seperti *primary auxiliary water pump*, *main oil pump*, dan peralatan bantu lainnya, masing-masing berkontribusi antara 1% hingga 3%, sedangkan sisanya berada di bawah 1%.

3.2. Perbandingan Penggunaan DOL (kontaktor) dan VSD

Perhitungan konsumsi energi dengan DOL dan VSD dilakukan menggunakan persamaan 1 dan 2, berdasarkan data aktual dan simulasi, dalam kondisi frekuensi sama di 50Hz arus dapat turun sebesar 22,08%.

$$P_{DOL} = \frac{\sqrt{3} \times V \times I \times \cos \theta}{1000} \times 24 \quad (1)$$

$$P_{VSD} = \frac{\sqrt{3} \times V \times I \times \cos \theta}{1000} \times \left(\frac{f_{VSD}}{f}\right)^3 \times 24 \quad (2)$$

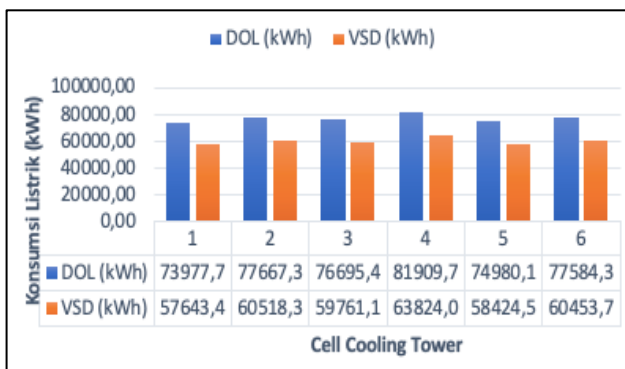
Konsumsi energi listrik dengan DOL, 6 cell aktif:

$$P_{DOL} = \frac{\sqrt{3} \times 400 \text{ V} \times 188 \text{ A} \times 0,875}{1000} \times 24 = 2735,28 \text{ kWh}$$

Konsumsi energi listrik dengan VSD, 6 cell aktif namun frekuensi disamakan:

$$P_{VSD} = \frac{\sqrt{3} \times 400 \text{ V} \times 146,8 \times 0,875}{1000} \times \left(\frac{50}{50}\right)^3 \times 24 = 2134,76 \text{ kWh}$$

Pada Gambar 4 menampilkan perbandingan konsumsi energi listrik fan cooling tower pada unit 1 PLTP Ulubelu bulan Desember 2024 antara sistem direct on-line (DOL) dan variable speed drive (VSD), dengan 6 cell yang beroperasi.

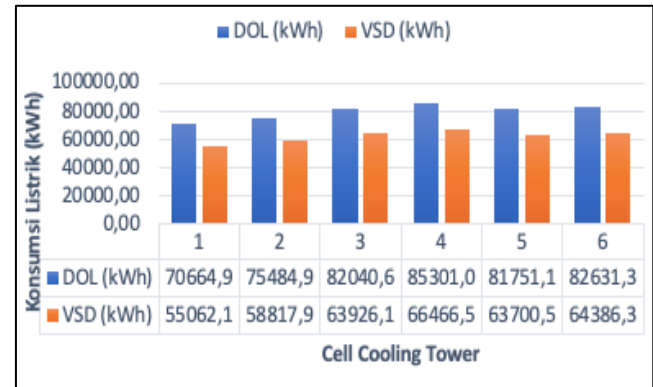


Gambar 4. Perbandingan konsumsi energi unit 1 bulan Desember 2024

Pada cell 1, konsumsi energi listrik menggunakan sistem DOL sebesar 73.977,74 kWh, sedangkan sistem VSD sebesar 57.643,45 kWh. Cell 2 menunjukkan konsumsi 77.667,31 kWh pada sistem DOL dan 60.518,37 kWh pada sistem VSD. Pada cell 3, konsumsi energi tercatat sebesar 76.695,45 kWh pada sistem DOL dan 59.761,10 kWh pada sistem VSD. Cell 4 mencatat konsumsi 81.909,74 kWh pada DOL dan 63.824,07 kWh pada VSD. Pada cell 5, sistem DOL menggunakan 74.980,15 kWh, sedangkan sistem VSD hanya 58.424,53 kWh. Terakhir, pada cell 6, konsumsi energi sistem DOL sebesar 77.584,39 kWh dan VSD sebesar 60.453,75 kWh. Total konsumsi energi seluruh cell dengan sistem DOL mencapai 462.814,79 kWh, sedangkan penggunaan sistem VSD menghasilkan total sebesar 360.625,28 kWh, menunjukkan adanya penghematan energi sebesar 22,08%. Hasil ini menunjukkan bahwa penerapan VSD pada fan cooling tower mampu meningkatkan efisiensi operasional dibandingkan sistem konvensional DOL.

