

Analisis Tekno Ekonomi Pemasangan Variable Speed Drive pada Motor Turbine Cooling Air di PLTGU Muara Karang

Muhamad Rafif Herdafa*, Agus Indarto

Institut Teknologi PLN, Indonesia

Email: muhamad2410739@itpln.ac.id*, agus.indarto@itpln.ac.id

Keywords:

direct-on-line; fan belt;
techno-economic; turbine
cooling air; variable speed
drive

Abstract

PT PLN Nusantara Power's Muara Karang Generation Unit is a strategic power plant supplying vital electricity needs to DKI Jakarta. Within the Combined Cycle Power Plant (PLTGU) unit, the Turbine Cooling Air (TCA) system plays a crucial role in maintaining the cooling air temperature for the M701F gas turbine blades. Failures such as the snapping or detachment of the TCA motor fan belt can cause the fan to stop rotating even while the motor continues to operate; this results in suboptimal blade cooling and potentially triggers a unit runback. This study aims to analyze the technical and economic feasibility of installing a Variable Speed Drive (VSD) on the TCA motor to mitigate fan belt failures and reduce the impact of production losses. The research methodology encompasses an analysis of ten years of operation and maintenance data, dynamic simulations comparing Direct-on-Line (DOL) starting with VSD starting, and an economic analysis using Net Present Value (NPV), Internal Rate of Return (IRR), and Payback Period. Simulation results indicate that the VSD reduces maximum current from 101.08 A to 22.72 A (a 77.53% reduction) and maximum torque from 218.73 Nm to 79.51 Nm (a 63.65% reduction). The VSD also facilitates smoother acceleration and reduces energy consumption during the starting process by 80.29%. Economically, the investment yields an NPV of IDR 130,476,717.68, an IRR of 23%, and a payback period of 2.53 years. Consequently, the installation of a VSD is deemed technically and economically feasible for enhancing TCA motor reliability and minimizing potential production losses.

Kata kunci:

direct on line; fan belt;
teknologi ekonomi; turbin
pendingin udara; kecepatan
variabel drive

Abstrak

PT PLN Nusantara Power Unit Pembangkitan Muara Karang merupakan pembangkit strategis yang memasok kebutuhan listrik vital di DKI Jakarta. Pada unit PLTGU, sistem Turbine Cooling Air (TCA) berperan menjaga temperatur udara pendingin blade turbin gas M701F. Gangguan berupa putus atau lepasnya fan belt motor TCA dapat menyebabkan fan tidak berputar meskipun motor tetap beroperasi, sehingga pendinginan blade menjadi tidak optimal dan berpotensi memicu runback pada unit. Penelitian ini bertujuan menganalisis kelayakan teknis dan ekonomi pemasangan Variable Speed Drive (VSD) pada motor TCA sebagai upaya mengurangi gangguan fan belt dan dampak kehilangan produksi. Metode penelitian meliputi analisis data operasi dan pemeliharaan selama sepuluh tahun, simulasi dinamik dilakukan dengan membandingkan pengasutan Direct on Line (DOL) dan VSD, serta analisis ekonomi menggunakan Net Present Value, Internal Rate of Return, dan Payback Period. Hasil simulasi menunjukkan bahwa VSD menurunkan arus maksimum dari 101,08 A menjadi 22,72 A atau sebesar 77,53%, serta menurunkan torsi maksimum dari 218,73 Nm menjadi 79,51 Nm atau sebesar 63,65%. VSD juga menghasilkan akselerasi yang lebih lembut dan menurunkan energi selama proses starting sebesar 80,29%. Secara ekonomi, investasi menghasilkan NPV sebesar Rp130.476.717,68, IRR sebesar 23%, dan Payback Period selama 2,53 tahun. Dengan demikian, pemasangan VSD dinilai layak secara teknis dan ekonomi untuk meningkatkan keandalan motor TCA serta mengurangi potensi kehilangan produksi.

PENDAHULUAN

PT PLN Nusantara Power Unit Pembangkitan Muara Karang merupakan unit pembangkitan yang mencakup PLTU (Pembangkit Listrik Tenaga Uap) dan PLTGU (Pembangkit Listrik Tenaga Gas dan Uap) dengan total kapasitas daya terpasang sebesar 2.177 MW serta berlokasi di Pluit, Provinsi DKI Jakarta. Pembangkit listrik berbahan gas ini merupakan pembangkit must run yang harus selalu dioperasikan karena lokasinya yang sangat strategis sehingga diharapkan dapat menjaga keandalan pasokan listrik di DKI Jakarta (Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia, 2025).

Energi listrik memiliki peran penting dalam mendukung kegiatan ekonomi, industri, bisnis, dan pelayanan masyarakat. Konsumsi listrik sektor industri dan bisnis memiliki pengaruh positif yang signifikan terhadap produk domestik bruto (Adi et al., 2022). Unit Pembangkitan Muara Karang terhubung dengan jaringan listrik 150 kV untuk memenuhi kebutuhan listrik daerah VVIP seperti Istana Presiden, Gedung MPR/DPR, gedung kementerian dan pemerintahan, Bandara Internasional Soekarno Hatta, serta sistem transportasi MRT (Mass Rapid Transit) Jakarta (PLN Nusantara Power, 2026). Untuk menjaga kebutuhan listrik tersebut tidak cukup hanya didasarkan pada kapasitas daya, tetapi juga perlu mempertimbangkan efisiensi, fleksibilitas operasi, kebutuhan lahan, dampak lingkungan, kedekatan dengan pusat beban, dan kemampuan pembangkit dalam mendukung kestabilan sistem (Atma et al., 2022; Budiyanto et al., 2020; Chapman, 2012).

Selain menjaga keandalan, peningkatan efisiensi penggunaan energi menjadi salah satu pendekatan yang dapat dilakukan untuk mengurangi biaya operasi dan kebutuhan penambahan kapasitas pembangkit. Penerapan teknologi yang lebih efisien dapat menurunkan konsumsi energi, mengurangi kebutuhan pembangkitan, dan memberikan biaya penghematan energi yang lebih rendah dibandingkan penambahan kapasitas pembangkit (Batih & Sorapipatana, 2016).

Hal tersebut menunjukkan bahwa kontinuitas pasokan listrik tidak hanya berkaitan dengan aspek teknis sistem tenaga, tetapi juga berhubungan dengan keberlangsungan kegiatan ekonomi. Oleh karena itu, keandalan pembangkit dan peralatan pendukungnya perlu dijaga agar gangguan peralatan tidak menurunkan kemampuan pembangkit dalam memasok energi listrik. Pembangkit Listrik Tenaga Gas dan Uap merupakan salah satu jenis pembangkit yang sesuai dengan karakteristik kebutuhan tersebut.

Prinsip kerja PLTGU adalah udara dikompresikan oleh kompresor sehingga udara menjadi bertekanan tinggi lalu masuk ke ruang bakar dan dicampur dengan bahan bakar gas atau minyak sehingga menghasilkan gas buang panas yang menggerakkan turbin dan generator untuk memproduksi listrik. Proses ini disebut Open Cycle. Gas buang sisa pembakaran yang bersuhu tinggi dimanfaatkan kembali memanaskan air di dalam HRSG (Heat Recovery Steam Generator) sehingga menghasilkan uap yang akan menggerakkan turbin uap dan generator yang akan memproduksi listrik atau proses ini disebut Combine Cycle.

PLTGU UP Muara Karang menggunakan turbin gas jenis M701F. Turbin gas jenis ini dapat bekerja pada temperatur 1400 oC pada ruang pembakarannya. Hal ini membutuhkan sistem pendinginan yang optimal untuk menjaga peralatan hot gas path pada area tersebut agar lifetime peralatan tetap terjaga. Turbin gas M701F memiliki sistem pendinginan sudu turbin pada blade dan vane. Sistem pendingin sudu diam (vane) memanfaatkan udara masuk dari kompresor stage 6, 11, dan 14. Sedangkan pendingin untuk sudu gerak (blade), memanfaatkan

udara output compressor turbin yang telah melewati TCA (Turbine Cooling Air). TCA adalah sistem heat exchanger dengan metode penukaran panas antara udara outlet compressor dengan range temperatur kurang lebih 450 oC dengan ambient temperature. Penurunan temperatur outlet compressor dipengaruhi oleh fan pada TCA dengan metode konveksi paksa.

