Evaluasi Performa Pompa Sentrifugal Air Umpan Boiler pada Sistem Industri

Kunarto, Riza Muhida, Muhammad Riza, Erry Yulian T Adesta, Indra Surya, Zein Muhamad, Bambang Pratowo, Harjono Saputro, Mulyana, Adi Saputra

Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Bandar Lampung, Bandar Lampung 35143, Indonesia
Email: Kunarto@ubl.ac.id
Email: adi.22321013@student.ubl.ac.id

Abstrak. Boiler Feed Water Pump (BFWP) merupakan komponen kritis dalam sistem boiler karena berperan menjaga kontinuitas suplai air bertekanan tinggi menuju boiler untuk mendukung proses pembentukan uap. Penurunan kemampuan pompa akibat perubahan kondisi operasi, kerugian energi pada sistem perpipaan, dan degradasi komponen dapat meningkatkan konsumsi energi serta menurunkan keandalan sistem produksi. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi performa pompa sentrifugal sebagai penyedia air umpan boiler berdasarkan parameter debit aliran, head total, daya hidrolik, dan efisiensi pompa pada kondisi operasi aktual. Metode penelitian menggunakan pendekatan deskriptif kuantitatif dengan memanfaatkan data operasional selama 32 hari yang diperoleh melalui observasi lapangan, dokumentasi teknis, dan data spesifikasi peralatan serta sistem perpipaan. Analisis dilakukan menggunakan prinsip mekanika fluida untuk menentukan karakteristik kerja pompa berdasarkan hubungan antara debit, tekanan, kehilangan energi, dan transfer energi ke fluida. Hasil evaluasi menunjukkan debit rata-rata sebesar 94,11 m^3/jam, head total 337,06 m, dan efisiensi 60,27%. Meskipun debit aktual berada di bawah kapasitas desain 125 m^3/jam, pompa masih mampu memenuhi kebutuhan suplai air umpan boiler. Hasil penelitian memberikan evaluasi berbasis data aktual yang dapat digunakan sebagai dasar optimasi operasi, pemeliharaan, dan peningkatan keandalan sistem perpompaan industri.

Kata kunci. pompa sentrifugal; keandalan sistem boiler; kinerja hidrolik; kehilangan energi; titik operasi pompa.

1 Pendahuluan

Boiler merupakan salah satu sistem utama pada industri proses yang berfungsi menghasilkan uap untuk mendukung berbagai aktivitas produksi. Keandalan operasi boiler sangat dipengaruhi oleh kestabilan suplai air umpan karena ketersediaan air dengan tekanan dan laju aliran yang sesuai menentukan kontinuitas pembentukan uap. Boiler Feed Water Pump (BFWP) berfungsi mengalirkan air dari sistem penyimpanan menuju boiler dengan tekanan yang mampu mengatasi kebutuhan operasi dan tahanan

sistem. Oleh karena itu, gangguan pada sistem pemompaan dapat menyebabkan ketidakstabilan suplai air, peningkatan konsumsi energi, dan penurunan keandalan proses produksi [1].

Pompa sentrifugal banyak digunakan sebagai BFWP karena mampu menghasilkan kapasitas aliran besar, beroperasi secara kontinu, dan memiliki konstruksi yang sesuai untuk aplikasi industri. Meskipun demikian, kinerja pompa dipengaruhi oleh kondisi aktual sistem, termasuk variasi debit, tekanan suction dan discharge, karakteristik perpipaan, serta kerugian energi akibat gesekan dan komponen fittings. Perubahan parameter tersebut dapat menggeser titik operasi dari kondisi desain dan menyebabkan energi masukan motor tidak seluruhnya dikonversikan menjadi energi hidrolik. Evaluasi karakteristik pompa karena itu perlu mempertimbangkan interaksi antara pompa dan sistem perpipaan, bukan hanya kapasitas nominal peralatan [2], [3].