Pada Gambar 5 menunjukkan perbandingan konsumsi energi listrik fan cooling tower pada Unit 2 PLTP Ulubelu selama bulan Desember 2024 antara sistem direct on-line (DOL) dan variable speed drive (VSD), yang dioperasikan

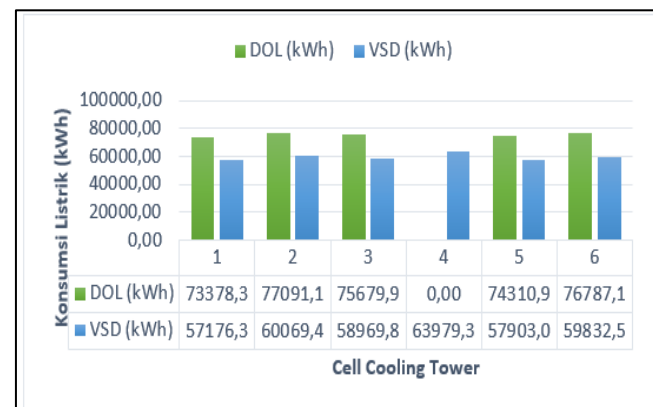
pada 6 cell. Perhitungan konsumsi energi sistem DOL dan VSD sama dengan unit 1 menggunakan persamaan (1) dan (2).



Gambar 5. Perbandingan konsumsi energi unit 2 bulan Januari 2025

Pada cell 1, konsumsi energi dengan sistem DOL tercatat sebesar 70.664,98 kWh, sedangkan sistem VSD menghasilkan konsumsi sebesar 55.062,15 kWh. Cell 2 mencatat penggunaan energi 75.484,99 kWh pada sistem DOL dan 58.817,91 kWh pada sistem VSD. Pada cell 3, konsumsi energi mencapai 82.040,68 kWh untuk DOL dan 63.926,10 kWh untuk VSD. Pada cell 4, konsumsi energi dengan sistem DOL sebesar 85.301,07 kWh, sedangkan sistem VSD mencatat 66.466,59 kWh. Cell 5 menunjukkan penggunaan daya sebesar 81.751,16 kWh dengan DOL dan 63.700,51 kWh dengan VSD. Pada cell 6, konsumsi energi listrik tercatat sebesar 82.631,36 kWh pada sistem DOL dan 64.386,36 kWh pada sistem VSD. Total konsumsi energi untuk 6 cell dengan sistem DOL mencapai 477.874,25 kWh, sementara sistem VSD menghasilkan total sebesar 372.359,62 kWh. Hasil penghematan yang dicapai sama dengan unit 1 bulan Desember 2024 yaitu sebesar 22,08%, menunjukkan bahwa penerapan sistem VSD pada fan cooling tower mampu menurunkan konsumsi energi dibandingkan sistem DOL.

Gambar 6 menunjukkan perbandingan konsumsi energi listrik pada Unit 1 selama bulan Januari 2025, ketika hanya lima cell yang dioperasikan. Perhitungan konsumsi energi untuk sistem DOL dan VSD dilakukan menggunakan pendekatan yang sama seperti pada bulan Desember 2024, berdasarkan persamaan 1 dan 2.

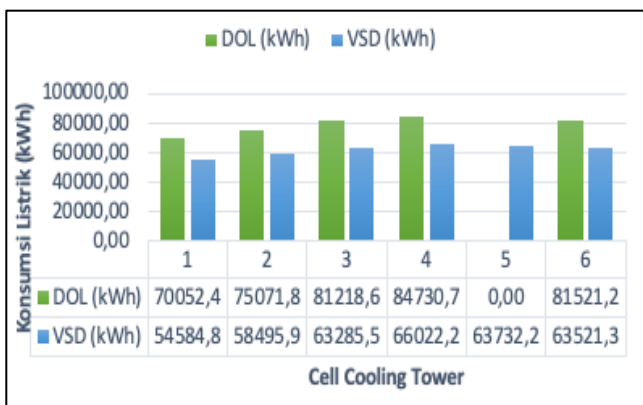


Gambar 6. Perbandingan konsumsi energi unit 1 bulan Januari 2025

Pada *cell* 1, konsumsi energi sistem DOL tercatat sebesar 73.378,33 kWh, sedangkan sistem VSD mencatatkan 57.176,39 kWh. *Cell* 2 menunjukkan konsumsi 77.091,18 kWh untuk DOL dan 60.069,45 kWh untuk VSD. Pada *cell* 3, sistem DOL mencatatkan 75.679,95 kWh, sementara sistem VSD hanya 58.969,82 kWh. Pada *cell* 4, tidak terdapat data konsumsi energi untuk sistem DOL karena *cell* tersebut tidak dioperasikan selama periode pengambilan data bulan Januari 2025. Namun, pada sistem VSD jika disimulasikan seluruh 6 *cell* diaktifkan mencatat konsumsi energi estimasi sebesar 63.979,38 kWh. Pada *cell* 5, konsumsi energi DOL sebesar 74.310,91 kWh, sedangkan sistem VSD sebesar 57.903,06 kWh. Pada *cell* 6, konsumsi energi tercatat sebesar 76.787,11 kWh sistem DOL dan 59.832,52 kWh sistem VSD.