Permasalahan terjadi ketika fan belt pada motor TCA putus atau lepas dan motor tetap berjalan sedangkan fan TCA tidak berputar. Penunjukkan indikator operasi fan TCA di control room tidak bisa mengindikasikan fan belt telah putus atau terlepas. Efek yang ditimbulkan jika fan tidak beroperasi dapat mengakibatkan pendinginan pada blade turbin gas tidak optimal. Hal tersebut dapat berpotensi membahayakan hot gas path pada turbin gas. Saat temperatur RCA (Rotor Cooling Air) mencapai 275 oC dapat mengakibatkan sinyal runback menyala. Sehingga berpotensi derating pada unit turbin gas dan berakibat langsung derating pada unit turbin uap.

Berdasarkan data operasi dan pemeliharaan yang tercatat, gangguan fan belt motor TCA tersebut terjadi sebanyak 50 kali selama periode 10 tahun terakhir. Pada beberapa kejadian, gangguan motor TCA turut memicu runback unit, yaitu penurunan beban pembangkit secara otomatis sebagai respons terhadap ketidaknormalan peralatan. Dalam periode tersebut, terdapat 11 gangguan runback dengan total potensi produksi yang hilang sebesar 731.000 kW.

Faktor yang diduga berkontribusi terhadap gangguan fan belt adalah karakteristik pengasutan motor TCA. Pengasutan secara Direct on Line memberikan tegangan penuh secara langsung pada terminal motor sehingga dapat menghasilkan arus start dan torsi awal yang relatif tinggi. Perubahan torsi yang terjadi secara cepat dapat menimbulkan hentakan mekanis pada poros, pulley, dan fan belt. Apabila terjadi berulang, kondisi tersebut berpotensi mempercepat keausan dan menurunkan umur pakai fan belt.

Variable Speed Drive adalah alternatif yang dapat digunakan untuk meningkatkan karakteristik pengasutan motor. VSD mengatur frekuensi dan tegangan keluaran motor sehingga percepatan dapat dilakukan secara bertahap. Pengendalian ini diharapkan dapat mengurangi arus start, mengurangi perubahan torsi secara mendadak, dan mengurangi hentakan mekanis pada sistem fan belt.

Meskipun VSD memiliki kemampuan untuk mengontrol proses starter motor, penelitian lebih lanjut diperlukan sebelum dapat digunakan. Batas arus, waktu akselerasi, pengaturan frekuensi, dan karakteristik beban harus diubah agar motor tetap menghasilkan torsi yang cukup. Investasi pada VSD juga harus dibandingkan dengan keuntungan yang diperoleh dari penurunan gangguan fan belt, pengurangan insiden runback, dan kemungkinan penurunan kehilangan produksi energi listrik.

Berbagai penelitian telah membahas penggunaan VSD untuk pengendalian motor induksi dan penghematan energi. Namun, kajian yang secara khusus menghubungkan penggunaan VSD pada motor TCA dengan penurunan gangguan fan belt dan risiko runback pada PLTGU masih terbatas. Selain itu, belum terdapat evaluasi yang menggabungkan hasil simulasi karakteristik dinamis motor dengan data gangguan aktual serta perhitungan manfaat ekonominya pada PLTGU UP Muara Karang.

Penerapan teknologi baru pada sistem tenaga tidak cukup dievaluasi hanya berdasarkan peningkatan kinerja teknis, tetapi juga perlu mempertimbangkan investasi, biaya operasi, biaya pemeliharaan, dan manfaat ekonomi yang dihasilkan. Penelitian dapat dilakukan dengan mengevaluasi kelayakan penerapan teknologi penyimpanan energi dengan menggunakan Net

Present Value berdasarkan penghematan biaya dan biaya investasi (Setiawan et al., 2023). Pendekatan tersebut memperlihatkan bahwa keputusan investasi harus mempertimbangkan manfaat dan biaya selama umur ekonomis peralatan, bukan hanya besarnya penghematan pada tahun pertama.

Penelitian ini dilakukan untuk menganalisis penerapan Variable Speed Drive (VSD) pada motor Turbine Cooling Air (TCA) sebagai upaya mengurangi gangguan fan belt dan meminimalkan risiko runback di PLTGU UP Muara Karang. Analisis mencakup kondisi teknis pengasutan motor TCA pada sistem eksisting serta kondisi setelah penerapan VSD, termasuk pengaruhnya terhadap arus, torsi, kecepatan, daya, efisiensi, dan faktor daya. Selain itu, penelitian mengevaluasi kemampuan VSD dalam mengurangi potensi gangguan runback serta menilai kelayakan ekonominya berdasarkan masa manfaat pembangkit. Kajian dibatasi pada kejadian runback yang berkaitan dengan putusnya fan belt motor TCA dan menggunakan data historis gangguan, karakteristik motor, serta simulasi dinamis dengan ETAP 19.0.1 untuk membandingkan metode pengasutan Direct On Line (DOL) dan VSD. Secara akademis, penelitian ini diharapkan berkontribusi pada pengembangan strategi peningkatan keandalan operasi PLTGU, sedangkan secara praktis hasilnya dapat menjadi bahan pertimbangan manajemen dalam penerapan VSD. Kebaruan penelitian terletak pada penggabungan analisis teknis dan ekonomi untuk mengkaji keterkaitan pengaturan kecepatan motor dengan keandalan sistem transmisi fan belt, yang masih relatif terbatas dalam penelitian sebelumnya.

Berbagai penelitian terdahulu telah mengkaji penerapan Variable Speed Drive (VSD) atau Variable Frequency Drive (VFD) pada motor penggerak fan di sektor pembangkit dan industri, dan menjadi dasar penting untuk memahami manfaat serta keterbatasan teknologi ini sebelum diterapkan pada motor Turbine Cooling Air (TCA) di PLTGU. (Wibowo et al., 2021) melakukan audit energi dan simulasi MATLAB pada fan boiler pembangkit, menemukan bahwa operasi fan dengan pengaturan damper menimbulkan pemborosan sekitar 13,35 GWh/tahun, sementara penggunaan VFD berpotensi menghemat sekitar 8,23 GWh/tahun atau setara Rp 8,23 miliar, atau sekitar 32,1% dari konsumsi energi. (Kastawan et al., 2025) memodelkan sistem VSD pada motor ID fan menggunakan MATLAB/Simulink dan menunjukkan bahwa VSD mampu menyesuaikan kecepatan motor terhadap kebutuhan aliran sekaligus menjaga tekanan operasi pada kisaran 8,5–9,7 kPa, sehingga lebih efisien dibanding motor kecepatan tetap dengan pengaturan pitch blade. (Turinno et al., 2025) mengukur konsumsi energi dan aliran udara pada dust collector fan industri baja dan mendapati penghematan sekitar 1,25 juta kWh/tahun atau Rp 1,249 miliar, setara efisiensi 28,5%.

Selain aspek penghematan energi, sejumlah penelitian menyoro dampak VSD terhadap keandalan mekanis sistem fan. (Wang et al., 2023) menunjukkan bahwa kondisi belt fan yang selip atau longgar dapat dideteksi melalui perubahan hubungan antara daya, kecepatan, tekanan, dan aliran udara berdasarkan model data-driven, tanpa perlu memasang flow meter permanen. (Shandookh et al., 2024) memperkuat temuan ini dengan membuktikan bahwa kerusakan belt drive dapat dideteksi secara akurat melalui analisis sinyal getaran menggunakan metode Taguchi dan Random Forest, dengan akurasi mencapai 0,990. Kedua studi ini relevan dengan motor TCA yang juga menggunakan transmisi fan belt, karena starting motor secara bertahap melalui VSD dipercaya dapat mengurangi hentakan torsi dan potensi slip pada belt saat start. Di sisi lain, (Song-Manguelle et al., 2010) mengingatkan adanya risiko mekanis dari

penggunaan VFD, yaitu kemungkinan resonansi torsional pada poros akibat harmonisa torsi yang berimpit dengan frekuensi natural sistem, terutama pada kompresor berkapasitas besar.

Dari sisi pemodelan dan validasi teknis, (Turkeri & Kiselychnyk, 2023) mengembangkan model nonlinier motor dan fan sentrifugal yang tervalidasi secara eksperimen dan dapat digunakan untuk merancang sistem kendali berbasis VFD. (Shrirao et al., 2022) melalui tinjauan literatur menegaskan bahwa peralatan bantu pembangkit dapat mengonsumsi 5–8% dari total produksi listrik, dan VFD dinilai efektif untuk menekan konsumsi tersebut pada peralatan dengan kebutuhan aliran fluktuatif seperti ID fan, cooling tower fan, pompa, dan kompresor.

