

EVALUASI KINERJA POMPA PP 201 B DAN C SEBELUM-SESUDAH MAINTENANCE MECHANICAL SEAL PADA 32 HZ

Satrio Utomo

S1 Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya

Satrio.22119@mhs.unesa.ac.id

Mohammad Effendy

Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya

Mohammadeffendy@unesa.ac.id

Abstrak

Penelitian ini mengevaluasi perubahan kinerja HPS Pump PP 201 B dan PP 201 C sebelum dan sesudah *maintenance mechanical seal* pada kecepatan acuan 32 Hz. Penelitian menggunakan pendekatan kuantitatif deskriptif-komparatif dengan studi kasus retrospektif. Data berupa catatan operasi harian tujuh hari sebelum dan tujuh hari sesudah *maintenance* yang mencakup frekuensi operasi, laju aliran, tekanan *suction* dan *discharge*, serta konsumsi daya. Setelah seleksi data, diperoleh enam data sebelum dan tujuh data sesudah untuk PP 201 B, serta masing-masing tujuh data untuk PP 201 C. Data dengan frekuensi berbeda dinormalisasi ke 32 Hz menggunakan Hukum Afinitas Pompa. *Head* dihitung dari tekanan diferensial, daya hidrolik dari laju aliran dan *head*, sedangkan efisiensi unit pompa-motor dari perbandingan daya hidrolik terhadap konsumsi daya. PP 201 B mengalami penurunan laju aliran 0,14%, *head* 5,47%, daya hidrolik 5,62%, konsumsi daya 1,43%, dan efisiensi dari 57,80% menjadi 56,41%. Pada PP 201 C, laju aliran turun 7,94%, tetapi *head* meningkat 10,49%, daya hidrolik meningkat 1,49%, konsumsi daya turun 4,40%, dan efisiensi meningkat dari 49,36% menjadi 52,35%. Secara deskriptif, PP 201 C menunjukkan perubahan pemanfaatan energi yang lebih positif, meskipun penurunan kapasitas aliran tetap perlu dievaluasi terhadap kebutuhan sistem *water injection*.

Kata Kunci: efisiensi unit, hukum afinitas, kinerja pompa, *mechanical seal*, *water injection*

Abstract

This study evaluated performance changes in HPS Pumps PP 201 B and PP 201 C before and after *mechanical seal maintenance* at 32 Hz. A descriptive-comparative quantitative approach with a retrospective case study design was used. Daily records covered seven days before and seven days after maintenance, including operating frequency, flow rate, suction and discharge pressure, and power consumption. Screening produced six pre-maintenance and seven post-maintenance records for PP 201 B and seven records per period for PP 201 C. Data collected at different frequencies were normalized to 32 Hz using pump affinity laws. Head was calculated from differential pressure, hydraulic power from flow rate and head, and pump-motor efficiency from hydraulic power divided by power consumption. In PP 201 B, flow rate, head, hydraulic power, and power consumption decreased by 0.14%, 5.47%, 5.62%, and 1.43%, respectively; efficiency decreased from 57.80% to 56.41%. In PP 201 C, flow rate decreased by 7.94%, while head increased by 10.49%, hydraulic power by 1.49%, and efficiency from 49.36% to 52.35%; power consumption decreased by 4.40%. PP 201 C therefore showed a more favorable change in energy utilization, although its lower flow capacity requires evaluation against system demand.

Keywords: affinity laws, *mechanical seal*, pump performance, pump-set efficiency, *water injection*

PENDAHULUAN

Sistem *water injection* merupakan salah satu fasilitas penting dalam proses produksi minyak dan gas. Air yang telah melalui proses pengolahan dialirkan menuju stasiun injeksi, dinaikkan tekanannya menggunakan pompa, kemudian didistribusikan menuju sumur injeksi. Proses tersebut digunakan untuk mempertahankan tekanan reservoir dan membantu kontinuitas produksi. Keberhasilan sistem *water injection* sangat bergantung pada kemampuan pompa dalam menghasilkan laju aliran dan tekanan yang sesuai dengan kebutuhan operasi. Ketidaksihesuaian antara kapasitas aliran, tekanan injeksi, dan konsumsi daya dapat menyebabkan operasi sistem menjadi kurang efektif. An et al. (2025) menjelaskan bahwa pengaturan operasi pompa *water injection*

memengaruhi hubungan antara laju aliran, tekanan, dan penggunaan energi. Chen et al. (2025) juga menunjukkan bahwa optimasi parameter operasi dibutuhkan untuk mengurangi konsumsi energi dan menjaga distribusi aliran pada jaringan injeksi.

HPS Pump PP 201 merupakan pompa sentrifugal bertingkat yang digunakan untuk menaikkan tekanan fluida sebelum dialirkan menuju jaringan *water injection* di Lapangan X PT Y. Kemampuan pompa tidak hanya dinilai dari jumlah fluida yang dialirkan, tetapi juga dari energi yang diberikan kepada fluida dan daya yang digunakan selama pompa beroperasi. *Flowrate* menggambarkan kapasitas fluida yang dialirkan dalam satuan waktu, sedangkan *head* menunjukkan energi yang diberikan pompa kepada fluida per satuan berat. Hubungan antara *flowrate* dan *head* selanjutnya menentukan daya hidrolik

yang diterima fluida. Pada sisi masukan, *power consumption* menunjukkan daya listrik yang digunakan oleh unit pompa-motor. Perbandingan daya hidrolik terhadap konsumsi daya digunakan untuk memperoleh efisiensi unit pompa-motor.

Penilaian kinerja pompa tidak cukup dilakukan hanya berdasarkan satu parameter. Penurunan konsumsi daya belum tentu menunjukkan peningkatan kinerja apabila daya hidrolik mengalami penurunan yang lebih besar. Sebaliknya, peningkatan *head* juga belum tentu menunjukkan perbaikan kinerja secara menyeluruh apabila *flowrate* menurun atau konsumsi daya meningkat secara tidak proporsional. Oleh karena itu, evaluasi kinerja perlu dilakukan dengan mempertimbangkan hubungan antara *flowrate*, *head*, daya hidrolik, konsumsi daya, dan efisiensi secara bersamaan. Pendekatan tersebut dapat memberikan gambaran yang lebih objektif mengenai kemampuan pompa dalam menghasilkan keluaran hidrolik dan memanfaatkan energi listrik.