Secara keseluruhan, total konsumsi energi untuk 5 *cell* aktif pada sistem DOL mencapai 377.247,47 kWh. Pada sistem VSD yang disimulasikan beroperasi dengan 6 *cell* menunjukkan konsumsi energi yang lebih rendah, yaitu sebesar 357.930,61 kWh. Hasil ini membuktikan bahwa penggunaan VSD memberikan efisiensi energi yang signifikan, dengan penghematan sebesar 22,08%.

Pada Gambar 7 memperlihatkan perbandingan konsumsi energi listrik pada Unit 2 PLTP Ulubelu bulan Januari 2025, di mana hanya 5 *cell* yang beroperasi. Perhitungan konsumsi energi sistem DOL dan VSD sama dengan bulan Desember 2024 menggunakan persamaan (1) dan (2). Pada *cell* 1, penggunaan sistem DOL menghasilkan konsumsi energi sebesar 70.052,47 kWh, sementara sistem VSD mengkonsumsi 54.584,89 kWh. Pada *cell* 2, konsumsi energi sistem DOL tercatat 75.071,81 kWh, sedangkan dengan sistem VSD tercatat 58.495,95 kWh. *cell* 3 menggunakan 81.218,68 kWh pada sistem DOL, sedangkan sistem VSD mencatat konsumsi energi 63.285,59 kWh. Pada *cell* 4, sistem DOL mengkonsumsi 84.730,76 kWh, sementara sistem VSD menggunakan 66.022,21 kWh. Pada *cell* 5, tidak terdapat data konsumsi energi untuk sistem DOL karena *cell* tersebut tidak dioperasikan selama periode pengambilan data bulan Januari 2025. Namun, pada sistem VSD jika disimulasikan seluruh 6 *cell* diaktifkan mencatat konsumsi energi estimasi sebesar 63.732,25 kWh. Pada *cell* 6 konsumsi energi sistem DOL tercatat 81.521,29 kWh, sedangkan sistem VSD mengkonsumsi 63.521,39 kWh.



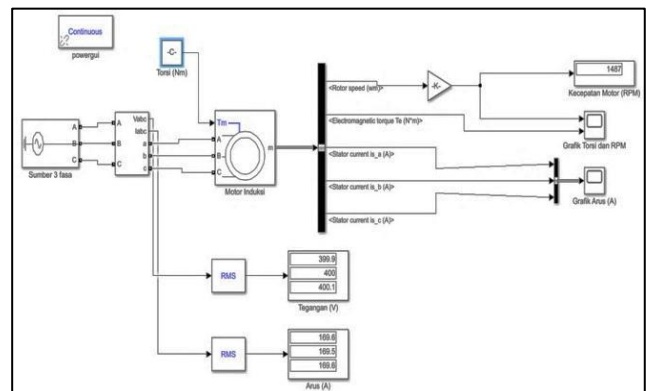
Gambar 7. Perbandingan konsumsi energi unit 2 bulan Januari 2025

Secara keseluruhan total konsumsi energi untuk 5 *cell* aktif dengan sistem DOL mencapai 392.595 kWh, sementara dengan sistem VSD yang disimulasikan tetap menggunakan 6 *cell* dapat turun menjadi 369.642,27 kWh, menghasilkan penghematan energi sebesar 22,08%. Hasil ini sama dengan Unit 2 di bulan Januari 2025 membuktikan bahwa penggunaan VSD memberikan efisiensi energi yang signifikan.

3.3. Perbandingan Hasil Simulasi

Simulasi VSD dalam penelitian ini menggunakan skenario dengan mempertimbangkan profil beban aktual yang diperoleh dari data operasional *cooling tower*, bukan hanya dengan *duty cycle* tetap. Simulasi dilakukan dengan memasukkan parameter variasi beban yang merepresentasikan kondisi nyata operasi motor *fan*. Selain itu, mode operasi VSD yang digunakan dalam simulasi adalah *variable frequency drive*, di mana kecepatan motor dikendalikan secara dinamis berdasarkan respon terhadap parameter suhu air keluar (*outlet temperature*) atau temperatur kondensat. Pengaturan ini bertujuan menyesuaikan kecepatan motor *fan* secara proporsional terhadap kebutuhan pendinginan aktual, sehingga diharapkan menghasilkan efisiensi energi yang optimal dibandingkan dengan sistem DOL yang beroperasi pada kecepatan konstan.