Dari aspek kelayakan ekonomi, beberapa penelitian menunjukkan bahwa manfaat VSD tidak berdiri sendiri, melainkan dipengaruhi oleh banyak faktor eksternal. (Miller et al., 2012) menggunakan pemodelan spreadsheet dan discounted cash flow pada motor berkapasitas 4–186 kW dan menyimpulkan bahwa kelayakan investasi VFD sangat bergantung pada profil beban, biaya listrik, demand charge, biaya pemasangan, kondisi iklim, dan jam operasi. (Kapp et al., 2024) melalui analisis data audit energi industri secara luas menemukan bahwa penerapan VFD berskala besar berpotensi menurunkan emisi lebih dari 4,7 juta ton CO₂ serta memberi kontribusi ekonomi regional hampir USD 1 miliar. (Dhayaneswaran & Ashok Kumar, 2014) pada studi lapangan motor tekstil mencatat penghematan sekitar 3,6 kWh per siklus operasi mesin. Sementara itu, (De Almeida et al., 2019) menyimpulkan bahwa meski VSD merupakan salah satu peluang penghematan energi dan emisi paling efektif pada motor dengan beban berubah-ubah, penerapannya masih terhambat oleh biaya investasi awal dan kebijakan yang belum mendukung sepenuhnya.

Secara keseluruhan, penelitian-penelitian terdahulu tersebut menunjukkan bahwa VSD berpotensi memberikan tiga manfaat utama pada motor TCA, yaitu menurunkan konsumsi energi, mengurangi tekanan mekanis pada sistem fan belt, serta menekan kerugian operasi akibat gangguan dan runback. Namun demikian, kelayakan penerapannya tetap perlu dikonfirmasi melalui profil beban aktual, kualitas daya, biaya investasi, serta data historis gangguan di PLTGU yang dikaji.

Sebagai landasan teori, PLTGU merupakan pembangkit yang mengombinasikan turbin gas berbasis siklus Brayton dengan turbin uap yang memanfaatkan panas gas buang melalui HRSG untuk menghasilkan uap penggerak turbin uap. PLTGU UP Muara Karang mengoperasikan skema 2 on 3 (dua gas turbine, dua HRSG, tiga steam turbine) dan 1 on 2 untuk mode combine cycle. Pada gas turbine jenis M701F, sistem advance cooling memanfaatkan udara kompresor untuk mendinginkan bagian hot gas path, termasuk vane dan blade turbin. Turbine Cooling Air (TCA) berfungsi sebagai sistem heat exchanger yang menukar panas udara outlet kompresor bersuhu 380–460°C menggunakan fan sebagai media konveksi paksa memanfaatkan suhu ambient, dan juga menyertakan fuel gas heater yang memanfaatkan panas konveksi dari tube outlet kompresor. Tiga fan pada TCA beroperasi dengan pola berbeda: Fan A start saat putaran turbin gas mencapai 2000 rpm dan stop satu jam setelah shutdown, Fan B start pada suhu Rotor Cooling Air 255°C dan stop pada 195°C, sedangkan Fan C start pada 270°C dan stop pada 220°C. Udara hasil pendinginan TCA kemudian dialirkan ke rotor turbin menuju vane maupun blade; pendinginan vane memanfaatkan discharge udara dari stage kompresor nomor 6, 11, 14, dan discharge kompresor, sedangkan pendinginan blade memanfaatkan udara discharge kompresor yang

telah didinginkan TCA hingga 220°C, yang juga berfungsi sebagai seal udara untuk mencegah kebocoran panas ke komponen sensitif seperti bearing. Gas turbine juga dilengkapi sistem proteksi berupa auto stop (penurunan beban 1,6 MW/menit hingga lepas tegangan), trip (pelepasan beban langsung dari jaringan), serta load runback yang terbagi menjadi normal, middle, fast, dan very fast dengan laju penurunan beban berbeda-beda menuju 120 MW.

Motor induksi tiga fasa bekerja berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik, terdiri atas stator sebagai bagian diam dan rotor sebagai bagian berputar, baik berupa rotor sangkar tupai maupun rotor belitan. Medan magnet putar pada stator menginduksi arus pada rotor sehingga menghasilkan torsi elektromagnetik yang memutar rotor, dengan kecepatan rotor selalu sedikit lebih rendah dari kecepatan medan magnet stator akibat adanya slip. Motor jenis ini banyak digunakan pada pompa, kompresor, konveyor, blower, dan fan karena konstruksinya sederhana, kuat, dan mudah dirawat. Parameter kinerja motor meliputi kecepatan sinkron yang ditentukan oleh frekuensi dan jumlah kutub, slip yang menunjukkan selisih relatif kecepatan sinkron dan kecepatan aktual, daya masukan yang dipengaruhi tegangan, arus, dan faktor daya, efisiensi sebagai rasio daya keluaran terhadap daya masukan, serta torsi yang berkaitan dengan daya mekanik dan kecepatan sudut motor.

Metode starting Direct on Line (DOL) merupakan metode paling sederhana karena motor dihubungkan langsung ke tegangan nominal tanpa peralatan tambahan, sehingga menghasilkan torsi awal maksimum namun juga menimbulkan arus start tinggi, umumnya 6–8 kali arus nominal, yang dapat menyebabkan voltage dip, rugi-rugi listrik, kenaikan temperatur belitan, serta beban mekanis besar pada sistem transmisi seperti fan belt. Sebagai alternatif, Variable Speed Drive mengendalikan kecepatan, torsi, dan arah putaran motor dengan mengatur frekuensi dan tegangan keluaran, sehingga kecepatan motor dapat disesuaikan secara kontinu dengan kebutuhan proses tanpa mengubah karakteristik mekanis motor. Menurut IEC 61800-2, VSD merupakan sistem penggerak listrik terpadu yang terdiri atas konverter daya, pengendali, dan motor listrik. Untuk mendukung analisis teknis, digunakan perangkat lunak ETAP (Electrical Transient Analyzer Program) yang mampu memodelkan sistem kelistrikan motor serta menganalisis respons dinamis motor pada metode pengasutan DOL maupun VSD melalui parameter arus, torsi, kecepatan, tegangan terminal, dan waktu akselerasi.

Sementara itu, kelayakan investasi VSD dievaluasi menggunakan tiga indikator ekonomi utama. Net Present Value (NPV) mengukur selisih nilai sekarang dari arus kas masa depan terhadap biaya investasi, dengan nilai positif menandakan investasi layak dijalankan. Internal Rate of Return (IRR) merupakan tingkat diskonto yang membuat NPV bernilai nol, sehingga semakin tinggi IRR maka investasi dianggap semakin baik dan dapat digunakan untuk membandingkan beberapa opsi investasi. Adapun Payback Period mengukur lamanya waktu yang dibutuhkan untuk menutup biaya investasi awal melalui arus kas yang dihasilkan, dengan periode yang lebih pendek menunjukkan investasi yang lebih menarik.

METODE PENELITIAN

Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian dilaksanakan di PLTGU Unit Pembangkitan Muara Karang yang berlokasi di Jl. Pluit Karang Ayu No. 1, Kecamatan Penjaringan, Kota Jakarta Utara, Provinsi DKI Jakarta. Penelitian dilaksanakan selama lima bulan, yaitu mulai Maret sampai Juli 2026. Pengumpulan

data dilakukan secara langsung di lokasi penelitian dan secara daring. Data historis gangguan yang digunakan dalam penelitian mencakup periode 27 November 2017 sampai 9 Juni 2026.

Penelitian dilaksanakan selama Maret sampai Juli 2026. Pada tahap awal dilakukan perumusan topik dan identifikasi permasalahan. Selanjutnya dilakukan studi literatur, wawancara, dan observasi untuk memperoleh dasar teori serta gambaran kondisi aktual sistem TCA. Pengumpulan data dilakukan pada Mei sampai Juni 2026, kemudian dilanjutkan dengan pengolahan dan analisis data pada Juni sampai Juli 2026. Tahap akhir berupa penyusunan dan penyelesaian laporan penelitian dilakukan pada Juni sampai Juli 2026.

Desain Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan metode studi kasus, analisis komparatif, dan analisis tekno ekonomi. Objek penelitian adalah motor Turbine Cooling Air (TCA) di PLTGU UP Muara Karang. Penelitian dilakukan dengan membandingkan dua kondisi pengoperasian motor, yaitu kondisi eksisting menggunakan metode pengasutan Direct On Line (DOL) dan kondisi usulan menggunakan Variable Speed Drive (VSD).

Simulasi dilakukan menggunakan perangkat lunak ETAP 19.0.1 untuk mengetahui karakteristik pengoperasian motor pada kedua metode pengasutan. Parameter yang dibandingkan meliputi arus, torsi, kecepatan, tegangan, daya, efisiensi, faktor daya, dan waktu akselerasi. Hasil perbandingan digunakan untuk mengetahui pengaruh penggunaan VSD terhadap proses pengasutan motor serta beban mekanis pada fan belt TCA yang berkaitan dengan potensi terjadinya gangguan dan runback.