Salah satu komponen yang berperan dalam menjaga keandalan pompa sentrifugal adalah *mechanical seal*. Komponen tersebut berada pada area pertemuan antara poros yang berputar dan *casing* yang diam. Fungsi utamanya adalah membatasi kebocoran fluida dari dalam pompa menuju lingkungan. Pada saat pompa beroperasi, permukaan cincin berputar dan cincin diam dipisahkan oleh lapisan fluida yang sangat tipis. Lapisan tersebut berfungsi mengurangi kontak langsung dan panas akibat gesekan pada permukaan *seal*. Apabila kondisi lapisan fluida, permukaan *seal*, atau komponen pendukung mengalami gangguan, kebocoran dan peningkatan keausan dapat terjadi.

Luo et al. (2020) menjelaskan bahwa perubahan kondisi kontak dan celah penyekatan dapat memengaruhi karakteristik dinamis *mechanical seal*. Wang et al. (2023) menunjukkan bahwa kondisi tribologi, tingkat keausan, dan karakteristik getaran permukaan *seal* dapat digunakan untuk mendeteksi perubahan kondisi *mechanical seal*. Manikandan dan Duraivelu (2023) juga menjelaskan bahwa kegagalan *mechanical seal* pada pompa sentrifugal dapat diidentifikasi melalui perubahan karakteristik getaran. Temuan tersebut menunjukkan bahwa kondisi *mechanical seal* berhubungan dengan keandalan operasi pompa dan perlu mendapat perhatian dalam kegiatan pemeliharaan.

Pelaksanaan *maintenance mechanical seal* bertujuan mengembalikan fungsi penyekatan dan memastikan pompa dapat kembali beroperasi tanpa kebocoran yang tidak dapat diterima. Meskipun demikian, selesainya kegiatan *maintenance* tidak secara otomatis menunjukkan bahwa seluruh parameter kinerja pompa akan meningkat. Kinerja pompa tetap dipengaruhi oleh kondisi *impeller*, *bearing*, poros, *alignment*, posisi katup, jaringan perpipaan, sifat fluida, dan beban operasi. Oleh karena itu, keberhasilan kegiatan *maintenance* perlu dievaluasi menggunakan data sebelum dan sesudah pekerjaan dilakukan.

Rifai et al. (2025) melakukan perbandingan kinerja pompa sentrifugal sebelum dan sesudah restorasi *wear ring*. Hasil penelitian tersebut menunjukkan peningkatan *flowrate*, *head*, dan efisiensi setelah celah *wear ring* diperbaiki. Hasil tersebut memperlihatkan bahwa

perbaikan suatu komponen dapat tercermin pada perubahan lebih dari satu parameter kinerja. Namun, *wear ring* dan *mechanical seal* memiliki fungsi yang berbeda sehingga perubahan setelah perbaikan tidak harus menunjukkan pola yang sama. *Wear ring* berkaitan langsung dengan kebocoran internal dan resirkulasi fluida, sedangkan *mechanical seal* terutama berfungsi membatasi kebocoran pada area poros. Oleh sebab itu, hasil *maintenance mechanical seal* perlu dianalisis berdasarkan kondisi aktual setiap unit pompa.

Permasalahan lain dalam membandingkan data operasi pompa adalah perbedaan kecepatan putar. PP 201 menggunakan *Variable Speed Drive* untuk mengatur frekuensi listrik dan kecepatan motor. Perubahan kecepatan menyebabkan perubahan *flowrate*, *head*, dan kebutuhan daya pompa. Data pada frekuensi berbeda tidak dapat langsung dibandingkan karena sebagian perbedaan nilai dapat disebabkan oleh perbedaan kecepatan operasi, bukan perubahan kondisi pompa. Hukum Afinitas Pompa dapat digunakan untuk memperkirakan perubahan karakteristik pompa pada kecepatan yang berbeda dengan asumsi pompa, diameter *impeller*, dan kondisi kesebangunan tetap.

Susan-Resiga et al. (2023) menjelaskan bahwa pada Hukum Afinitas dasar, *flowrate* berubah sebanding dengan rasio kecepatan, *head* berubah mengikuti kuadrat rasio kecepatan, sedangkan daya berubah mengikuti pangkat tiga rasio kecepatan. Penelitian tersebut juga menunjukkan bahwa Hukum Afinitas dasar memiliki keterbatasan, terutama apabila perubahan kecepatan cukup besar atau kerugian mekanis menjadi dominan. Meskipun demikian, Hukum Afinitas tetap dapat digunakan sebagai pendekatan untuk membangun dasar perbandingan pada kecepatan yang sama selama keterbatasannya dijelaskan.

PP 201 B dan PP 201 C dipilih sebagai objek penelitian karena kedua unit bekerja pada sistem *water injection* yang sama dan memiliki data historis sebelum serta sesudah *maintenance mechanical seal*. Data penelitian berasal dari catatan operasional perusahaan sehingga penelitian bersifat retrospektif. Peneliti tidak mengatur posisi katup, kondisi jaringan perpipaan, beban sistem, atau parameter operasi lainnya secara langsung. Oleh karena itu, penelitian ini tidak ditujukan untuk membuktikan bahwa seluruh perubahan disebabkan oleh *maintenance mechanical seal*, tetapi untuk mendeskripsikan besar, arah, dan pola perubahan kinerja yang teramati setelah kegiatan tersebut.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan mengevaluasi perubahan *flowrate*, *head*, daya hidrolik, *power consumption*, dan efisiensi HPS Pump PP 201 B dan PP 201 C sebelum dan sesudah *maintenance mechanical seal* pada kecepatan acuan 32 Hz. Penelitian juga membandingkan pola perubahan kedua unit untuk mengetahui persamaan dan perbedaan respons operasionalnya. Hasil penelitian diharapkan dapat menjadi bahan evaluasi bagi tim operasi dan *maintenance* dalam melakukan pemantauan lanjutan terhadap kondisi pompa setelah penggantian *mechanical seal*.