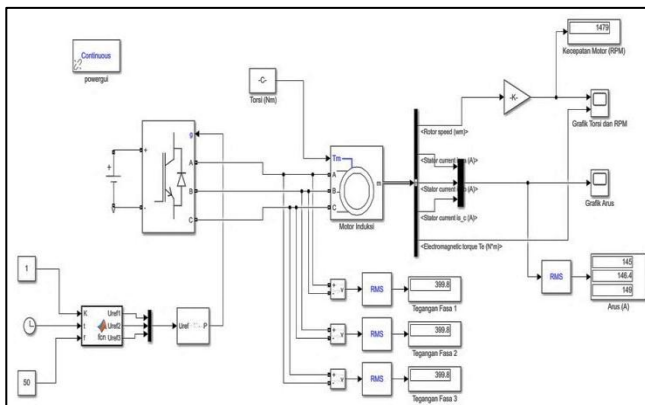
Pada Gambar 8, merepresentasikan salah satu hasil simulasi dari sistem penggerak motor induksi menggunakan metode DOL. Sumber tiga fasa digunakan sebagai *input* utama yang memberikan tegangan sinusoidal pada masing-masing fasa (A, B, dan C). Tegangan yang diberikan kemudian dialirkan ke motor induksi melalui pengukuran menggunakan blok RMS tegangan, yang berfungsi untuk membaca nilai tegangan efektif (RMS) dari setiap fasa. Arus stator dari masing-masing fasa juga diukur menggunakan blok RMS arus untuk mendapatkan informasi mengenai besarnya arus yang mengalir pada fasa A, B, dan C. Motor yang disimulasikan memiliki spesifikasi daya sebesar 150 HP, frekuensi 50 Hz, kecepatan nominal 1487 rpm, dengan tipe rotor sangkar tupai.



Gambar 8. Simulasi sistem *direct on-line* atau kontaktor

Pada Gambar 9 merepresentasikan salah satu hasil simulasi sistem motor induksi yang dikendalikan oleh *variable speed drive* (VSD). Tegangan suplai tiga fasa sebesar 399,8 V dialirkan ke rangkaian penyearah (*rectifier*) yang berfungsi mengubah arus bolak-balik (AC) dari

jaringan menjadi arus searah (DC). Arus DC ini kemudian diteruskan ke sistem kendali VSD yang menggunakan teknik modulasi lebar pulsa (PWM) dan sinyal referensi kecepatan (Uref), untuk membentuk ulang gelombang AC dengan frekuensi variabel. Proses ini memungkinkan pengaturan kecepatan motor secara fleksibel sesuai kebutuhan beban. Hasil simulasi menunjukkan kecepatan motor mencapai 1479 rpm dengan frekuensi yang sama yaitu 50 Hz, namun memiliki nilai lebih rendah dibandingkan kecepatan saat menggunakan metode DOL. Nilai arus stator masing-masing sebesar 145 A (fasa A), 146,4 A (fasa B), dan 149 A (fasa C), terdapat sedikit perbedaan nilai arus antar fasa, hal ini masih dalam batas wajar dan kemungkinan disebabkan oleh dinamika switching VSD, ketidakseimbangan beban, atau variasi parameter motor.



Gambar 9. Simulasi sistem variable speed drive atau VSD

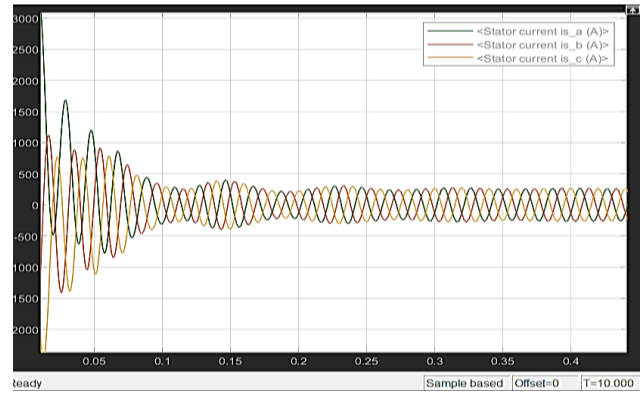
3.4. Perbandingan Arus Starting

Lonjakan arus saat *starting* dapat berdampak pada performa sistem secara keseluruhan, termasuk konsumsi energi [11]. Metode *direct on-line* (DOL) menghasilkan lonjakan arus yang tinggi pada saat *starting*, sedangkan *variable speed drive* (VSD) lebih stabil, hal ini dibuktikan melalui grafik simulasi pada Gambar 9 dan 10. Arus yang dikonsumsi oleh motor *fan cooling tower* telah mencapai keadaan stabil tanpa adanya kenaikan signifikan setelah sistem mencapai kondisi operasi normal. Motor yang digunakan memiliki kapasitas untuk beroperasi hingga arus maksimum sebesar 200 A, yang menjadi acuan dalam perancangan sistem proteksi serta batas aman operasional motor.

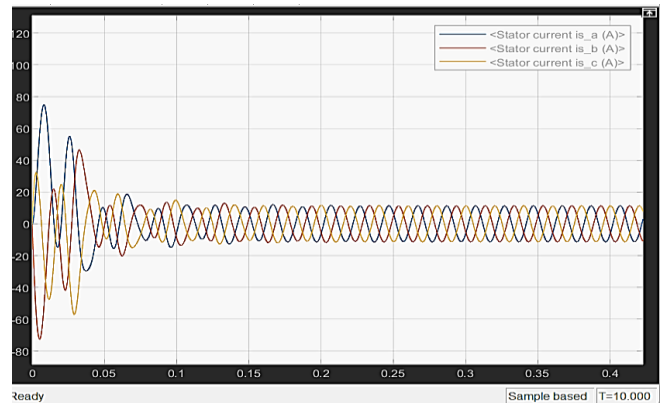
Pada Gambar 10 menunjukkan karakteristik lonjakan arus *starting* saat penggunaan sistem DOL. Hasil simulasi menunjukkan bahwa pada sistem DOL, arus *starting* tinggi berlangsung selama 0,25 detik untuk dapat mencapai arus stabil di simulasi terbaca arus puncak sebesar ± 200 A, sementara dalam kondisi aktual di PLTP Ulubelu Tanggamus, arus akan stabil atau mencapai arus nominal di 165-180 A dalam waktu kurang dari 1 jam.

