

# Analisis Pengaruh Debit Fluida Terhadap Kinerja Pompa Sentrifugal Pada Sistem Perpipaan Industri

Mhd. Arya Winata

Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Al Washliyah Medan

## ABSTRAK

Pompa sentrifugal merupakan komponen kritis dalam sistem perpipaan industri yang berfungsi memindahkan fluida melalui peningkatan energi kinetik dan tekanan. Kinerja pompa sentrifugal dipengaruhi secara signifikan oleh debit fluida yang beroperasi dalam sistem. Debit yang tidak sesuai dengan kapasitas desain dapat menyebabkan penurunan efisiensi, terjadinya cavitation, peningkatan losses, dan kerusakan komponen pompa. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh debit fluida terhadap head pompa, efisiensi, karakteristik cavitation, dan parameter kinerja lainnya menggunakan metode studi literatur komprehensif. Hasil kajian menunjukkan bahwa setiap pompa memiliki titik operasi optimum (Best Efficiency Point/BEP) dimana efisiensi mencapai nilai maksimum. Debit di atas BEP menyebabkan penurunan head dan risiko cavitation, sedangkan debit di bawah BEP memicu recirculation dan ketidakstabilan aliran. Penggunaan Variable Speed Drive (VSD) terbukti efektif meningkatkan efisiensi energi hingga 20–50% dibandingkan operasi konvensional.

**Kata Kunci:** pompa sentrifugal, debit fluida, efisiensi pompa, Best Efficiency Point (BEP), cavitation, sistem perpipaan

## ABSTRACT

Centrifugal pumps are critical components in industrial piping systems used to transfer fluids through increasing kinetic energy and pressure. The performance of centrifugal pumps is significantly influenced by the fluid flow rate operating within the system. Inappropriate flow rates can cause efficiency reduction, cavitation, increased losses, and pump component damage. This study aims to analyze the effect of fluid flow rate on pump head, efficiency, cavitation characteristics, and other performance parameters using a comprehensive literature review method. Results show that each pump has an optimal operating point (Best Efficiency Point/BEP) where efficiency reaches its maximum value. Flow rates above BEP cause head reduction and cavitation risk, while flow rates below BEP trigger recirculation and flow instability. The use of Variable Speed Drives (VSD) is proven effective in improving energy efficiency by 20–50% compared to conventional operation.

**Keywords:** centrifugal pump, fluid flow rate, pump efficiency, Best Efficiency Point (BEP), cavitation, piping system

## 1. PENDAHULUAN

Sistem perpipaan merupakan infrastruktur vital dalam berbagai sektor industri, meliputi industri manufaktur, pembangkit listrik, pengolahan minyak dan gas bumi, industri kimia, serta sistem distribusi air. Fungsi utama sistem perpipaan adalah menyalurkan fluida baik dalam bentuk cair maupun gas dari satu titik ke titik lainnya secara aman, efisien, dan sesuai kebutuhan proses.

## 3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode studi literatur (literature review) yang dilakukan secara sistematis. Metode ini dipilih karena bertujuan mengumpulkan, menganalisis, dan mensintesis pengetahuan yang telah tersedia dari berbagai sumber ilmiah yang relevan dengan topik pengaruh debit fluida terhadap kinerja pompa sentrifugal.

Sumber data primer yang digunakan meliputi jurnal nasional dan internasional yang

Pompa sentrifugal merupakan salah satu komponen paling kritis dalam sistem perpipaan industri. Pompa ini bekerja dengan memanfaatkan gaya sentrifugal yang dibangkitkan oleh putaran impeller untuk meningkatkan energi kinetik dan tekanan fluida. Keunggulan pompa sentrifugal meliputi: konstruksi sederhana, kapasitas besar, biaya perawatan relatif rendah, serta kemampuan beroperasi pada kapasitas yang luas (Karassik, 2017).