METODE

A. Rancangan dan Objek Penelitian

Penelitian menggunakan pendekatan kuantitatif dengan jenis penelitian deskriptif-komparatif dan

desain studi kasus retrospektif. Pendekatan kuantitatif digunakan karena data penelitian berupa nilai numerik parameter operasional pompa. Pendekatan deskriptif-komparatif digunakan untuk menggambarkan dan membandingkan kondisi sebelum dan sesudah *maintenance mechanical seal*. Penelitian disebut retrospektif karena data yang dianalisis berasal dari catatan operasi dan dokumen *maintenance* yang telah tersedia.

Objek penelitian adalah HPS Pump PP 201 B dan PP 201 C yang beroperasi pada sistem *water injection* di Lapangan X PT Y. Unit pompa tersebut merupakan pompa sentrifugal horizontal bertingkat dengan model MMU MJ 12000 675 Series dan jumlah tingkat sebanyak 52. Berdasarkan spesifikasi yang tersedia, pompa memiliki kapasitas nominal 10.500 BPD, *head* nominal 2.033 ft, daya 153,64 kW, dan kecepatan maksimum 3.000 rpm. Spesifikasi tersebut digunakan untuk memberikan gambaran umum mengenai objek penelitian, sedangkan analisis kinerja didasarkan pada data operasional aktual.

Data operasional PP 201 B berasal dari periode April–Mei 2025, sedangkan data PP 201 C berasal dari periode Mei 2025. Pengumpulan, pemeriksaan, dan pengolahan data penelitian dilakukan pada April–Mei 2026. Data perusahaan digunakan tanpa mencantumkan identitas lokasi dan perusahaan secara terbuka sehingga nama lokasi dituliskan sebagai Lapangan X dan nama perusahaan sebagai PT Y.

B. Sumber dan Seleksi Data

Data penelitian diperoleh dari catatan operasi, *logsheet*, data historis, dan dokumen *maintenance* perusahaan. Data dasar yang digunakan meliputi tekanan *suction*, tekanan *discharge*, *flowrate*, frekuensi operasi VSD, dan *power consumption*. Dokumen *maintenance* digunakan untuk memastikan unit pompa, waktu pekerjaan, dan jenis pekerjaan yang dianalisis.

Periode pengamatan ditetapkan selama tujuh hari sebelum dan tujuh hari sesudah *maintenance mechanical seal*. Data diperiksa berdasarkan kelengkapan parameter, kondisi pompa beroperasi, keterbacaan catatan, dan kesesuaian waktu pengamatan. Data yang tidak tersedia atau menunjukkan pompa tidak beroperasi tidak digunakan dalam perhitungan.

Pada PP 201 B, satu data sebelum *maintenance* tidak tersedia sehingga jumlah data yang digunakan adalah enam kejadian sebelum dan tujuh kejadian sesudah *maintenance*. Pada PP 201 C, data yang digunakan terdiri atas tujuh kejadian sebelum dan tujuh kejadian sesudah *maintenance*. Data sebelum dan sesudah tidak diperlakukan sebagai pasangan pengukuran individual karena waktu serta kondisi operasinya tidak sama. Perbandingan dilakukan berdasarkan karakteristik kelompok data dan nilai rata-rata setiap periode.

C. Pengolahan Parameter Kinerja

Data tekanan sisi *suction* dan *discharge* digunakan untuk menghitung tekanan diferensial pompa. Tekanan diferensial dihitung menggunakan persamaan: $\Delta P = P_d - P_s$, dengan ΔP sebagai tekanan diferensial, P_d sebagai tekanan *discharge*, dan P_s sebagai tekanan *suction*. Data tekanan yang masih dinyatakan dalam psi dikonversi menjadi bar menggunakan hubungan:

$$P_{\text{bar}} = P_{\text{psi}} \times 0,06894757$$

Nilai *head* dihitung dari tekanan diferensial dengan mengabaikan perbedaan elevasi dan perubahan kecepatan aliran pada titik pengukuran *suction* dan *discharge*. Persamaan yang digunakan adalah:

$$H = \frac{\Delta P}{\rho g}$$

Apabila tekanan diferensial dinyatakan dalam bar dan massa jenis air diasumsikan 1.000 kg/m³, persamaan dapat ditulis sebagai:

$$H = \frac{\Delta P_{\text{bar}}}{0,0981}$$

dengan sebagai *head* pompa dalam meter, sebagai massa jenis fluida sebesar 1.000 kg/m³, dan sebagai percepatan gravitasi sebesar 9,80665 m/s². Data *flowrate* yang berasal dari catatan lapangan dinyatakan dalam BPD. Untuk menghitung daya hidrolik, data tersebut dikonversi menjadi m³/s menggunakan persamaan:

$$Q_{\text{SI}} = Q_{\text{BPD}} \times 1,8401308 \times 10^{-6}$$

Penyajian hasil *flowrate* dalam tabel dan grafik menggunakan satuan m³/hari agar nilainya lebih mudah dibaca. Perubahan satuan penyajian tidak mengubah hasil daya hidrolik karena perhitungan tetap menggunakan satuan m³/s. Daya hidrolik merupakan daya berguna yang diterima fluida dan dihitung menggunakan persamaan:

$$P_h = \frac{\rho g Q H}{1000}$$

Dengan P_h sebagai daya hidrolik dalam kW, sebagai *flowrate* dalam m³/s, dan sebagai *head* dalam meter. Efisiensi yang dihitung merupakan efisiensi unit pompa-motor karena daya masukan berasal dari data listrik, bukan daya poros yang diukur secara langsung. Efisiensi dihitung menggunakan persamaan:

$$\eta_{\text{set}} = \frac{P_h}{P_{\text{in}}} \times 100\%$$

Dengan η_{set} sebagai efisiensi unit pompa-motor, sebagai daya hidrolik, dan sebagai *power consumption*.