Pada Gambar 11 terlihat bahwa penggunaan VSD mampu meminimalkan lonjakan arus, sehingga arus *starting* menjadi lebih stabil dan efisien. Grafik arus *starting* ini disimulasikan seperti kondisi aktual dari sistem motor *fan cooling tower* di PLTP Ulubelu, dikarenakan saat ini PLTP Ulubelu belum menerapkan sistem VSD. Pada simulasi sistem VSD arus tinggi saat *starting* hanya bertahan hingga

0,1 detik untuk dapat mencapai arus stabil di simulasi terbaca sebesar ± 200 A, di mana lebih cepat dibandingkan sistem DOL. Data arus motor yang tercantum pada Tabel 1 menunjukkan kondisi operasi motor dalam keadaan stabil setelah melewati fase *starting*.



Gambar 10. Arus starting penggunaan kontaktor (DOL)



Gambar 11. Arus starting penggunaan VSD

Tabel 1. Arus motor fan cooling tower unit 1 dan 2

Unit	Cell	Arus (A)	
		DOL	VSD
1	1	169,5	132,1
	2	177,9	138,7
	3	175,7	136,9
	4	187,7	146,2
	5	171,8	133,9
	6	177,8	138,5
2	1	161,9	126,2
	2	172,9	134,8
	3	188,0	146,5
	4	195,4	152,3
	5	187,3	145,9
	6	189,3	147,5

Sistem yang saat ini digunakan di PLTP Ulubelu masih menerapkan metode *direct on-line* (DOL), sehingga nilai arus pada sistem DOL diperoleh melalui pencatatan langsung di ruang operator PLTP Ulubelu Tanggamus. Nilai arus pada sistem *variable speed drive* (VSD) diperoleh melalui simulasi, karena VSD belum diterapkan secara

aktual. Arus motor normal pada tiap *cell* memiliki perbedaan karena dipengaruhi oleh beberapa faktor, antara lain:

- 1) Berat blade atau kipas yang digunakan, yang dapat mempengaruhi beban kerja motor.
- 2) Jarak antara transformator dengan *cell* yang bersangkutan, di mana semakin jauh jaraknya, semakin besar kemungkinan terjadi penurunan tegangan yang mempengaruhi kinerja motor.
- 3) Faktor dari motor itu sendiri, seperti bearing yang aus atau komponen lain dari motor yang sudah mulai mengalami kerusakan, sehingga meningkatkan hambatan mekanis dan konsumsi arus listrik.

3.5. Perhitungan Biaya Listrik Terpakai

Estimasi biaya listrik bulanan berdasarkan tarif dasar listrik PLN, untuk PLTP Ulubelu Tanggamus yaitu golongan I-4/tegangan tinggi, dengan menggunakan tarif yang sama sebesar Rp996,74/kWh untuk kedua kondisi, yaitu waktu beban puncak (WBP) dan luar waktu beban puncak (LWBP). Biaya dari konsumsi energi listrik sistem DOL dan VSD, menggunakan persamaan 3:

$$\text{Biaya Listrik} = P \times \text{Rp}996,74 \quad (3)$$

Biaya listrik unit 1 bulan Desember 2024:

$$\begin{aligned} \text{Biaya Listrik} &= 462.814,79 \text{ kWh} \times \text{Rp}996,74 \\ &= \text{Rp}461.306.013 \end{aligned}$$

Tabel 2. Konsumsi biaya listrik unit 1 dan 2 bulan Desember 2024

Metode	Total Konsumsi Energi	
	Unit 1	Unit 2
DOL (kWh)	462.814,79	477.874,25
VSD (kWh)	360.625,28	372.359,62
Metode	Biaya Listrik	
	Unit 1	Unit 2
DOL (Rp)	461.306.010	476.316.379
VSD (Rp)	359.449.643	371.145.723

Pada unit 1 total konsumsi energi listrik pada kondisi 6 *cell* aktif, dengan DOL diperoleh sebesar 462.814,79 kWh, sedangkan dengan VSD turun menjadi 360.625,28 kWh. Konsumsi energi listrik berbanding lurus pada biaya listrik yang terpakai, di mana dengan sistem DOL biaya listrik yang terpakai sebesar Rp461.306.010, sedangkan dengan sistem VSD turun menjadi Rp359.449.643. Pada unit 2 total konsumsi energi listrik pada kondisi 6 *cell* aktif, dengan DOL diperoleh 477.874,25 kWh, mengalami penurunan dengan sistem VSD menjadi 372.359,62 kWh. Biaya listrik yang terpakai pada unit 2 diperoleh dengan sistem DOL sebesar Rp476.316.379, dan mengalami penurunan menjadi Rp371.145.723 dengan sistem VSD.