Kajian performa pompa sentrifugal telah berkembang melalui pendekatan eksperimental, analitis, dan numerik. Penelitian mengenai pompa dengan karakteristik tertentu menunjukkan bahwa perubahan kondisi aliran dapat memengaruhi distribusi energi dan karakteristik hidraulik pompa [3]. Kajian sistem perpipaan juga menunjukkan bahwa kehilangan energi merupakan salah satu komponen penting yang menentukan kebutuhan head sistem [8]. Namun, penelitian yang mengintegrasikan debit, head total, daya hidrolik, dan efisiensi berdasarkan data operasi aktual pada sistem BFWP industri masih relatif terbatas dalam konteks objek penelitian ini.

Kondisi operasi nyata berbeda dari pengujian laboratorium karena kebutuhan proses, konfigurasi perpipaan, dan kondisi peralatan dapat berubah selama produksi berlangsung. Data lapangan yang dikumpulkan secara periodik dapat memperlihatkan variasi titik operasi dan memberikan dasar yang lebih realistis untuk menilai apakah peralatan masih memenuhi fungsi yang dipersyaratkan. Pendekatan berbasis data aktual juga dapat membantu menghubungkan perubahan parameter hidraulik dengan kebutuhan pemeliharaan dan pengendalian operasi. Dengan demikian, evaluasi performa tidak hanya menghasilkan nilai efisiensi, tetapi juga memberikan informasi untuk pengambilan keputusan teknis.

Penelitian ini bertujuan mengevaluasi performa Boiler Feed Water Pump berdasarkan data operasi aktual selama 32 hari dengan menganalisis debit aliran, head total, daya hidrolik, dan efisiensi pompa. Nilai aktual dibandingkan dengan parameter desain untuk mengetahui tingkat kesesuaian kemampuan pompa terhadap kebutuhan sistem. Kontribusi penelitian terletak pada penyajian evaluasi terintegrasi berbasis data operasi lapangan pada sistem BFWP industri. Hasil analisis diharapkan dapat menjadi dasar teknis bagi optimasi operasi, evaluasi kondisi pompa, dan perencanaan pemeliharaan.

2 Material dan Metode Penelitian

2.1 Objek dan Material Penelitian

Penelitian dilaksanakan pada Boiler Feed Water Pump (BFWP) yang digunakan sebagai pompa penyuplai air umpan pada sistem boiler industri. Pompa yang menjadi objek penelitian merupakan pompa sentrifugal multistage horizontal yang beroperasi

secara kontinu untuk mengalirkan air dari tangki penampungan menuju boiler. Pemilihan objek didasarkan pada fungsi BFWP sebagai peralatan penting dalam menjaga kontinuitas suplai air umpan. Karakteristik pompa dan sistem perpipaan digunakan sebagai dasar untuk mengevaluasi kondisi operasi aktual [4].



Gambar 1. Boiler Feed Water Pump

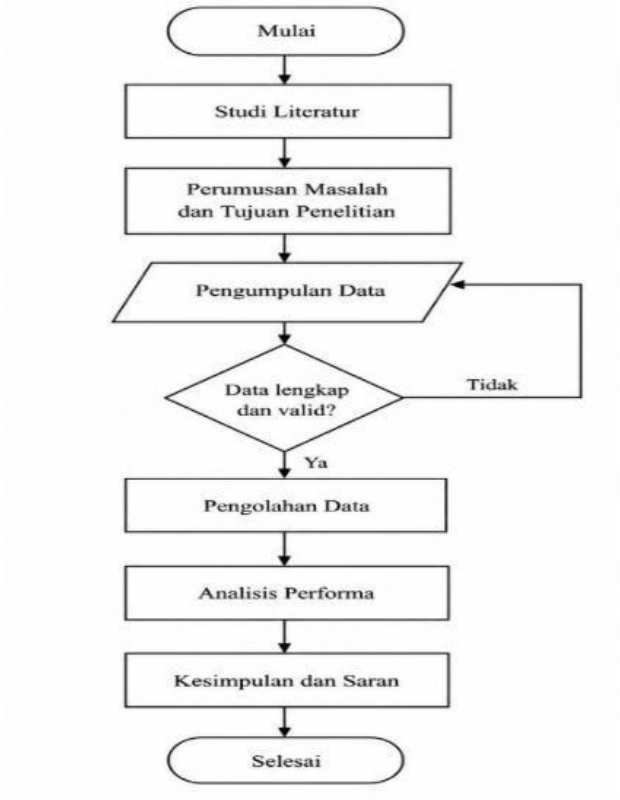
Data penelitian terdiri atas data primer dan data sekunder. Data primer diperoleh melalui observasi langsung terhadap kondisi operasi pompa, sedangkan data sekunder diperoleh dari dokumen teknis dan spesifikasi pompa yang tersedia. Parameter yang dianalisis mencakup debit aliran, tekanan suction dan discharge, diameter dan panjang pipa, jumlah fittings, perbedaan elevasi, serta daya motor penggerak. Seluruh data tersebut digunakan sebagai input untuk menentukan parameter performa pompa pada kondisi aktual [4].