D. Normalisasi Kecepatan

Data operasional PP 201 B dan PP 201 C tercatat pada frekuensi yang tidak selalu sama. Agar perbandingan dilakukan pada kondisi kecepatan yang lebih setara, data dinormalisasi pada frekuensi acuan 32 Hz menggunakan Hukum Afinitas Pompa. Rasio normalisasi dihitung menggunakan persamaan:

$$r = \frac{32}{f_i}$$

dengan f_i sebagai frekuensi aktual data awal.

Normalisasi *flowrate* dilakukan menggunakan:

$$Q_{32} = Q_i \left(\frac{32}{f_i} \right)$$

Normalisasi *head* dilakukan menggunakan:

$$H_{32} = H_i \left(\frac{32}{f_i} \right)^2$$

Sementara itu, normalisasi daya hidrolik dan *power consumption* dilakukan menggunakan:

$$P_{32} = P_i \left(\frac{32}{f_i} \right)^3$$

Nilai efisiensi setelah normalisasi dihitung kembali melalui perbandingan daya hidrolik terhadap *power consumption*. Karena kedua jenis daya disesuaikan menggunakan rasio pangkat tiga yang sama, nilai efisiensi secara matematis tidak mengalami perubahan akibat normalisasi. Hasil normalisasi diperlakukan sebagai nilai estimasi pada kecepatan acuan 32 Hz dan bukan seluruhnya merupakan hasil pengukuran langsung pada 32 Hz.

E. Teknik Analisis

Analisis dilakukan secara deskriptif berdasarkan nilai rata-rata, minimum, maksimum, rentang, selisih absolut, dan persentase perubahan. Selisih setiap parameter dihitung menggunakan:

$$\Delta X = X_{\text{sesudah}} - X_{\text{sebelum}}$$

Persentase perubahan dihitung menggunakan:

$$\text{Perubahan} = \frac{X_{\text{sesudah}} - X_{\text{sebelum}}}{X_{\text{sebelum}}} \times 100\%$$

Nilai rata-rata digunakan untuk menggambarkan kondisi umum sebelum dan sesudah *maintenance*. Nilai minimum, maksimum, dan rentang digunakan untuk mengevaluasi variasi dan kestabilan data. Hasil perhitungan disajikan dalam tabel serta grafik agar perubahan setiap parameter dapat diamati secara lebih jelas.

Penelitian tidak menggunakan pengujian statistik inferensial. Keputusan tersebut didasarkan pada jumlah kejadian yang terbatas, tidak lengkapnya satu data sebelum *maintenance* pada PP 201 B, dan tidak tersedianya pasangan pengamatan yang setara untuk setiap kejadian. Dengan demikian, hasil penelitian digunakan untuk menggambarkan perubahan yang teramati dan tidak digunakan untuk membuktikan hubungan sebab-akibat secara mutlak.

HASIL DAN PEMBAHASAN

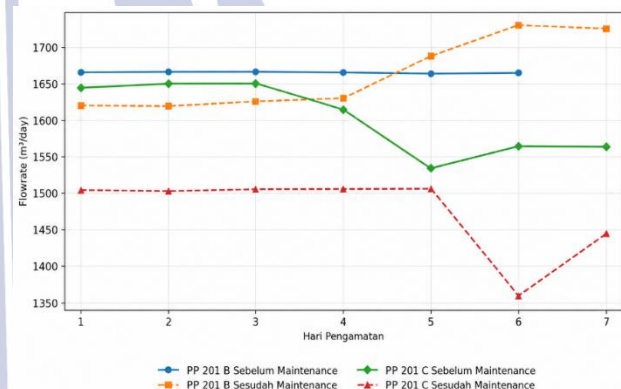
Seluruh hasil yang disajikan merupakan data yang telah dinormalisasi pada kecepatan acuan 32 Hz. Penyeragaman dilakukan agar variasi frekuensi VSD tidak menjadi faktor dominan dalam perbandingan. Parameter yang dianalisis meliputi *flowrate*, *head*, daya hidrolik, *power consumption*, dan efisiensi unit pompa-motor.

Ringkasan perubahan nilai rata-rata PP 201 B dan PP 201 C ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Ringkasan Perubahan Kinerja PP 201 pada 32 Hz

Parameter	PP 201 B: Sebelum- Sesudah	PP 201 C: Sebelum- Sesudah
<i>Flowrate</i> (m ³ /hari)	1.665,10 → 1.662,79 (-0,14%)	1.603,10 → 1.475,89 (-7,94%)
<i>Head</i> (m)	262,50 → 248,14 (-5,47%)	238,43 → 263,43 (+10,49%)
Daya Hidrolik (kW)	49,62 → 46,83 (-5,62%)	43,35 → 43,99 (+1,49%)
<i>Power Consumption</i> (kW)	85,84 → 84,61 (-1,43%)	88,69 → 84,78 (-4,40%)
Efisiensi (%)	57,80 → 56,41 (-1,39 poin)	49,36 → 52,35 (+2,99 poin)

A. Perubahan *Flowrate*



Gambar 1. Perbandingan *Flowrate* PP 201 B dan PP 201 C Sebelum dan Setelah *Maintenance* pada 32 Hz

Berdasarkan Gambar 1, *flowrate* PP 201 B sebelum *maintenance* menunjukkan pola yang relatif stabil. Nilainya berada pada rentang 1.663,55–1.666,13 m³/hari. Rentang yang sempit menunjukkan bahwa kapasitas aliran PP 201 B selama periode sebelum *maintenance* relatif seragam. Nilai rata-rata yang diperoleh adalah 1.665,10 m³/hari.

Setelah *maintenance*, *flowrate* PP 201 B menunjukkan variasi yang lebih besar. Empat kejadian pertama berada di bawah rata-rata sebelum *maintenance*, kemudian nilainya meningkat pada kejadian berikutnya. Rentang nilai setelah *maintenance* adalah 1.619,09–1.730,77 m³/hari. Nilai rata-ratanya sebesar 1.662,79 m³/hari atau menurun 2,31 m³/hari dibandingkan kondisi sebelumnya.

Penurunan rata-rata sebesar 0,14% menunjukkan bahwa kapasitas aliran PP 201 B secara umum relatif tidak berubah. Namun, kesamaan nilai rata-rata tidak menunjukkan bahwa kestabilannya juga sama. Rentang setelah *maintenance* lebih lebar dibandingkan sebelum

maintenance. Dengan demikian, PP 201 B mampu mempertahankan rata-rata kapasitas aliran, tetapi pola alirannya menjadi lebih berfluktuasi.