Tabel 3. Konsumsi biaya listrik unit 1 dan 2 bulan Januari 2025

Metode	Total Konsumsi Energi	
	Unit 1	Unit 2
DOL (kWh)	377.247,47	392.595
VSD (kWh)	357.930,61	369.642,27
Metode	Biaya Listrik	
	Unit 1	Unit 2
DOL (Rp)	376.017.647	391.315.144
VSD (Rp)	356.763.760	368.437.240

Pada Tabel 3 menunjukkan perbandingan konsumsi energi listrik dan biaya listrik pada unit 1 dan unit 2 *cooling tower* untuk bulan Januari 2025, dengan perhitungan sama dengan bulan Desember 2024 menggunakan persamaan 3.

Pada unit 1, total konsumsi energi listrik dengan sistem DOL saat 5 *cell* aktif mencapai 377.247,47 kWh, dengan biaya listrik sebesar Rp376.017.647. Simulasi dengan sistem VSD dengan 6 *cell* aktif, konsumsi energi tetap turun menjadi 357.930,61 kWh dan biaya listrik berkurang menjadi Rp356.763.760. Hal serupa terjadi pada unit 2, konsumsi energi dengan sistem DOL dan 5 *cell* aktif sebesar 392.595 kWh, dengan biaya Rp391.315.144. Simulasi sistem VSD dengan tetap mengoperasikan 6 *cell* aktif, konsumsi energi menurun menjadi 369.642,27 kWh dan biaya turun menjadi Rp368.437.240.

3.6. Perhitungan Payback Period Pemasangan VSD

Penghematan biaya listrik, diperoleh menggunakan persamaan (4):

$$\begin{aligned} \text{Penghematan} \\ &= \text{Biaya Listrik}_{\text{DOL}} - \text{Biaya Listrik}_{\text{VSD}} \quad (4) \end{aligned}$$

Penghematan unit 1 bulan Desember 2024, dan berlaku untuk semua perhitungan.:

$$\begin{aligned} \text{Penghematan} &= \text{Rp}461.306.010 - \text{Rp}359.449.643 \\ &= \text{Rp} 101.856.367 \end{aligned}$$

Tabel 4. Rincian total penghematan biaya listrik

Desember 2024 (6 <i>cell</i>)	Total Biaya Listrik		Penghematan
	Unit 1	Unit 2	
DOL (Rp)	461.306.010	476.316.379	101.856.367
VSD (Rp)	359.449.643	371.145.723	105.170.657
Januari 2025 (5 <i>cell</i>)	Total Biaya Listrik		Penghematan
	Unit 1	Unit 2	
DOL (Rp)	376.017.647	391.315.144	19.253.888
VSD (Rp)	356.763.760	368.437.240	22.877.903

Berdasarkan Tabel 4 menunjukkan penggunaan sistem DOL pada Desember 2024 merupakan kondisi di mana seluruh *cell* di *cooling tower* aktif baik unit 1 atau 2, sedangkan pada Januari 2025 unit 1 dan 2 hanya beroperasi dengan 5 *cell* saja, namun dengan sistem VSD tetap dioperasikan 6 *cell*. Total penghematan pada Desember 2024 dari kedua unit sebesar Rp207.027.024, dan pada bulan Januari 2025 sebesar Rp42.131.791. *Cooling tower* dengan penggunaan 5 *cell* sistem DOL menunjukkan biaya listrik yang lebih rendah dibandingkan saat penggunaan 6 *cell*, namun jika penggunaan 5 *cell* secara berkelanjutan akan berdampak pada sistem pendinginan di *cooling tower* seperti suhu outlet yang relatif tinggi dan efektivitas *cooling tower* yang relatif rendah. Penggunaan sistem VSD tetap mempertahankan 6 *cell* aktif, hasilnya tetap mengalami penurunan

Tabel 5. Rincian investasi pemasangan VSD

Uraian	Jumlah Unit	Harga Satuan (Rp)	Total Harga (Rp)
<i>Variable speed drive</i>			
ABB ACS880-01-206A-3 Panel & Aksesoris	12	195.000.000	2.340.000.000
Instalasi	12	30.800.000	369.600.000
Jasa Instalasi & Pengujian	1 paket /unit	100.000.000	200.000.000
Total Investasi			2.909.600.000

Pada Tabel 5 merupakan rincian pemasangan dan pemilihan VSD mencakup 12 *cell* atau dua unit yang cocok untuk digunakan di PLTP Ulubelu. Pemasangan VSD diharapkan dapat menjadi solusi yang efektif untuk mengatasi permasalahan tersebut. VSD memungkinkan pengaturan kecepatan motor *fan* secara fleksibel, sehingga *cooling tower* tetap dapat menggunakan 6 *cell* untuk pendinginan optimal dengan menyesuaikan kapasitas pendinginan dan kebutuhan aktual sistem. Pemilihan *variable speed drive* (VSD) ABB tipe ACS880-01-206A-3 didasarkan pada pertimbangan teknis, efisiensi energi, dan kesesuaian dengan karakteristik beban kipas. Motor *fan* yang digunakan memiliki spesifikasi daya 110 kW, tegangan 400 volt, dan beroperasi pada frekuensi 50 Hz, sehingga membutuhkan VSD yang mampu mengatur kecepatan motor pada rentang daya tinggi dan kondisi operasi yang dinamis.