Table 1. Research Data Parameters

Parameter	Symbol	Unit	Purpose
Flow rate	Q	m^3/h	Determining operating capacity
Suction pressure	Ps	Pa	Inlet-side energy
Discharge pressure	Pd	Pa	Outlet-side energy
Pipe diameter/length	D, L	m	Flow and head-loss analysis
Motor input power	Pin	kW	Efficiency calculation

2.2 Metode Penelitian

Penelitian menggunakan metode deskriptif kuantitatif untuk mengevaluasi performa BFWP berdasarkan kondisi operasi aktual. Tahapan penelitian dimulai dari studi literatur, identifikasi objek, pengumpulan data operasi, pengolahan data, perhitungan parameter performa, analisis perbandingan dengan desain, dan penarikan kesimpulan. Data operasi dikumpulkan selama 32 hari untuk memperoleh gambaran performa yang lebih representatif dibandingkan pengamatan sesaat. Pengolahan dilakukan menggunakan persamaan mekanika fluida yang menghubungkan tekanan, kecepatan, elevasi, debit, dan kehilangan energi [2], [5].



Gambar 2. Diagram Alir Penelitian

Diagram alir penelitian menunjukkan urutan proses dari studi literatur hingga penyusunan kesimpulan. Setiap data yang digunakan dalam perhitungan terlebih dahulu diidentifikasi berdasarkan sumber dan parameter pengukurannya. Selanjutnya, data dihitung untuk memperoleh head total, daya hidrolik, dan efisiensi pompa. Hasil perhitungan kemudian dibandingkan dengan parameter desain dan dianalisis untuk menjelaskan kondisi operasi BFWP.

2.3 Persamaan Analisis

Evaluasi performa BFWP dilakukan menggunakan tiga parameter utama, yaitu head total, daya hidrolik, dan efisiensi pompa. Ketiga parameter tersebut digunakan untuk menggambarkan kemampuan pompa dalam menaikkan energi fluida dan memenuhi kebutuhan sistem. Perhitungan dilakukan menggunakan data tekanan, kecepatan, elevasi, debit, dan kehilangan energi yang tersedia. Persamaan yang digunakan mengacu pada prinsip keseimbangan energi pada aliran fluida [2], [5].

$$H = (Pd - Ps)/(\rho g) + (Vd^2 - Vs^2)/(2g) + (Zd - Zs) + hL \quad (1)$$

dengan H adalah head total (m), Pd dan Ps masing-masing tekanan pada sisi discharge dan suction (Pa), ρ massa jenis fluida (kg/m³), g percepatan gravitasi (m/s²), Vd dan Vs kecepatan aliran pada sisi discharge dan suction (m/s), Zd dan Zs elevasi masing-masing sisi (m), serta hL total head loss (m). Persamaan tersebut digunakan untuk menggabungkan kontribusi perbedaan tekanan, energi kinetik, perbedaan elevasi, dan kerugian energi pada sistem. Nilai head total selanjutnya menjadi dasar dalam menghitung daya hidrolik pompa.

$$Ph = \rho gQH \quad (2)$$

Pada Persamaan (2), Ph merupakan daya hidrolik (W atau kW setelah konversi satuan), Q adalah debit aliran (m³/s), dan H adalah head total (m). Daya hidrolik merepresentasikan energi efektif yang ditransfer pompa kepada fluida. Nilai ini kemudian dibandingkan dengan daya masukan motor untuk menentukan efisiensi pompa.

$$\eta = (Ph/Pin) \times 100\% \quad (3)$$

Pada Persamaan (3), η adalah efisiensi pompa (%), Ph adalah daya hidrolik (kW), dan Pin adalah daya masukan motor (kW). Efisiensi digunakan untuk menunjukkan proporsi energi masukan yang berhasil ditransfer menjadi energi hidrolik pada fluida. Nilai efisiensi yang lebih rendah dari kondisi desain menjadi indikator perlunya evaluasi terhadap titik operasi, kehilangan energi, dan kondisi komponen pompa.