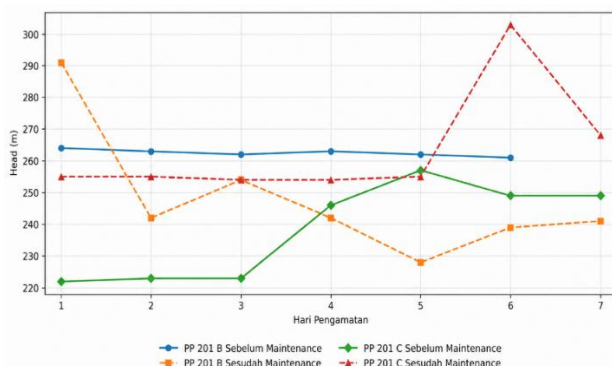
Pada PP 201 C, *flowrate* sebelum *maintenance* berada pada rentang 1.534,20–1.650,58 m³/hari dengan rata-rata 1.603,10 m³/hari. Nilai pada beberapa kejadian terakhir mulai menurun, tetapi masih berada di atas seluruh nilai sesudah *maintenance*. Setelah *maintenance*, nilai *flowrate* berada pada rentang 1.359,82–1.506,82 m³/hari dengan rata-rata 1.475,89 m³/hari.

Rata-rata *flowrate* PP 201 C menurun sebesar 127,21 m³/hari atau 7,94%. Nilai maksimum sesudah *maintenance* sebesar 1.506,82 m³/hari masih lebih rendah daripada nilai minimum sebelum *maintenance* sebesar 1.534,20 m³/hari. Hal tersebut menunjukkan bahwa penurunan kapasitas aliran terjadi secara cukup konsisten selama periode pengamatan.

Perbandingan kedua unit menunjukkan bahwa PP 201 B mampu mempertahankan rata-rata kapasitas alirannya, sedangkan PP 201 C mengalami penurunan yang lebih jelas. Penurunan *flowrate* PP 201 C perlu dievaluasi terhadap kebutuhan debit sistem *water injection*. Apabila kebutuhan sistem berada di atas kapasitas setelah *maintenance*, peningkatan parameter lain belum dapat dianggap sebagai perbaikan menyeluruh.

Perubahan *flowrate* tidak dapat langsung dinyatakan sebagai akibat kondisi *mechanical seal*. Setelah data dinormalisasi pada kecepatan yang sama, kapasitas aliran masih dapat dipengaruhi posisi katup, tekanan jaringan, pembagian aliran, dan karakteristik sistem perpipaan. Data mengenai kondisi tersebut tidak dianalisis sehingga penyebab teknis penurunan *flowrate* tidak dapat ditetapkan secara pasti.

B. Perubahan Head



Gambar 2. Perbandingan Head PP 201 B dan PP 201 C Sebelum dan Sesudah Maintenance pada 32 Hz

Nilai *head* PP 201 B sebelum *maintenance* berada pada rentang 261–264 m dengan rata-rata 262,50 m. Rentang yang sempit menunjukkan bahwa kemampuan pompa dalam menghasilkan tinggi tekan relatif stabil. Setelah *maintenance*, nilai *head* berada pada rentang 228–

291 m. Nilai tertinggi terjadi pada kejadian pertama, tetapi peningkatan tersebut tidak berlanjut pada kejadian berikutnya.

Rata-rata *head* PP 201 B setelah *maintenance* sebesar 248,14 m. Dibandingkan rata-rata sebelum *maintenance*, terjadi penurunan sebesar 14,36 m atau 5,47%. Sebagian besar nilai setelah *maintenance* berada di bawah kondisi sebelumnya. Dengan demikian, meskipun *flowrate* relatif dapat dipertahankan, kemampuan PP 201 B dalam menghasilkan energi tekan mengalami penurunan.

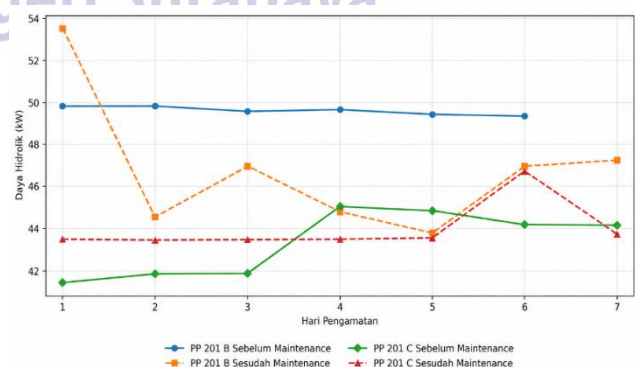
Perubahan yang berbeda terjadi pada PP 201 C. Sebelum *maintenance*, *head* berada pada rentang 222–257 m dengan rata-rata 238,43 m. Setelah *maintenance*, lima kejadian pertama berada pada kisaran 254–255 m. Nilai tertinggi sebesar 303 m terjadi pada kejadian keenam, kemudian menurun menjadi 268 m pada kejadian ketujuh.

Rata-rata *head* setelah *maintenance* meningkat menjadi 263,43 m. Peningkatan sebesar 25 m atau 10,49% menunjukkan bahwa PP 201 C mampu menghasilkan tinggi tekan yang lebih besar secara rata-rata. Namun, nilai 303 m pada salah satu kejadian memperlebar rentang data. Oleh karena itu, peningkatan rata-rata belum terjadi secara seragam pada seluruh kejadian.

Arah perubahan *head* kedua unit berlawanan. PP 201 B mengalami penurunan, sedangkan PP 201 C mengalami peningkatan. Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa kedua pompa tidak memberikan respons operasional yang sama setelah *maintenance*. Kondisi ini juga memperkuat bahwa hasil *maintenance mechanical seal* tidak dapat dievaluasi menggunakan satu indikator atau diasumsikan memberikan pola perubahan yang sama pada pompa sejenis.