VSD ABB ACS880-01-206A-3 mendukung arus nominal hingga 206 A dan dirancang untuk pengoperasian motor induksi tiga fasa pada daya hingga 110 kW. Drive ini mengadopsi teknologi direct torque control (DTC) yang memungkinkan pengendalian torsi dan kecepatan secara presisi tanpa memerlukan sensor tambahan, sehingga meningkatkan efisiensi sistem dan respons kontrol motor [7]. VSD ini juga memiliki fitur hemat energi serta proteksi terhadap gangguan lingkungan seperti kelembapan dan debu dengan tingkat perlindungan IP55, yang membuatnya cocok untuk diaplikasikan di lingkungan industri pembangkit listrik panas bumi.

Perhitungan payback period menggunakan persamaan 5 digunakan untuk menilai seberapa cepat investasi VSD dapat dikembalikan melalui efisiensi biaya listrik yang dihasilkan. Perhitungan seluruh *cell* aktif beroperasi pada kedua unit, totalnya 12 *cell*.

$$\text{Payback Period} = \frac{\text{Biaya investasi VSD}}{\text{Biaya penghematan VSD}} \quad (5)$$

Penghematan biaya listrik untuk dua unit mencapai Rp207.027.024 per bulan, jika kondisi serupa berlangsung selama 12 bulan, maka estimasi penghematan tahunan mencapai:

$$\text{Rp}207.027.024 \times 12 = \text{Rp}2.484.324.284$$

Perhitungan *payback period* dengan total investasi pemasangan VSD untuk 12 *cell* sebesar Rp2.909.600.000, maka hasil *payback period* yang diperoleh:

$$\text{Payback Period} = \frac{\text{Rp}2.909.600.000}{\text{Rp}2.484.324.284}$$

$$\text{Payback Period} = 1,17 \text{ tahun}$$

Berdasarkan hasil yang didapat menunjukkan apabila VSD dipasang pada 6 *cell cooling tower* di unit 1 dan 2, waktu pengembalian investasi tercapai dalam 1,17 tahun. Hasil tersebut menunjukkan bahwa implementasi VSD secara penuh pada seluruh 12 *cell* memberikan hasil paling optimal baik dari sisi teknis maupun ekonomis. Investasi ini juga berada dalam rentang yang ekonomis dan sangat layak secara finansial, terutama jika dibandingkan dengan usia pakai VSD yang berkisar antara 10 hingga 15 tahun, sehingga pendekatan ini layak dijadikan strategi konservasi energi di PLTP Ulubelu Tanggamus.

4. Kesimpulan

Kinerja pendinginan pada sistem *cooling tower* di PLTP Ulubelu Tanggamus menunjukkan bahwa saat penggunaan 6 *cell* suhu outlet dan efektivitas pendinginan berada dalam kondisi ideal. Penggunaan 5 *cell* bertujuan menghemat energi akibat pengoperasian motor *fan* dengan sistem DOL tanpa penyesuaian beban pendinginan aktual, menghasilkan nilai suhu outlet dan efektivitas pendinginan relatif berada di atas nilai ideal. Kondisi penggunaan energi listrik secara keseluruhan pada *circulating water system* menunjukkan *fan cooling tower* menyumbang sebesar 23% pada unit 1 dan 24% pada unit 2. Penerapan sistem VSD memberikan dampak signifikan dalam penghematan konsumsi energi listrik pada motor *fan cooling tower*. Pada kondisi eksisting dengan sistem DOL, konsumsi energi tercatat 462.814,79 kWh (unit 1) dan 477.874,25 kWh (unit 2) saat 6 *cell* beroperasi pada Desember 2024. Pengoperasian dikurangi menjadi 5 *cell* pada Januari 2025 guna menurunkan konsumsi, menghasilkan 377.247,47 kWh (unit 1) dan 392.595 kWh (unit 2), namun langkah ini menyebabkan efektivitas pendinginan menurun.

Simulasi penggunaan VSD pada kondisi yang sama menunjukkan konsumsi energi yang lebih rendah, yaitu 360.625,28 kWh (unit 1) dan 372.359,62 kWh (unit 2) pada Desember 2024, serta 357.930,61 kWh dan 369.642,27 kWh pada Januari 2025, meskipun tetap mengoperasikan 6 *cell*. Penghematan energi mencapai sekitar 22,08% tanpa mengorbankan performa pendinginan, sehingga membuktikan bahwa VSD lebih efisien dan mampu menjaga kestabilan sistem secara optimal. Pemasangan VSD pada 6 *cell* di masing-masing unit 1 dan 2 memberikan pengaruh positif apabila dioperasikan selama satu tahun penuh, dengan periode pengembalian investasi (*payback period*) tercatat sebesar 1,17 tahun. Periode pengembalian modal yang tergolong cepat ini menunjukkan kelayakan yang sangat baik, mengingat usia pakai sistem VSD yang umumnya berkisar antara 10 hingga 15 tahun. Oleh karena itu, penerapan VSD dapat dianggap sebagai solusi yang efisien dan berkelanjutan, baik dari aspek teknis maupun ekonomis.