3 Hasil dan Pembahasan

3.1 3.1. Karakteristik Operasi Boiler Feed Water Pump

Evaluasi performa BFWP dilakukan berdasarkan data operasi aktual selama 32 hari pengamatan. Analisis difokuskan pada debit aliran, head total, daya hidrolik, dan efisiensi pompa sebagai parameter utama kinerja. Data tersebut menggambarkan kondisi pompa ketika digunakan untuk memenuhi kebutuhan sistem boiler dalam operasi aktual. Hasil perhitungan digunakan untuk mengetahui tingkat kesesuaian kondisi operasi terhadap parameter desain [4], [6].

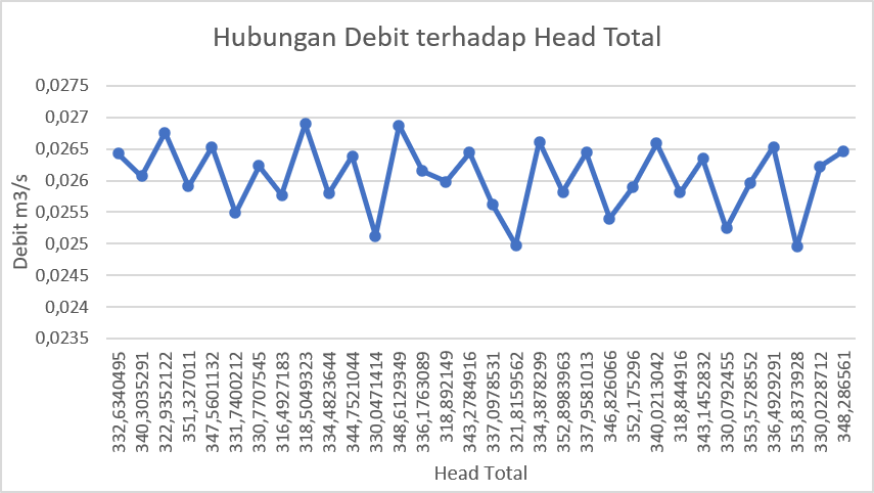
Berdasarkan hasil pengolahan data, diperoleh debit rata-rata sebesar 94,11 m³/jam, head total sebesar 337,06 m, dan efisiensi pompa sebesar 60,27%. Nilai debit aktual tersebut lebih rendah daripada kapasitas desain sebesar 125 m³/jam, sedangkan head aktual 337,06 m relatif mendekati nilai desain 357 m. Efisiensi aktual juga berada di bawah rentang efisiensi desain 75–80%. Perbandingan parameter desain dan hasil penelitian disajikan pada Tabel 2.

Table 2. Design and Actual Performance Parameters

Parameter	Design	Actual	Relative Difference
Flow rate (m³/h)	125.00	94.11	−24.71%
Total head (m)	357.00	337.06	−5.59%
Efficiency (%)	75–80	60.27	Below design

Penurunan debit sekitar 24,71% dari kapasitas desain tidak serta-merta menunjukkan kegagalan pompa karena titik operasi aktual ditentukan oleh interaksi kurva pompa dan kurva sistem. Kebutuhan beban boiler yang tidak selalu berada pada kondisi maksimum dapat menyebabkan pompa beroperasi pada debit yang lebih rendah dari kapasitas nominal. Di sisi lain, head aktual hanya sekitar 5,59% lebih rendah dari nilai desain, sehingga kemampuan pompa menghasilkan energi tekanan masih relatif terjaga. Temuan ini menunjukkan bahwa evaluasi kapasitas harus dibaca bersama dengan kebutuhan proses dan karakteristik sistem perpipaan.