Pada PP 201 C, hubungan *flowrate* dan *head* menunjukkan pergeseran ke aliran lebih rendah dengan tekanan lebih tinggi. Perubahan ini diduga dipengaruhi kondisi jaringan atau hambatan sistem, namun tanpa data posisi katup dan kurva sistem, pola tersebut hanya dapat dianggap sebagai perubahan operasional yang teramati.

C. Perubahan Daya Hidrolik



Gambar 3. Perbandingan Daya Hidrolik PP 201 B dan PP 201 C Sebelum dan Sesudah Maintenance Pada Speed 32 Hz

Daya hidrolik ditentukan oleh kombinasi *flowrate* dan *head*. Pada PP 201 B, rata-rata daya hidrolik menurun dari 49,62 kW menjadi 46,83 kW. Penurunan sebesar 2,79 kW atau 5,62% memiliki arah yang sama dengan perubahan *head*. Karena rata-rata *flowrate* hanya berubah 0,14%, penurunan daya hidrolik lebih banyak dipengaruhi oleh berkurangnya *head*.

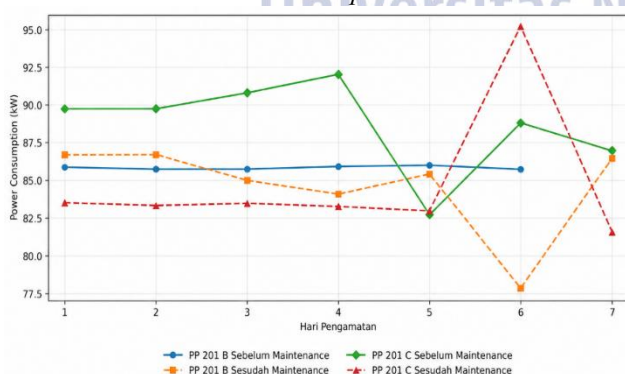
Daya hidrolik PP 201 B sebelum *maintenance* berada pada rentang 49,36–49,83 kW. Setelah *maintenance*, rentangnya menjadi 43,79–53,54 kW. Nilai yang lebih bervariasi menunjukkan bahwa energi hidrolik yang diberikan pompa kepada fluida menjadi kurang stabil. Terdapat satu kejadian dengan daya hidrolik lebih tinggi daripada kondisi sebelumnya, tetapi peningkatan tersebut tidak terjadi secara konsisten.

Pada PP 201 C, daya hidrolik meningkat dari rata-rata 43,35 kW menjadi 43,99 kW. Peningkatan sebesar 0,64 kW atau 1,49% relatif kecil. Meskipun *flowrate* turun 7,94%, peningkatan *head* sebesar 10,49% mampu mengimbangi penurunan kapasitas aliran. Hal tersebut menyebabkan daya hidrolik secara rata-rata tetap meningkat.

Daya hidrolik PP 201 C sebelum *maintenance* berada pada rentang 41,46–45,04 kW, sedangkan setelah *maintenance* berada pada rentang 43,46–46,72 kW. Nilai tertinggi sesudah *maintenance* terjadi pada kejadian keenam, bersamaan dengan nilai *head* tertinggi dan *flowrate* terendah. Pola tersebut memperlihatkan keterkaitan langsung antara perubahan *flowrate* dan *head* dalam membentuk daya hidrolik.

Perbandingan kedua unit menunjukkan bahwa nilai *flowrate* tidak dapat digunakan secara terpisah untuk menilai keluaran hidrolik. Pada PP 201 B, kapasitas aliran yang relatif tetap belum mampu mempertahankan daya hidrolik karena *head* menurun. Sebaliknya, pada PP 201 C, peningkatan *head* mampu mengimbangi penurunan *flowrate*. Oleh karena itu, daya hidrolik memberikan gambaran yang lebih menyeluruh mengenai energi berguna yang diterima fluida.

D. Perubahan Power Consumption



Gambar 4. Perbandingan *Power Consumption* PP 201 B dan PP 201 C Sebelum dan Sesudah *Maintenance* Pada Speed 32 Hz

Rata-rata *power consumption* PP 201 B menurun dari 85,84 kW menjadi 84,61 kW. Penurunan sebesar 1,23 kW atau 1,43% menunjukkan bahwa kebutuhan daya listrik setelah *maintenance* menjadi sedikit lebih rendah. Namun, penurunan tersebut belum dapat langsung dinyatakan sebagai peningkatan kinerja karena daya hidrolik menurun lebih besar, yaitu 5,62%.

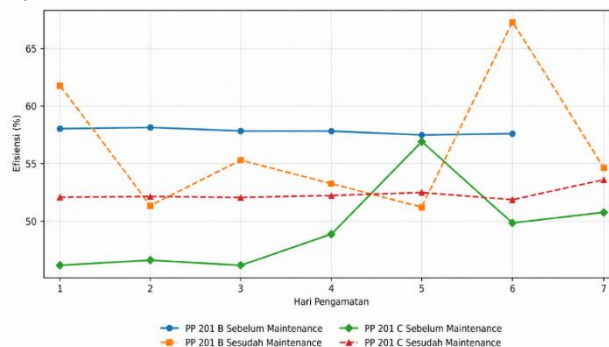
Sebelum *maintenance*, *power consumption* PP 201 B berada pada rentang yang sempit, yaitu 85,73–86,00 kW. Setelah *maintenance*, rentangnya menjadi 77,88–86,71 kW. Rentang yang lebih lebar terutama dipengaruhi oleh satu kejadian dengan konsumsi daya relatif rendah. Nilai tersebut juga menyebabkan efisiensi pada kejadian yang sama menjadi lebih tinggi. Karena data lain yang menjelaskan kondisi operasi tidak tersedia, nilai tersebut perlu ditafsirkan secara hati-hati.

Pada PP 201 C, rata-rata *power consumption* menurun dari 88,69 kW menjadi 84,78 kW. Penurunan sebesar 3,91 kW atau 4,40% lebih besar dibandingkan PP 201 B. Enam dari tujuh nilai setelah *maintenance* berada di bawah rata-rata kondisi sebelumnya. Meskipun demikian, terdapat satu kejadian dengan konsumsi daya sebesar 95,25 kW sehingga rentang setelah *maintenance* masih cukup lebar.