Daftar Pustaka

- [1] D. J. EBTKE, "Laporan Konsumsi Listrik Nasional," *ESDM.GO*, 2023.
- [2] M. N. Oktaviani, N. A. Sasongko dan S. Thamrin, "Analisis Dampak Pandemi Covid-19 Terhadap Industri Ketenagalistrikan Jawa Madura–Bali (JAMALI) Dalam Perspektif Ketahanan Energi Nasional," *Jurnal Ketahanan Energi*, vol. 7, no. 1, 2021.
- [3] B. Surya, P. Taibe, S. Sariman, H. Hernita, A. Salim, N. Nasrullah dan A. G. H. Zubair, "Renewable Energy Utilization and Environmental Pollution Control in the New City Area Mamminasata Metropolitan, Indonesia," *International Journal of Energy Economics and Policy (IJEPP)*, vol. 13, no. 1, 2023.
- [4] J. S. Setyono, F. H. Mardiansjah dan M. F. Kusumo Astuti, "Potensi Pengembangan Energi Baru Dan Energiterbarukan Di Kota Semarang," *JURNAL RIPTEK*, vol. 13, no. 2, pp. 177-186, 2019.
- [5] K. Badan Geologi, *Peta Potensi Energi Panas Bumi Indonesia*, Jakarta: Kementerian ESDM, 2020.
- [6] A. Fauzia dan M. N. Makarim, "Strategy of geothermal energy development as a renewable energy source in West Java Indonesia," *Journal of Innovation Materials, Energy, and Sustainable Engineering (JIMESE)*, vol. 2, no. 1, 2024.
- [7] A. N. Octaviani dan N. Ruhyat, *Rekayasa Panas Bumi: Dasar-dasar dan Aplikasi*, Jakarta: IFHE, 2024.
- [8] A. Nurrahman, Z. Furqon, F. A. Hamid dan M. I. Al Haritsah, "Efisiensi Kinerja Cooling Tower di Unit Pengolahan Air Di PT. X Sukowati," *Jurnal Ilmiah Teknik Kimia*, vol. 8, no. 1, 2024.
- [9] S. Darma, Y. L. Imani, M. N. A. Shidqi, T. D. Riyanto dan M. Y. Daud, "Country Update: The Fast Growth of Geothermal Energy Development in Indonesia," *Proceedings World Geothermal Congress*, 2021.
- [10] F. M. Panjaitan dan I. Z. Putra, "Analisis Pengaruh Temperatur Ambient Terhadap Kinerja Cooling Tower Unit 2 Berdasarkan Evaluasi Range dan Approach pada PLTGU PT Mitra Energi Batam," *Jurnal INTEGRASI*, vol. 17, no. 1, pp. 32-29, 2025.
- [11] M. I. Putra Naibaho, I. K. Wijaya dan I. M. Mataram, "Studi Analisis Perbandingan Metode Starting Dol Dan Vsd Pada Motor Fan Cooling Tower Di Pt Riau Andalan Pulp Paper," *Jurnal SPEKTRUM*, vol. 8, no. 1, 2021.
- [12] F. W. Nur Rahman, N. Renanda, E. Setiawan, A. I. Juniani dan L. J. Satrianata, "Peluang Penghematan Energi Pada Motor Induksi 3 Fasa Dengan Penggerak Variable Speed Drive (VSD)," *Jurnal Teknik Elektro dan Komputer (TRIAC)*, vol. 11, no. 2, 2024.
- [13] Fitriyono, A. Azis dan A. Santoso, "Studi Pengaturan Kecepatan Motor Hotwell Pump (HWP) Terhadap Efisiensi Penggunaan Daya Listrik PT PLN (PERSERO) PLTP Ulubelu," *Jurnal Ilmiah Teknik Elektro UML*, vol. 1, no. 1, 2020.
- [14] P. Mahrifatika dan I. A. Darmawan, "Perbandingan Konsumsi Energi Motor Induksi 3 Fasa Variable Speed Drive (Inverter) Pada Mesin Circular Loom Di PT. Murni Mapan Mandiri," *Jurnal Sains dan Teknologi (SAINTEK)*, vol. 1, no. 2, pp. 35-46, 2022.
- [15] L. Meichelia, "Analisis Penghematan Daya Listrik pada Motor untuk Pompa Pendingin 3 Fasa Kapasitas 6 KV 920 KW Menggunakan Variable Speed Drive," *Seminar Nasional Teknologi Energi dan Mineral*, vol. 4, pp. 385-397, 2024.
- [16] R. N. Rachmadita, F. W. N. Rahman, E. Setiawan, A. I. Juniani, W. dan L. J. Satrianata, "Energy Saving Opportunities in 3-Phase Induction Motors with Variable Speed Drive (V.S.D.) Drives," *Jurnal Teknik Elektro dan Komputer TRIAC*, vol. 11, no. 2, pp. 51-57, 2024.