3.2 Hubungan Debit Aliran terhadap Head Total

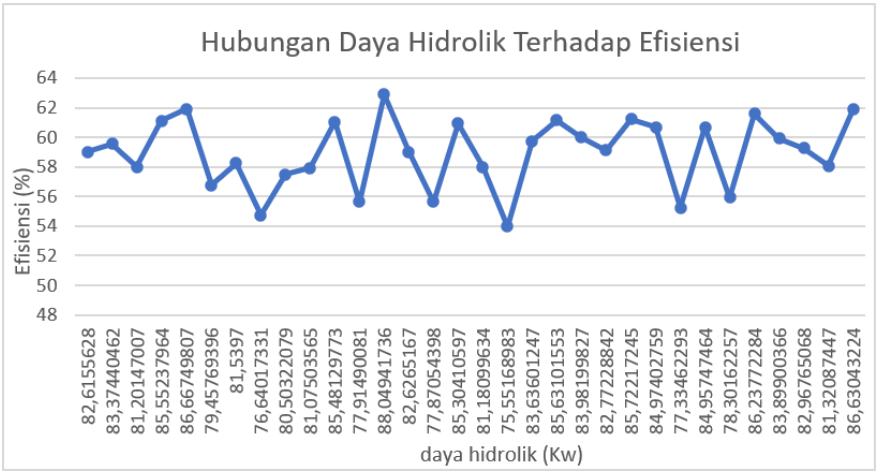


Gambar 3. Hubungan Debit Aliran terhadap Head Total

Hubungan debit dan head merupakan indikator penting dalam menentukan titik operasi pompa sentrifugal. Pada pompa sentrifugal, perubahan debit umumnya diikuti perubahan head karena karakteristik pompa dan tahanan sistem saling berinteraksi. Data pengamatan menunjukkan adanya variasi debit dengan head total yang tetap berada pada rentang operasi yang relatif stabil. Kondisi tersebut mengindikasikan bahwa pompa masih mampu mempertahankan tekanan yang dibutuhkan ketika beban operasi berubah.

Head total tidak hanya ditentukan oleh tekanan discharge, tetapi juga oleh tekanan suction, perubahan energi kinetik, perbedaan elevasi, dan head loss pada sistem. Sistem perpipaan dengan panjang pipa dan jumlah fittings tertentu akan memberikan tahanan yang memengaruhi kebutuhan head. Oleh karena itu, perubahan debit dapat meningkatkan kehilangan energi dan mengubah titik operasi sistem. Stabilitas head yang diperoleh selama pengamatan menunjukkan bahwa tidak terdapat perubahan ekstrem pada tahanan sistem yang mengganggu fungsi utama pompa.

3.3 Hubungan Daya Hidrolik terhadap Efisiensi Pompa



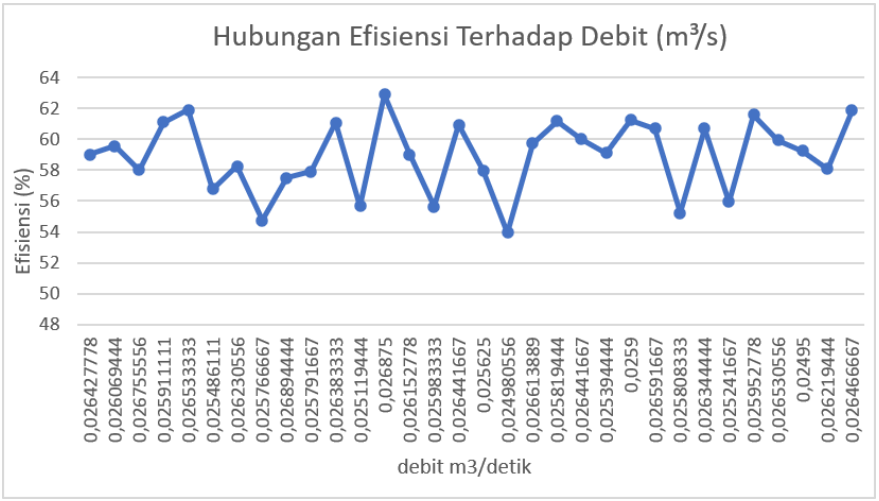
Gambar 4. Hubungan Daya Hidrolik terhadap Efisiensi Pompa

Daya hidrolik menunjukkan besarnya energi yang berhasil ditransfer pompa kepada fluida dan secara langsung dipengaruhi oleh debit serta head total. Peningkatan daya hidrolik dapat terjadi ketika pompa bekerja pada kombinasi debit dan head yang menghasilkan transfer energi lebih besar. Namun, peningkatan daya hidrolik tidak selalu identik dengan peningkatan efisiensi karena sebagian energi masukan tetap hilang melalui kerugian hidraulik dan mekanis. Dengan demikian, efisiensi harus dianalisis berdasarkan perbandingan antara daya hidrolik dan daya masukan motor.