Selain analisis teknis, penelitian juga melakukan analisis ekonomi untuk mengetahui kelayakan pemasangan VSD. Analisis ekonomi dilakukan dengan mempertimbangkan biaya investasi, potensi kerugian akibat gangguan runback, serta manfaat ekonomi yang diperoleh dari pengurangan gangguan. Kelayakan investasi kemudian dinilai menggunakan Net Present Value (NPV), Internal Rate of Return (IRR), dan Payback Period (PP).

Penelitian dilaksanakan melalui beberapa tahapan, yaitu identifikasi masalah, studi literatur, pengumpulan data, pemodelan sistem pada ETAP, simulasi kondisi DOL dan VSD, analisis teknis, analisis ekonomi, evaluasi hasil, serta penyusunan kesimpulan dan rekomendasi.

Metode Pengumpulan Data

Data yang digunakan dalam penelitian terdiri atas data primer dan data sekunder. Data primer diperoleh melalui observasi langsung terhadap sistem TCA dan wawancara dengan personel operasi serta pemeliharaan. Observasi dilakukan untuk mengetahui kondisi motor, fan, fan belt, pulley, panel motor, sistem pengasutan, serta pola pengoperasian peralatan. Wawancara dilakukan untuk memperoleh informasi mengenai mekanisme kerja TCA, pola gangguan fan belt, indikasi gangguan pada ruang kontrol, hubungan gangguan TCA dengan runback, tindakan pemulihan setelah gangguan, serta kebutuhan pengoperasian motor apabila VSD diterapkan.

Data sekunder diperoleh dari dokumen teknis dan operasional PLTGU UP Muara Karang. Data tersebut meliputi manual book, datasheet motor TCA, data parameter fan dan fan belt, single line diagram, spesifikasi VSD, data pembebanan unit, laporan kinerja peralatan, serta riwayat gangguan runback. Selain itu, digunakan data HPP dan BPP untuk mendukung analisis ekonomi, hasil simulasi dynamic ETAP berupa arus, torsi, kecepatan, tegangan, frekuensi, dan daya terhadap waktu, serta data estimasi biaya investasi pemasangan VSD.

Data parameter motor yang digunakan dalam pemodelan adalah motor induksi tiga fasa tipe squirrel cage dengan daya 7,5 kW, tegangan 380 V, frekuensi 50 Hz, kecepatan nominal 1.440 rpm, dan arus nominal 15 A. Motor eksisting menggunakan metode pengasutan DOL dengan nilai arus starting sebesar 6,5 kali arus nominal. Beban motor berupa axial flow fan dengan jumlah tiga unit dan inersia fan sebesar 63 kgm².

VSD yang digunakan dalam pemodelan adalah Schneider Electric Altivar Process tipe ATV630D11N4. VSD memiliki tegangan masukan 380–480 V dan digunakan dalam kategori heavy duty untuk motor 7,5 kW. Pemodelan VSD dilakukan dengan pengaturan kontrol frekuensi, frekuensi akhir 50 Hz, serta waktu akselerasi dan deselerasi masing-masing 10 detik.

Data historis gangguan digunakan untuk mengetahui karakteristik kejadian runback dan dampaknya terhadap pembangkitan. Data tersebut mencakup tanggal kejadian, durasi gangguan, beban pembangkit sebelum dan sesudah gangguan, serta perubahan daya pada unit turbin gas dan turbin uap. Data historis tersebut kemudian digunakan sebagai dasar dalam memperkirakan energi yang tidak dapat diproduksi dan potensi kerugian akibat gangguan.

Estimasi biaya investasi pemasangan VSD meliputi biaya pengadaan VSD, panel dan enclosure, perangkat proteksi, sistem bypass, kabel dan aksesoris, jasa pemasangan, pengaturan parameter, pengujian, commissioning, mobilisasi, serta biaya kontingensi. Berdasarkan estimasi yang digunakan dalam penelitian, total investasi pemasangan VSD adalah sebesar Rp125.400.000.

Metode Analisis Data

Analisis data dilakukan melalui dua tahap, yaitu analisis teknis dan analisis ekonomi. Analisis teknis dilakukan menggunakan hasil simulasi dynamic pada ETAP 19.0.1 dengan membandingkan kondisi pengasutan DOL dan VSD. Simulasi dilakukan dengan memasukkan parameter motor, fan, sistem kelistrikan, karakteristik beban, inersia, serta parameter pengoperasian VSD. Hasil simulasi dianalisis berdasarkan arus starting, torsi, kecepatan motor, waktu akselerasi, tegangan, daya, efisiensi, dan faktor daya.

Hasil simulasi DOL dan VSD kemudian dibandingkan untuk mengetahui perubahan karakteristik motor selama proses starting. Perhatian utama diberikan pada besarnya arus dan torsi starting karena kedua parameter tersebut berkaitan dengan beban awal yang diterima motor dan sistem mekanis fan belt. Penurunan arus dan torsi serta perubahan waktu akselerasi digunakan untuk menilai kemampuan VSD dalam menghasilkan proses starting yang lebih terkendali dan mengurangi beban kejutan pada fan belt.

Analisis ekonomi dilakukan dengan menggunakan data historis gangguan runback, durasi gangguan, perubahan daya pembangkit, HPP, dan BPP. Energi yang tidak dapat diproduksi akibat gangguan dihitung berdasarkan besarnya penurunan daya dan lama gangguan. Nilai tersebut kemudian digunakan untuk memperkirakan loss opportunity akibat gangguan runback.

Potensi manfaat pemasangan VSD diperoleh dari estimasi pengurangan gangguan dan kerugian yang dapat dihindari. Nilai manfaat tersebut kemudian dibandingkan dengan biaya investasi pemasangan VSD. Kelayakan investasi dianalisis menggunakan NPV, IRR, dan Payback Period. Investasi dinyatakan layak apabila NPV bernilai positif, IRR lebih besar daripada tingkat pengembalian minimum yang ditetapkan, dan Payback Period berada dalam periode yang lebih pendek dibandingkan umur ekonomis investasi.

Hasil analisis teknis dan ekonomi selanjutnya diinterpretasikan secara terpadu untuk menentukan apakah pemasangan VSD pada motor TCA layak diterapkan sebagai upaya

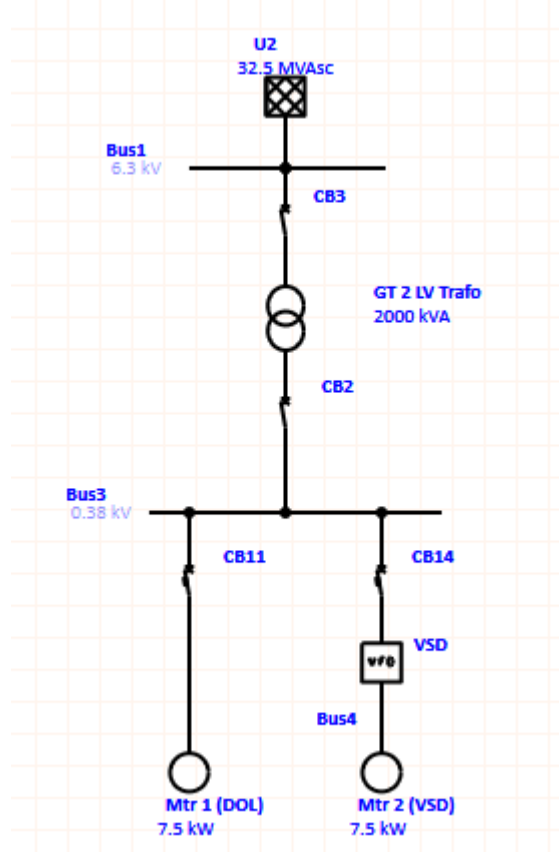
mengurangi beban mekanis saat starting, meminimalkan gangguan fan belt, dan mengurangi risiko runback di PLTGU UP Muara Karang.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis Hasil Simulasi Dinamis Motor TCA

Analisis hasil simulasi dinamis motor TCA dilakukan dengan membandingkan metode pengasutan Direct on Line dan Variable Speed Drive. Simulasi berlangsung selama 20 detik, dengan perintah starting diberikan pada detik ke-2. Pada metode VSD, frekuensi dan tegangan motor dinaikkan secara bertahap dari 0% sampai 100% selama 10 detik, yaitu dari detik ke-2 sampai detik ke-12.