Makna penurunan konsumsi daya pada kedua unit berbeda. Pada PP 201 B, penurunan daya listrik terjadi bersamaan dengan penurunan daya hidrolik yang lebih besar. Dengan demikian, penurunan konsumsi daya lebih mencerminkan berkurangnya keluaran pompa daripada peningkatan pemanfaatan energi. Pada PP 201 C, penurunan daya listrik terjadi bersamaan dengan sedikit peningkatan daya hidrolik. Kondisi tersebut menunjukkan perubahan yang lebih positif pada pemanfaatan energi.

Penurunan *power consumption* tidak boleh digunakan sebagai satu-satunya indikator keberhasilan *maintenance*. Penurunan daya baru memberikan manfaat operasional apabila kebutuhan *flowrate* dan *head* tetap terpenuhi. Pada PP 201 C, penurunan konsumsi daya memberikan peningkatan efisiensi, tetapi kapasitas alirannya juga berkurang. Oleh karena itu, kebutuhan debit sistem harus tetap menjadi pertimbangan.

E. Perubahan Efisiensi



Gambar 5. Perbandingan Efisiensi PP 201 B dan PP 201 C Sebelum dan Sesudah *Maintenance* Pada Speed 32 Hz

Efisiensi PP 201 B sebelum *maintenance* berada pada rentang 57,48–58,12% dengan rata-rata 57,80%. Rentang yang sempit menunjukkan bahwa perbandingan antara daya hidrolik dan konsumsi daya relatif konsisten. Setelah *maintenance*, efisiensi berada pada rentang 51,22–67,35%. Perubahan yang lebih besar menunjukkan bahwa efektivitas konversi energi menjadi kurang stabil.

Rata-rata efisiensi PP 201 B setelah *maintenance* sebesar 56,41%. Nilai tersebut menurun 1,39 poin persentase atau 2,41% secara relatif. Penurunan terjadi karena daya hidrolik berkurang 5,62%, sedangkan konsumsi daya hanya berkurang 1,43%. Dengan kata lain, pengurangan energi listrik tidak sebanding dengan berkurangnya energi hidrolik yang dihasilkan.

Efisiensi tertinggi PP 201 B setelah *maintenance* terjadi pada kejadian keenam. Nilai tersebut berkaitan dengan rendahnya *power consumption* pada kejadian yang sama. Meskipun secara perhitungan efisiensi menjadi tinggi, satu nilai tersebut tidak cukup untuk menunjukkan peningkatan kinerja yang konsisten. Sebagian besar kejadian lain masih menunjukkan efisiensi di bawah rata-rata sebelum *maintenance*.

Pada PP 201 C, efisiensi sebelum *maintenance* berada pada rentang 46,21–56,91% dengan rata-rata 49,36%. Setelah *maintenance*, efisiensi berada pada rentang yang lebih sempit, yaitu 51,86–53,60%, dengan rata-rata 52,35%. Efisiensi meningkat sebesar 2,99 poin persentase atau 6,07% secara relatif.

Peningkatan efisiensi PP 201 C terjadi karena daya hidrolik naik 1,49%, sedangkan *power consumption* turun 4,40%. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa PP 201 C menghasilkan daya hidrolik yang sedikit lebih tinggi menggunakan daya listrik yang lebih rendah. Selain meningkat secara rata-rata, rentang efisiensi setelah *maintenance* juga lebih sempit. Hal tersebut menunjukkan bahwa perbandingan daya keluaran dan masukan menjadi lebih konsisten.

Meskipun demikian, efisiensi absolut PP 201 B setelah *maintenance*, yaitu 56,41%, masih lebih tinggi daripada efisiensi PP 201 C sebesar 52,35%. Perbandingan ini perlu dibedakan dari arah perubahannya. PP 201 B memiliki efisiensi absolut lebih tinggi, tetapi mengalami penurunan. PP 201 C memiliki efisiensi absolut lebih rendah, tetapi menunjukkan peningkatan dan kestabilan yang lebih baik setelah *maintenance*.

Hasil tersebut menunjukkan bahwa penilaian kinerja harus membedakan nilai aktual dan arah perubahan. Unit dengan nilai efisiensi lebih tinggi belum tentu menunjukkan perbaikan apabila efisiensinya menurun. Sebaliknya, unit yang efisiensinya meningkat tetap perlu diperiksa apabila kapasitas alirannya menurun.

F. Perbandingan perubahan kedua unit

PP 201 B dan PP 201 C memberikan pola perubahan yang berbeda. Pada PP 201 B, rata-rata *flowrate* relatif tetap, tetapi *head*, daya hidrolik, dan efisiensi menurun. Penurunan konsumsi daya belum cukup untuk mengimbangi penurunan keluaran hidrolik. Selain itu, hampir seluruh parameter setelah *maintenance* menunjukkan rentang yang lebih lebar dibandingkan kondisi sebelumnya.

PP 201 C mengalami penurunan *flowrate*, tetapi *head* dan daya hidrolik meningkat. Konsumsi daya menurun dan efisiensi meningkat. Perubahan tersebut menunjukkan peningkatan kemampuan menghasilkan tekanan dan pemanfaatan energi. Namun, penurunan kapasitas aliran sebesar 7,94% tetap menjadi batas penting dalam menyatakan peningkatan kinerja.

Secara deskriptif, PP 201 C menunjukkan perubahan yang lebih positif daripada PP 201 B jika ditinjau dari daya hidrolik, konsumsi daya, dan efisiensi. PP 201 C mampu menghasilkan daya hidrolik sedikit lebih besar menggunakan konsumsi daya yang lebih rendah. Sebaliknya, PP 201 B mengalami penurunan daya hidrolik yang lebih besar daripada penurunan konsumsi dayanya.

Temuan penelitian Rifai et al. (2025) menunjukkan bahwa restorasi *wear ring* dapat meningkatkan *flowrate*, *head*, dan efisiensi secara bersamaan. Hasil penelitian ini tidak sepenuhnya menunjukkan pola tersebut. Perbedaan dapat disebabkan oleh perbedaan komponen yang diperbaiki dan kondisi pengamatan. Restorasi *wear ring* berhubungan langsung dengan kebocoran internal dan dilakukan dalam kondisi pengujian yang lebih terkendali, sedangkan penelitian ini mengevaluasi *maintenance mechanical seal* berdasarkan data historis lapangan.