Efisiensi rata-rata sebesar 60,27% berada di bawah rentang desain 75–80%, sehingga terdapat ruang untuk peningkatan performa. Salah satu kemungkinan penyebab adalah pompa beroperasi tidak tepat pada titik efisiensi terbaik atau Best Efficiency Point

(BEP), terutama karena debit aktual lebih rendah daripada kapasitas desain. Faktor lain yang perlu dievaluasi meliputi kondisi impeller, kebocoran internal, gesekan mekanis, serta kehilangan energi pada sistem perpipaan. Temuan tersebut menjadi dasar bahwa program pemeliharaan sebaiknya tidak hanya berfokus pada kondisi fisik pompa, tetapi juga pada kesesuaian titik operasi.

3.4 Hubungan Debit Aliran terhadap Efisiensi Pompa



Gambar 5. Hubungan Debit Aliran terhadap Efisiensi Pompa

Hubungan debit dan efisiensi menunjukkan bagaimana perubahan kapasitas aliran memengaruhi kemampuan pompa dalam mengonversikan daya masukan menjadi daya hidrolik. Pada kondisi tertentu, efisiensi meningkat ketika titik operasi mendekati kondisi desain atau BEP, kemudian menurun ketika pompa bekerja terlalu jauh dari titik tersebut. Data penelitian menunjukkan adanya variasi efisiensi mengikuti perubahan debit selama periode pengamatan. Pola tersebut memperlihatkan bahwa pengendalian kondisi operasi merupakan salah satu faktor penting dalam mempertahankan efisiensi.
Efisiensi rata-rata 60,27% menunjukkan bahwa pompa masih mampu mendukung kebutuhan sistem, tetapi performanya belum setara dengan kondisi desain. Perbedaan tersebut perlu dipahami sebagai indikasi adanya energi yang tidak termanfaatkan secara hidrolik, bukan semata-mata sebagai penurunan kapasitas pompa. Evaluasi lanjutan terhadap kondisi impeller, clearance internal, seal, bearing, dan karakteristik perpipaan dapat membantu menentukan sumber kehilangan energi. Pemeriksaan tersebut juga dapat digunakan untuk menentukan apakah peningkatan efisiensi lebih efektif dilakukan melalui pemeliharaan atau melalui optimasi titik operasi.

3.5 Evaluasi Performa dan Implikasi Pemeliharaan

Secara keseluruhan, BFWP masih mampu memenuhi fungsi operasional utama sebagai penyedia air umpan boiler. Debit aktual sebesar 94,11 m³/jam berada di bawah kapasitas desain, tetapi head aktual 337,06 m masih mendekati nilai desain dan memungkinkan suplai bertekanan tetap berlangsung. Efisiensi 60,27% menunjukkan adanya perbedaan kinerja yang perlu diperhatikan karena berada di bawah rentang desain 75–80%. Dengan demikian, status performa pompa lebih tepat dipahami sebagai masih fungsional tetapi memiliki peluang optimasi efisiensi.

Dari perspektif pemeliharaan, nilai efisiensi yang lebih rendah dapat menjadi parameter pemantauan untuk mendeteksi perubahan kinerja dari waktu ke waktu. Inspeksi berkala terhadap impeller, bearing, seal, sambungan perpipaan, dan potensi kebocoran internal perlu dipertimbangkan untuk mengurangi kehilangan energi. Evaluasi head loss pada jalur suction dan discharge juga penting karena peningkatan tahanan sistem dapat menggeser titik operasi pompa. Strategi pemeliharaan berbasis kondisi akan lebih informatif apabila data debit, tekanan, daya, dan efisiensi dicatat secara periodik dengan metode pengukuran yang konsisten.