Perhitungan menggunakan data dasar motor berupa daya nominal sebesar 7,5 kW, tegangan 380 V, arus nominal pada ETAP sebesar 14,82 A, kecepatan nominal 1.440 rpm, kecepatan sinkron 1.500 rpm, dan jumlah kutub sebanyak empat buah. Beban motor merupakan tipe axial fan yang dihubungkan dengan sistem transmisi fanbelt.



Gambar 1 Single line diagram simulasi dinamis pengasutan motor TCA

Sebelum simulasi dinamis dilakukan, sistem kelistrikan motor TCA terlebih dahulu dimodelkan dalam bentuk single line diagram menggunakan perangkat lunak ETAP. Pemodelan dimulai dengan sumber sistem dari Power Grid sebesar 32,5 MVA pada bus 6,3 kV, kemudian dihubungkan ke transformator step down berkapasitas 2.000 kVA dengan rasio tegangan 6,3/0,38 kV. Pada sisi sekunder transformator terdapat bus tegangan rendah 0,38 kV yang menyuplai dua motor induksi tiga fasa berkapasitas 7,5 kW. Motor pertama dimodelkan menggunakan metode pengasutan Direct on Line melalui LV circuit breaker (CB11),

sedangkan motor kedua menggunakan Variable Speed Drive melalui LV circuit breaker (CB14). Pemutus tenaga HV circuit breaker CB3 dan CB2 yang ditempatkan pada sisi primer dan sekunder transformator sebagai representasi sistem proteksi dan pemisah jaringan.

Cable/Vd	Cable Amp	Protection	Reliability	Remarks	Comment
Info	Nameplate	Imp	Model	Inertia	Load
1	7.5 kW 0.38 kV				

Cable Info not available

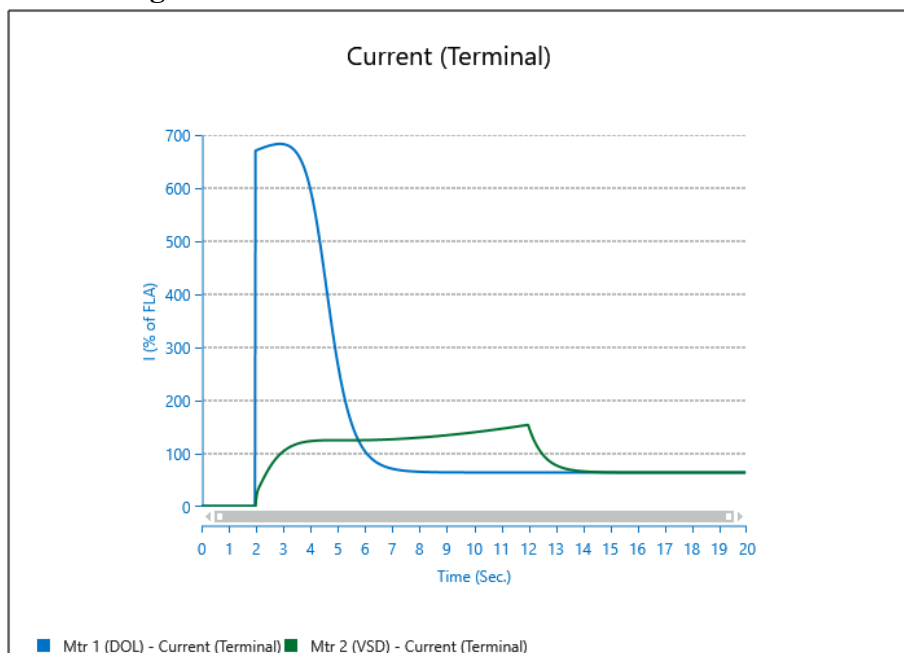
Ratings

FL	75 %	50 %	NL	OL	
100 %			0 %	100 %	
kW	7.5	kV	0.38	% PF	86
kVA	9.89	FLA	15.02	% Eff	88.2
Poles	4	RPM	1500	% FLA	100
% Slip	4	RPM	1440	SF	1

Gambar 2 Gambar pengisian parameter motor TCA sesuai kondisi aktual

Pembuatan single line diagram bertujuan untuk merepresentasikan konfigurasi sistem kelistrikan aktual serta memastikan seluruh peralatan memiliki hubungan dan tingkat tegangan yang sesuai sebelum simulasi dijalankan. Data sumber, transformator, bus, circuit breaker, motor, kabel, beban, dan VSD dimasukkan berdasarkan data teknis yang sesuai dengan datasheet peralatan. Parameter kedua motor dibuat sama, sehingga perbedaan respons simulasi hanya dipengaruhi oleh metode pengasutannya. Setelah model selesai, dilakukan pemeriksaan konektivitas, rating tegangan, kapasitas peralatan, arah aliran daya, dan kelengkapan parameter dinamis. Model yang telah tervalidasi selanjutnya digunakan untuk membandingkan respons motor DOL dan VSD.

Analisis Arus Starting



Gambar 3 Grafik arus terminal motor TCA dengan pengasutan DOL dan VSD

Hasil simulasi menunjukkan bahwa pengasutan DOL menghasilkan arus starting yang sangat tinggi. Pada saat kontaktor DOL menutup pada detik ke-2, arus motor langsung mencapai sekitar 669,40% FLA. Arus kemudian meningkat dan mencapai nilai maksimum sebesar 682,07% FLA pada detik ke-2,90. Dengan arus nominal motor sebesar 14,82 A, nilai tersebut ekuivalen dengan arus maksimum sekitar 101,08 A.

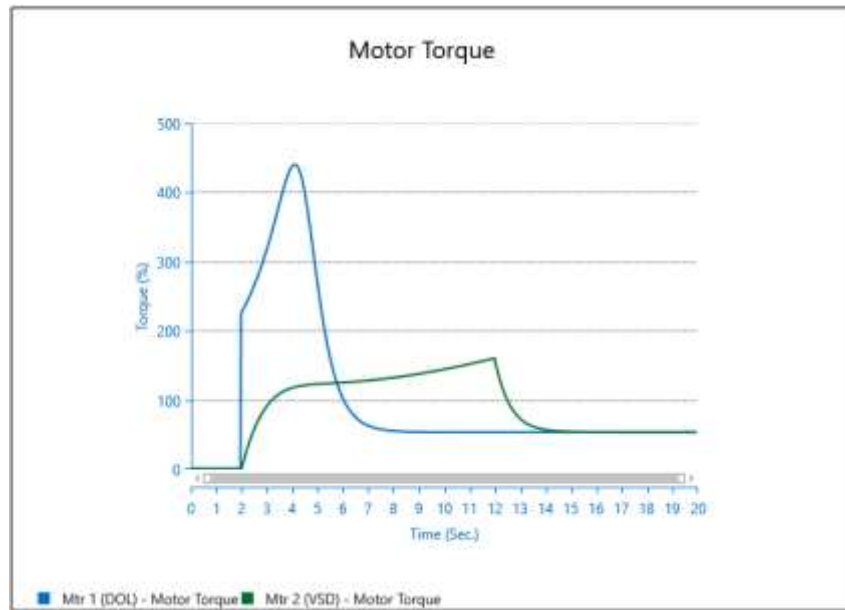
Besarnya arus tersebut sesuai dengan karakteristik motor induksi yang dihubungkan secara langsung ke sumber tegangan. Pada kondisi rotor diam, slip motor sama dengan satu sehingga impedansi ekuivalen motor relatif rendah. Akibatnya, motor menyerap arus magnetisasi dan arus rotor yang sangat besar. Arus baru menurun secara signifikan setelah motor memperoleh kecepatan yang cukup tinggi dan slip motor berkurang. Pada detik ke-5, arus masih sebesar 273,70% FLA, kemudian turun menjadi 104,62% FLA pada detik ke-6 dan mencapai kondisi tunak sekitar 63,56% FLA.

Pada metode VSD, arus motor meningkat secara bertahap mengikuti kenaikan frekuensi, tegangan, kecepatan, dan kebutuhan torsi beban. Arus tidak mengalami lonjakan secara tiba-tiba pada saat motor mulai dijalankan. Arus sebesar 11,81% FLA tercatat pada detik ke-2,02, kemudian meningkat menjadi 71,42% FLA pada detik ke-2,5 dan 102,37% FLA pada detik ke-3. Arus maksimum sebesar 153,29% FLA atau sekitar 22,72 A terjadi pada detik ke-12, tepat ketika frekuensi dan tegangan mencapai 100%.