Perbedaan tersebut bukan berarti *maintenance mechanical seal* tidak berhasil. Tujuan utama penggantian *mechanical seal* adalah mengembalikan fungsi penyekatan dan mengatasi kebocoran. Data penelitian ini hanya menilai perubahan parameter hidraulik dan energi. Keberhasilan mengatasi kebocoran tidak dapat dievaluasi secara kuantitatif karena data tingkat kebocoran sebelum dan sesudah *maintenance* tidak tersedia.

G. Kestabilan operasi

Sebelum *maintenance*, PP 201 B menunjukkan kondisi yang relatif stabil. Hal tersebut terlihat dari rentang *flowrate*, *head*, daya hidrolik, konsumsi daya, dan efisiensi yang sempit. Setelah *maintenance*, seluruh parameter menunjukkan rentang yang lebih besar. Dengan demikian, meskipun rata-rata *flowrate* relatif dapat dipertahankan, kestabilan operasi PP 201 B belum menunjukkan perbaikan.

Pada PP 201 C, kondisi sebelum *maintenance* telah menunjukkan variasi yang cukup besar pada beberapa parameter. Setelah *maintenance*, *flowrate*, *head*, daya hidrolik, dan konsumsi daya masih menunjukkan fluktuasi

akibat satu kejadian yang berbeda dari pola umum. Namun, efisiensi setelah *maintenance* menjadi lebih stabil karena rentangnya menurun dari 46,21–56,91% menjadi 51,86–53,60%.

Kestabilan dalam penelitian ini dinilai berdasarkan rentang dan pola grafik, bukan berdasarkan analisis statistik proses atau standar deviasi jangka panjang. Periode pengamatan yang singkat belum dapat menggambarkan seluruh variasi operasi pompa. Oleh karena itu, hasil kestabilan hanya berlaku untuk data selama periode penelitian.

Simpulan

Evaluasi pada kecepatan acuan 32 Hz menunjukkan bahwa PP 201 B belum mengalami perbaikan kinerja secara menyeluruh setelah *maintenance mechanical seal*. *Flowrate* hanya menurun 0,14%, tetapi *head* dan daya hidrolik masing-masing menurun 5,47% dan 5,62%. Penurunan konsumsi daya sebesar 1,43% belum sebanding dengan penurunan keluaran hidrolik sehingga efisiensi turun dari 57,80% menjadi 56,41%. Data setelah *maintenance* juga menunjukkan variasi yang lebih besar pada sebagian besar parameter. PP 201 C menunjukkan perubahan yang lebih positif dari aspek tinggi tekan dan pemanfaatan energi. Meskipun *flowrate* menurun 7,94%, *head* meningkat 10,49%, daya hidrolik meningkat 1,49%, dan konsumsi daya menurun 4,40%, sehingga efisiensi meningkat dari 49,36% menjadi 52,35%. Dengan demikian, perubahan kinerja PP 201 C lebih positif dibandingkan PP 201 B dari aspek daya hidrolik, konsumsi daya, dan efisiensi, tetapi penurunan kapasitas aliran tetap perlu dievaluasi terhadap kebutuhan sistem *water injection*. Kesimpulan tersebut menggambarkan perubahan berdasarkan data historis yang tersedia dan tidak menyatakan bahwa seluruh perubahan hanya disebabkan oleh *maintenance mechanical seal*.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada PT Y yang telah memberikan kesempatan dan data pendukung penelitian, kepada Program Studi S1 Teknik Mesin Universitas Negeri Surabaya, serta kepada dosen pembimbing dan seluruh pihak yang telah memberikan arahan selama pelaksanaan dan penyusunan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- An, W., Ma, Y., Xu, H., Ke, E., Liao, X., & Zhao, R. (2025). Research and application analysis of intelligent control strategy for water injection pump in offshore oil and gas field. *Water*, 17(10), Article 1506. <https://doi.org/10.3390/w17101506>
- Chen, S., Chen, C., Li, Y., Meng, L., Wei, L., & Guan, B. (2025). Optimization of operating parameters scheme for water injection system based on a hybrid particle swarm-crested porcupine

algorithm. *Sustainability*, 17(17), Article 8057. <https://doi.org/10.3390/su17178057>

- Luo, Y., Fan, Y., Han, Y., Zhang, W., & Acheaw, E. (2020). Research on the dynamic characteristics of mechanical seal under different extrusion fault degrees. *Processes*, 8(9), Article 1057. <https://doi.org/10.3390/pr8091057>
- Manikandan, S., & Duraivelu, K. (2023). Vibration-based fault diagnosis of broken impeller and mechanical seal failure in industrial mono-block centrifugal pumps using deep convolutional neural network. *Journal of Vibration Engineering & Technologies*, 11(1), 141–152. <https://doi.org/10.1007/s42417-022-00566-0>
- Rifai, M. S., Ruhyat, N., & Surachman, A. (2025). Performance analysis of centrifugal pumps before and after wear ring restoration. *International Journal of Innovation in Mechanical Engineering and Advanced Materials*, 7(1), 43. <https://doi.org/10.22441/ijimeam.v7i1.30324>
- Susan-Resiga, R. F., Bosioc, A. I., & Stuparu, A. C. (2023). Enhanced affinity law for centrifugal pumps at variable speed. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1136(1), Article 012056. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1136/1/012056>
- Wang, Q., Song, Y., Li, H., Shu, Y., & Xiao, Y. (2023). Tribological behavior characterization and fault detection of mechanical seals based on face vibration acceleration measurements. *Lubricants*, 11(10), Article 430. <https://doi.org/10.3390/lubricants11100430>
- Zhao, J., Dong, Y., Fu, J., Zhao, L., & Zhang, Y. (2020). Design and experiment of energy-saving water injection pump. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 10(5), 2127–2135. <https://doi.org/10.1007/s13202-020-00860-1>