Hasil penelitian juga menunjukkan pentingnya membedakan antara kapasitas desain dan kebutuhan operasi aktual. Kapasitas yang lebih rendah dari nominal tidak otomatis berarti pompa mengalami kerusakan apabila kebutuhan sistem memang berada di bawah kapasitas desain. Sebaliknya, efisiensi yang berada cukup jauh dari rentang desain tetap perlu ditindaklanjuti karena dapat berimplikasi pada konsumsi energi dan biaya operasi. Oleh sebab itu, keputusan pemeliharaan sebaiknya didasarkan pada tren parameter, kondisi proses, serta pemeriksaan komponen secara terpadu.

4 Kesimpulan

Penelitian ini mengevaluasi performa Boiler Feed Water Pump berdasarkan data operasi aktual selama 32 hari dengan parameter debit aliran, head total, daya hidrolik, dan efisiensi pompa. Hasil analisis menunjukkan debit rata-rata sebesar 94,11 m³/jam, head total sebesar 337,06 m, dan efisiensi sebesar 60,27%. Debit aktual sekitar 24,71% lebih rendah daripada kapasitas desain 125 m³/jam, sedangkan head aktual hanya sekitar 5,59% lebih rendah daripada nilai desain 357 m. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa pompa masih mampu memenuhi fungsi suplai air umpan boiler, tetapi bekerja pada kondisi yang berbeda dari parameter desain.

Nilai efisiensi 60,27% yang berada di bawah rentang desain 75–80% menunjukkan adanya peluang peningkatan efisiensi melalui optimasi titik operasi dan pengurangan kehilangan energi. Evaluasi lebih lanjut terhadap kondisi komponen pompa dan sistem perpipaan diperlukan untuk mengidentifikasi sumber utama perbedaan tersebut. Pemantauan berkala terhadap debit, tekanan, daya masukan, dan efisiensi dapat digunakan sebagai dasar pemeliharaan berbasis kondisi. Penelitian lanjutan disarankan menambahkan pengukuran daya motor aktual, kurva karakteristik pompa, nilai head loss terukur pada setiap segmen perpipaan, serta analisis tren performa agar diagnosis penurunan kinerja dapat dilakukan dengan lebih presisi.

5 References

[1] International Energy Agency, “World Energy Outlook 2022,” International Energy Agency, 2022. [Online]. Available: https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022.

[2] Y. A. Çengel and J. M. Cimbala, Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications, 4th ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2018.

[3] Y. Wei, H. Zhang, and X. Liu, “Numerical Study of Low-Specific-Speed Centrifugal Pump Based on Principal Component Analysis,” Water, vol. 16, no. 13, p. 1785, 2024, doi: 10.3390/w16131785.

[4] L. Tardia, Pompa Sentrifugal: Aplikasi, Jilid 1. Bandung, Indonesia: ITB Press, 2014.

[5] F. M. White, Fluid Mechanics, 9th ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill Education, 2021.

[6] A. Nugroho and Winarto, “Analisis Performa Pompa Sentrifugal pada Sistem Boiler Feed Water,” Jurnal Teknik Mesin Indonesia, 2023.

[7] A. Rahman, “Analisis Kinerja Pompa Sentrifugal pada Sistem Fluida,” Jurnal Teknik Mesin, 2022.

[8] S. Solihat and A. Mahendrawan, “Analisis Head Loss pada Sistem Perpipaan Industri,” Jurnal Teknik Energi, 2024.

[9] B. Basuki, D. Santoso, and R. Pratama, “Evaluasi Kinerja Pompa Sentrifugal pada Industri Proses,” Jurnal Rekayasa Mesin, 2023.

[10] M. Rifqy and A. Hajianto, “Evaluasi Performa Pompa Sentrifugal pada Sistem Perpipaan Industri,” Jurnal Teknik Mesin, 2025.

[11] M. Ramadhany and Hardjono, “Analisis Efisiensi Pompa Sentrifugal Berdasarkan Variasi Debit Aliran,” Jurnal Energi dan Manufaktur, 2020.

[12] C. Trivedi, “Design of Centrifugal Pumps with Non-Overloading Power Curve: A Review of the State of the Art,” Cureus, vol. 17, no. 3, 2025.