Dengan demikian, penggunaan VSD menurunkan arus maksimum sebesar 77,53%. Arus maksimum DOL sekitar 4,45 kali lebih besar daripada arus maksimum VSD. Penurunan ini memberikan keuntungan berupa berkurangnya voltage drop, pemanasan belitan motor, tekanan termal pada kabel dan kontaktor, serta kemungkinan bekerjanya proteksi over current selama proses starting.

Setelah motor mencapai kondisi tunak, arus kedua metode hampir sama, yaitu 63,56% FLA pada DOL dan 63,39% FLA pada VSD. Hal ini menunjukkan bahwa manfaat utama VSD pada kondisi operasi 100% kecepatan bukan terletak pada penurunan arus tunak, melainkan pada pengendalian arus selama proses akselerasi.

Analisis Torsi Motor



Gambar 4 Grafik torsi motor TCA dengan pengasutan DOL dan VSD

Pada metode pengasutan DOL, motor langsung menghasilkan torsi sebesar 224,45% ketika tegangan penuh diberikan. Berdasarkan torsi nominal motor sebesar 49,74 Nm yang didapatkan dari persamaan 2.7 dimana daya listrik motor sebesar 7,5 kW.

Maka torsi awal DOL mencapai sekitar 111,64 Nm. Nilai ini diberikan hampir seketika kepada poros, pulley, dan fan belt. Seiring dengan peningkatan kecepatan, torsi DOL terus meningkat dan mencapai nilai maksimum sebesar 439,74% pada detik ke-4,12. Nilai tersebut ekuivalen dengan torsi sekitar 218,73 Nm. Setelah kecepatan motor mendekati kondisi tunak, torsi turun hingga mencapai sekitar 52,91% atau 26,32 Nm.

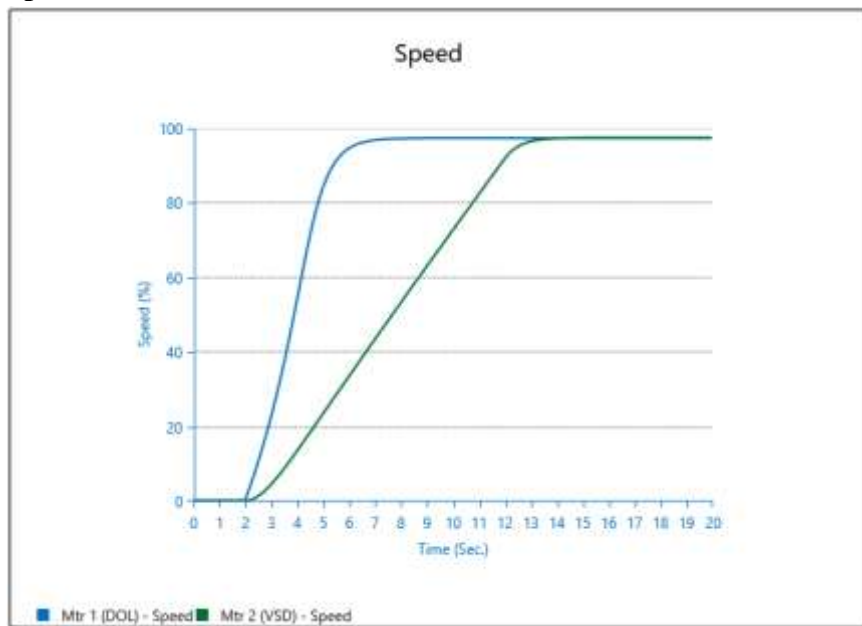
Pada metode VSD, torsi meningkat secara lebih gradual. Pada detik ke-2,02, torsi baru sebesar 0,37%, kemudian meningkat menjadi 55,40% pada detik ke-2,5, 89,68% pada detik ke-3, dan 124,54% pada detik ke-6. Torsi maksimum sebesar 159,85% atau sekitar 79,51 Nm terjadi pada detik ke-12.

Puncak torsi VSD masih berada di atas torsi nominal karena motor harus menghasilkan dua komponen torsi, yaitu torsi untuk menggerakkan beban fan dan torsi untuk mempercepat gabungan inersia rotor, coupling, pulley, fan belt, dan fan. Pada axial fan, kebutuhan torsi beban meningkat mendekati kuadrat kecepatan. Oleh karena itu, torsi motor VSD cenderung meningkat ketika kecepatan mendekati nilai nominal.

Penggunaan VSD menurunkan torsi maksimum sebesar 63,65%. Puncak torsi DOL sekitar 2,75 kali lebih besar daripada puncak torsi VSD. Dibandingkan torsi kondisi tunak, torsi maksimum DOL mencapai sekitar 8,31 kali torsi operasi, sedangkan VSD hanya sekitar 3,01 kali torsi operasi.

Kurva VSD menunjukkan bahwa torsi maksimum terjadi tepat pada akhir acceleration ramp. Kondisi ini menunjukkan bahwa beban fan sudah mendekati kebutuhan torsi maksimum, sementara komponen torsi akselerasi masih terdapat pada sistem. Setelah acceleration ramp selesai, torsi turun dengan cepat menuju nilai tunak.

Analisis Kecepatan Motor



Gambar 5 Grafik kecepatan motor TCA dengan pengasutan DOL dan VSD

Pada motor dengan pengasutan DOL mengalami kenaikan kecepatan yang lebih cepat tetapi tidak linier. Setelah motor dihubungkan pada detik ke-2, kecepatan mencapai 50% pada sekitar detik ke-3,90 atau 1,90 detik setelah starting. Kecepatan 90% tercapai dalam 3,42 detik dan kecepatan 95% tercapai dalam 4,14 detik. Motor mencapai 99% dari kecepatan akhirnya dalam waktu sekitar 4,64 detik. Kecepatan akhir motor DOL sebesar 97,20% dari kecepatan sinkron. Dengan kecepatan sinkron 1.500 rpm, maka kecepatan akhirnya adalah 97,20% dari kecepatan sinkron atau sebesar 1458 rpm.

Pada VSD, frekuensi dinaikkan secara linier selama 10 detik. Kecepatan motor mengikuti kenaikan frekuensi dengan sedikit keterlambatan akibat inersia mekanis dan slip. Kecepatan 50% tercapai dalam waktu 5,70 detik setelah perintah start, kecepatan 90% tercapai dalam 9,84 detik, dan kecepatan 95% tercapai dalam 10,54 detik.

Pada saat frekuensi VSD telah mencapai 100% pada detik ke-12, kecepatan motor baru sebesar 91,67% atau sekitar 1.375 rpm. Motor kemudian tetap mengalami akselerasi hingga mencapai 99% dari kecepatan akhirnya pada detik ke-13,04, yaitu sekitar 11,04 detik setelah perintah start. Dengan demikian, acceleration ramp 10 detik tidak berarti motor langsung mencapai kecepatan akhir dalam tepat 10 detik. Masih diperlukan sekitar satu detik tambahan untuk mengatasi selisih kecepatan dan mencapai kondisi mekanis yang stabil.

Kecepatan akhir motor VSD sebesar 97,33% atau sekitar 1.460 rpm. Kecepatan ini sedikit lebih tinggi daripada DOL, tetapi perbedaannya hanya sekitar 2 rpm sehingga tidak signifikan secara operasional. Kecepatan kedua motor tidak mencapai 1.500 rpm meskipun frekuensi telah mencapai 50 Hz. Hal tersebut merupakan kondisi normal pada motor induksi karena rotor harus berputar sedikit lebih lambat daripada medan magnet stator agar terbentuk slip dan torsi elektromagnetik. Slip kondisi tunak DOL sekitar 2,80%, sedangkan slip VSD sekitar 2,67%.

Rata-rata percepatan DOL sampai mendekati kecepatan akhir sekitar 314 rpm/s, sedangkan VSD sekitar 132 rpm/s. Penurunan percepatan rata-rata sekitar 58% menunjukkan bahwa VSD memberikan proses akselerasi yang jauh lebih lembut.

Analisis Efisiensi

Efisiensi motor dihitung berdasarkan perbandingan daya mekanis yang dikembangkan motor dan daya listrik yang masuk ke motor diketahui pada persamaan 2.4. Sedangkan daya mekanis dihitung menggunakan torsi dan kecepatan aktual sesuai dengan persamaan 2.7.

Pada kondisi tunak DOL, torsi motor sebesar 52,91% atau 26,32 Nm dan kecepatan sebesar 1.458 rpm. Daya mekanis yang dihasilkan diperkirakan sebesar 4,018 kW. Dengan daya listrik kondisi tunak sebesar 4,592 kW, sehingga efisiensi motor yang didapatkan adalah sebagai berikut:

$$\eta_{DOL} = \frac{4,018}{4,592} \times 100\% = 87,49\%$$

Pada kondisi tunak VSD, torsi motor sebesar 53,05% atau 26,39 Nm dan kecepatan sebesar 1.460 rpm. Daya mekanis diperkirakan sebesar 4,034 kW. Dengan daya listrik sebesar 4,747 kW, efisiensi motor yang didapatkan adalah sebagai berikut:

$$\eta_{VSD} = \frac{4,034}{4,747} \times 100\% = 84,99\%$$

Hasil tersebut menunjukkan bahwa efisiensi motor pada simulasi VSD sekitar 2,50% lebih rendah daripada DOL. Perbedaan ini dapat berkaitan dengan karakteristik model VSD, tambahan rugi-rugi elektromagnetik motor ketika disuplai inverter, perbedaan kecil titik operasi, dan representasi gelombang tegangan pada simulasi.

Nilai tersebut belum dapat dianggap sebagai efisiensi total sistem VSD karena kanal daya yang dianalisis merupakan daya listrik motor. Untuk memperoleh efisiensi total drive, diperlukan daya aktif pada sisi masukan VSD serta rugi-rugi konverter. Secara umum efisiensi sistem merupakan perkalian antara efisiensi VSD dengan efisiensi motor.

Meskipun daya maksimum VSD jauh lebih rendah, daya kondisi tunaknya sedikit lebih tinggi daripada DOL, yaitu 4,747 kW dibandingkan 4,592 kW. Hal ini menunjukkan bahwa pada operasi 100% kecepatan, VSD tidak secara otomatis menghasilkan penghematan energi. Penghematan berdasarkan affinity law baru akan menjadi signifikan apabila motor dioperasikan pada kecepatan di bawah 100% sesuai kebutuhan aliran fan.

Namun, selama proses starting, VSD tetap memberikan keuntungan termal yang besar. Daya listrik maksimum turun dari 42,97 kW menjadi 14,49 kW. Energi tambahan selama periode akselerasi, setelah dikurangi kebutuhan daya kondisi tunak, turun dari sekitar 0,02886 kWh pada DOL menjadi 0,00569 kWh pada VSD. Penurunan sekitar 80,29% ini menunjukkan berkurangnya energi yang berubah menjadi rugi-rugi dan panas selama starting.

Analisis Potensi Pendapatan dari Gangguan Fan Belt

Kerugian Kesempatan Produksi

Gangguan runback pada unit pembangkit menghasilkan kerugian kesempatan produksi atau loss opportunity dihitung dari daya pembangkit yang tidak diproduksi dan selisih antara HPP dan BPP. Rincian daya pembangkit yang hilang dapat diketahui pada tabel 3.4 dan tabel 3.5. Sebagai contoh, apabila penurunan daya total GT dan ST sebesar 133.000 kW, durasi gangguan 30 menit atau 0,5 jam, HPP sebesar Rp 1.500/kWh, dan BPP sebesar Rp 1.277/kWh, maka nilai kerugian kesempatan produksinya adalah sebesar Rp 14.829.500. Contoh perhitungan kerugian kesempatan produksi adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 \text{Loss of Opportunity} &= (\text{HPP}-\text{BPP}) \times \text{Daya Pembangkit} \times \text{Durasi Waktu Gangguan} \\
 &= \text{Rp } (1.500-1.277) / \text{kWh} \times 133.000 \text{ kW} \times 0,5 \text{ h} \\
 &= \text{Rp } 14.829.500
 \end{aligned}$$

Perhitungan dilakukan untuk seluruh kejadian gangguan. Hasilnya kemudian digunakan sebagai dasar untuk mengestimasi manfaat ekonomi yang dapat diperoleh apabila pemasangan VSD mampu menurunkan frekuensi atau dampak gangguan fan belt.

Tabel 1 Rincian Loss of Opportunity dari gangguan runback

Tanggal	HPP (Rp)	BPP (Rp)	Waktu Gangguan (h)	Daya GT yang Hilang (kW)	Daya ST yang Hilang (kW)	Loss of Opportunity
27/1/2017	1175	973	0,65	29000	8000	Rp 4.858.100
16/10/2018	1500	1277	0,367	32000	6000	Rp 3.107.133
24/10/2018	1500	1277	0,5	72000	61000	Rp 14.829.500
1/11/2018	1500	1277	0,3	26000	22000	Rp 3.211.200
8/11/2018	1500	1277	0,2167	23000	18000	Rp 1.980.983
7/12/2018	1500	1277	0,433	74000	64000	Rp 13.335.400
29/9/2020	1365	1208	0,433	68000	24000	Rp 6.259.067
30/10/2020	1365	1208	0,333	35000	11000	Rp 2.407.333
14/08/2021	1280	1068	0,533	20000	9000	Rp 3.278.933
16/08/2021	1280	1068	0,383	55000	19000	Rp 6.013.733
9/6/2026	1683	1350	0,383	55000	0	Rp 7.020.750
Total Loss of Opportunity						Rp 66.302.133

Berdasarkan perhitungan di atas, diketahui bahwa total Loss of Opportunity selama terjadinya gangguan runback yang diakibatkan oleh putus atau lepasnya fan belt motor TCA dalam periode tahun 2017 hingga 2026 adalah sebesar Rp 66.302.133.

Biaya Pengadaan Fan Belt

Potensi pendapatan dari biaya pengadaan fan belt pada penelitian ini dinyatakan sebagai penghematan biaya operasional atau cost saving. Pemasangan VSD dapat mengurangi lonjakan torsi dan beban kejutan saat motor mulai beroperasi sehingga risiko slip, keausan, dan kerusakan fan belt diperkirakan menurun. Penghematan dapat dihitung dari biaya penggantian fan belt yang dapat dihindari.

Tabel 2 Rincian Potensi Pendapatan dari Biaya Penggantian Fan Belt

Tahun	Jumlah Penggantian	Harga	Total
2017	1	Rp 2.007.826	Rp 2.007.826
2018	6	Rp 2.007.826	Rp 12.046.956
2019	5	Rp 2.007.826	Rp 10.039.130
2020	2	Rp 2.007.826	Rp 4.015.652
2021	11	Rp 2.007.826	Rp 22.086.086
2022	2	Rp 2.007.826	Rp 4.015.652
2023	3	Rp 2.007.826	Rp 6.023.478
2024	3	Rp 2.007.826	Rp 6.023.478
2025	3	Rp 2.007.826	Rp 6.023.478
2026	4	Rp 2.007.826	Rp 8.031.304
Total Potensi Biaya Penghematan			Rp 80.313.040

Berdasarkan perhitungan pada tabel 4.2, diketahui bahwa potensi pendapatan dari biaya penghematan penggantian fan belt yang diakibatkan oleh putus atau lepasnya fan belt motor TCA dalam periode tahun 2017 hingga 2026 adalah sebesar Rp 80.313.040.

Analisis Kelayakan Investasi Pemasangan Variable Speed Drive (VSD)

Tabel 3 Asumsi pada perhitungan pemasangan VSD pada motor TCA

No	Deskripsi	Jumlah
1	Masa Manfaat Ekonomis (Tahun)	15
2	Suku Bunga (<i>Discount Factor</i>)	9%
3	Inflasi	3%
4	<i>Capacity Factor</i> (CF)	42%

Analisis investasi ini dilakukan dengan menggunakan beberapa asumsi. Hal tersebut digunakan sebagai data pendukung dalam mengestimasi biaya dalam beberapa tahun ke depan. Adapun asumsi-asumsi yang digunakan oleh peneliti dalam penelitian ini tampak pada tabel 3. Variable Speed Drive memiliki masa manfaat 10 hingga 20 tahun, dengan iklim Indonesia yang tropis dan peletakan panel di dalam ruangan, peneliti berasumsi masa manfaat VSD bernilai 15 tahun. Capacity factor yang digunakan dalam perhitungan cash flow, diasumsikan memiliki nilai 42% dalam 10 tahun mendatang. Hal tersebut dipertimbangkan atas dasar kebutuhan listrik di Jakarta yang selalu bertumbuh setiap tahunnya dan PLTGU UP Muara Karang yang sering menjadi pemasok listrik cadangan saat PLTU mengalami gangguan dan perbaikan.



Gambar 6 Grafik cash flow investasi pemasangan Variable Speed Drive

Berdasarkan nilai investasi, biaya, dan potensi pemasukan yang didapat. Dilakukan perhitungan nilai ekonomi seperti Net Present Value, Internal rate of return, dan Payback Period. Dari perhitungan tersebut didapatkan Cash Flow dan Cash In dalam rentang 10 tahun. Dapat dilihat grafik cash flow investasi pemasangan VSD pada Gambar 4.2 Cash Flow merupakan garis berwarna biru sedangkan Cash In merupakan garis berwarna merah. Perhitungan Cash Flow dalam pemasangan Variable Speed Drive menunjukkan grafik dimulai pada nilai minus, hal ini diakibatkan nilai investasi awal yang bernilai sebesar Rp 125.400.000. Pada tahun berikutnya Cash Flow akan naik hingga mulai melandai pada tahun ke 10 akibat masa manfaat ekonomis VSD yang sudah mendekati ujungnya, sehingga dibutuhkan investasi kembali atau perbaikan pada komponen utamanya. Investasi ini memiliki titik Break Even Point pada tahun 2030 dimana garis biru Cash Flow berpotongan dengan garis merah Cash In.

Pada tahun tersebut akumulasi pendapatan atau penghematan yang dihasilkan dari pemasangan VSD telah berhasil menutup seluruh nilai investasi awal.

Tabel 4 Hasil akhir analisis finansial pemasangan Variable Speed Drive

No	Deskripsi	Jumlah
1	PV Cash Out	Rp (125.400.000)
2	PV Cash In	Rp 255.876.717,68
3	NPV	Rp 130.476.717,68
4	IRR	23%
5	Payback Period	2,53 tahun

Berdasarkan Tabel 4.4 dapat diketahui bahwa dengan melakukan investasi sebesar Rp 125.400.000 untuk pemasangan Variable Speed Drive pada motor TCA akan memberikan nilai manfaat keuntungan sebesar Rp 255.876.717,68. Dimana nilai keuntungan bersih atau nilai NPV yang akan didapatkan adalah sebesar Rp 130.476.717,68. Selain itu diketahui bahwa investasi ini memiliki nilai IRR sebesar 23%. Nilai ini diketahui jauh lebih besar dari nilai discount factornya sehingga dapat menjadi acuan bahwa pemasangan sensor Variable Speed Drive dapat dikatakan investasi yang layak dan menghasilkan keuntungan.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis teknis dan ekonomi pemasangan Variable Speed Drive (VSD) pada motor Turbine Cooling Air (TCA) di PLTGU UP Muara Karang, dapat disimpulkan bahwa penerapan VSD mampu memberikan proses pengasutan yang lebih rendah dan terkendali dibandingkan metode Direct On Line (DOL). Pada kondisi eksisting dengan DOL, arus starting mencapai 682,07% FLA atau 101,08 A, dengan torsi maksimum 439,74% atau 218,73 Nm dan waktu mencapai kecepatan akhir sekitar 4,64 detik. Sementara itu, penggunaan VSD menurunkan arus starting menjadi 153,29% FLA atau 22,72 A dan torsi maksimum menjadi 159,85% atau 79,51 Nm, dengan waktu mencapai kecepatan akhir sekitar 11,04 detik. Perbandingan tersebut menunjukkan bahwa VSD mampu menurunkan arus maksimum sebesar 77,53%, torsi maksimum sebesar 63,65%, serta percepatan rata-rata sekitar 58%, sehingga menghasilkan akselerasi motor yang lebih lembut dan berpotensi mengurangi beban mekanis pada fan belt serta risiko runback. Dari aspek ekonomi, investasi VSD menghasilkan NPV positif sebesar Rp130.476.717,68, IRR sebesar 23%, dan Payback Period selama 2,53 tahun, sehingga pemasangan VSD dinilai layak secara ekonomi.

REFERENSI

- Adi, T. W., Prabowo, E., & Prasadjaningsih, O. (2022). Influence of electricity consumption of industrial and business, electricity price, inflation and interest rate on GDP and investments in Indonesia. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 12(3), 331–340. <https://doi.org/10.32479/ijeeep.13022>
- Atma, H., Surya, A. S., & Marbun, M. P. (2022). The impacts of electric vehicle developments to the Java-Bali interconnection system. *2022 International Conference on Technology and Policy in Energy and Electric Power (ICT-PEP)*, 311–316. <https://doi.org/10.1109/ICT-PEP57242.2022.9988787>
- Batih, H., & Sorapipatana, C. (2016). Characteristics of urban households' electrical energy consumption in Indonesia and its saving potentials. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 57, 1160–1173. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.132>
- Budiyanto, M. A., Triandi, A. O., & Kurniawan, O. (2020). Study on thermodynamic cycle of gas engine power plant 10MW. *AIP Conference Proceedings*, 2227(1), 20006.

- <https://doi.org/10.1063/5.0000962>
- Chapman, S. J. (2012). *Electric machinery fundamentals* (5th ed.). McGraw-Hill Education.
- De Almeida, A., Fong, J., Brunner, C. U., Werle, R., & Van Werkhoven, M. (2019). New technology trends and policy needs in energy efficient motor systems – A major opportunity for energy and carbon savings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 115, 109384. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109384>
- Dhayaneswaran, Y., & Ashok Kumar, L. (2014). A study on current characteristics of induction motor while operating at its base frequency in textile industry. *Energy*, 74, 340–345. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.06.092>
- Kapp, S., Wang, C., McNelly, M., Romeiko, X., & Choi, J.-K. (2024). A comprehensive analysis of the energy, economic, and environmental impacts of industrial variable frequency drives. *Journal of Cleaner Production*, 434, 140474. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.140474>
- Kastawan, I. M. W., Amanda, R., Mulyadi, A. D., Murniyati, D. A. Y., & Zamora, R. (2025). Analysis of the effect of using a variable speed drive on the power consumption of the ID fan drive motor. *E3S Web of Conferences*, 664, 2005. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202566402005>
- Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia. (2025). *Rencana usaha penyediaan tenaga listrik (RUPTL) PT PLN (Persero) tahun 2025–2034*. Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia.
- Miller, P., Olateju, B., & Kumar, A. (2012). A techno-economic analysis of cost savings for retrofitting industrial aerial coolers with variable frequency drives. *Energy Conversion and Management*, 54(1), 81–89. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2011.09.018>
- PLN Nusantara Power. (2026). Protecting the environment: PLN Nusantara Power operates first microalgae carbon capture technology in the power sector at Muara Karang Power Plant. In *PLN Nusantara Power*. <http://www.plnnusantarapower.co.id/media-relation/press-release/jaga-lingkungan-pln-nusantara-power-operasikan-teknologi-carbon-capture-mikro-alga-pltgu-muara-karang-yang-pertama-di-sektor-kenetagalistrik>
- Setiawan, A., Arifin, Z., Jufri, F. H., Sudiarto, B., Garniwa, I., & Setiabudy, R. (2023). Economic analysis of cost-based load shifting implementation on large utility systems using battery energy storage system. *International Journal of Sustainable Energy*, 42(1), 1182–1201. <https://doi.org/10.1080/14786451.2023.2248503>
- Shandookh, A. A., Farhan Ogaili, A. A., & Al-Haddad, L. A. (2024). Failure analysis in predictive maintenance: Belt drive diagnostics with expert systems and Taguchi method for unconventional vibration features. *Heliyon*, 10(13), e34202. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e34202>
- Shrirao, N. M., Sahu, T. T., & Telrandhe, S. (2022). Review on conservation of energy in thermal power plant by using variable frequency drive. *AIP Conference Proceedings*, 2494(1), 70007. <https://doi.org/10.1063/5.0106481>
- Song-Manguelle, J., Schröder, S., Geyer, T., Ekemb, G., & Nyobe-Yome, J.-M. (2010). Prediction of mechanical shaft failures due to pulsating torques of variable-frequency drives. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 46(5), 1979–1988. <https://doi.org/10.1109/TIA.2010.2057397>
- Turinno, S., Facta, M., & Cahyadi, C. (2025). Energy saving of variable frequency drive in dust collector fan motors in the smelting process at the steel industry. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS)*, 16(2), 1399–1408. <https://doi.org/10.11591/ijpeds.v16.i2.pp1399-1408>
- Turkeri, C., & Kiselychnyk, O. (2023). Dynamical modelling of a centrifugal fan driven by an induction motor and experimental validation. *Energies*, 16(18), 6658.

<https://doi.org/10.3390/en16186658>

- Wang, G., Wang, J., Tiarniyu, N., Wang, Z., & Song, L. (2023). Loose belt fault detection and virtual flow meter development using identified data-driven energy model for fan systems. *Sustainability*, 15(16), 12113. <https://doi.org/10.3390/su151612113>
- Wibowo, P. M., Haddin, M., & Marwanto, A. (2021). Energy saving analysis of air fan motor in power plant boiler controlled by variable frequency drive. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS)*, 12(4), 2059–2069. <https://doi.org/10.11591/ijpeds.v12.i4.pp2059-2069>