Kinerja pompa sentrifugal sangat dipengaruhi oleh debit fluida yang mengalir dalam sistem. Debit fluida yang tidak sesuai dengan kapasitas desain pompa dapat menyebabkan berbagai masalah operasional seperti penurunan efisiensi, terjadinya cavitation, peningkatan getaran dan kebisingan, serta kerusakan prematur pada komponen pompa terutama impeller (Kumar & Patel, 2021). Fenomena ini secara langsung berdampak pada peningkatan biaya operasional dan penurunan keandalan sistem.

Konsumsi energi pompa pada industri mencapai 20–25% dari total konsumsi energi listrik industri secara keseluruhan (White, 2016). Pengoperasian pompa yang tidak optimal akibat debit yang tidak sesuai dengan titik operasi terbaik (Best Efficiency Point/BEP) dapat meningkatkan konsumsi energi secara signifikan. Oleh karena itu, analisis yang mendalam mengenai pengaruh debit fluida terhadap kinerja pompa sentrifugal menjadi sangat penting.

Makalah ini bertujuan menganalisis pengaruh debit fluida terhadap head pompa, efisiensi, karakteristik cavitation, serta losses pada sistem perpipaan industri. Metode yang digunakan adalah studi literatur komprehensif dengan mengacu pada jurnal ilmiah nasional dan

terindeks Scopus dan Google Scholar, buku teks mekanika fluida dan pompa, serta prosiding seminar internasional. Pengumpulan data dilakukan melalui database ilmiah Google Scholar, ScienceDirect, dan ResearchGate dengan kata kunci: centrifugal pump, fluid flow rate, pump efficiency, BEP, cavitation, dan piping system.

Kriteria inklusi literatur meliputi: publikasi tahun 2016–2022, menggunakan metode eksperimental atau analitis yang terukur, serta membahas secara spesifik hubungan debit dengan parameter kinerja pompa. Analisis dilakukan dengan pendekatan deskriptif-analitis untuk mengidentifikasi pola hubungan antar variabel dari berbagai sumber literatur.

## 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

### 4.1 Pengaruh Debit terhadap Head Pompa

Kurva karakteristik pompa sentrifugal menunjukkan hubungan terbalik antara debit dan head pompa. Ketika debit meningkat, head total pompa cenderung menurun secara progresif. Hal ini terjadi karena peningkatan aliran fluida menyebabkan losses akibat gesekan dalam pipa (friction head losses) meningkat sesuai persamaan Darcy-Weisbach:  $h_f = f \times (L/D) \times (v^2/2g)$ , di mana  $f$  adalah faktor gesekan,  $L$  panjang pipa,  $D$  diameter pipa, dan  $v$  kecepatan aliran (Çengel & Cimbala, 2018).

Head total pompa terdiri dari static head, velocity head, pressure head, dan friction head losses. Pada debit tinggi, friction head losses mendominasi dan menyebabkan head efektif yang tersedia untuk sistem perpipaan berkurang secara signifikan. Pada kondisi shut-off ( $Q = 0$ ), pompa menghasilkan head maksimum tanpa aliran.

internasional, buku teks teknik, serta artikel ilmiah yang relevan.

## 2. TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Sistem Perpipaan Industri

Sistem perpipaan industri merupakan jaringan kompleks yang terdiri dari berbagai komponen utama yaitu pipa, pompa, valve, fitting, tangki, dan instrumen pengukuran. Aliran fluida pada sistem perpipaan dapat dibedakan menjadi aliran laminar dan aliran turbulen berdasarkan bilangan Reynolds ( $Re$ ). Aliran laminar terjadi ketika  $Re < 2300$ , sedangkan aliran turbulen terjadi pada  $Re > 4000$  (Munson, 2019).

Pada sistem industri, sebagian besar aliran bersifat turbulen karena debit dan kecepatan aliran yang tinggi. Kerugian tekanan (*pressure losses*) dalam sistem perpipaan terdiri dari major losses akibat gesekan sepanjang pipa dan minor losses akibat fitting, valve, dan perubahan arah aliran. Pemahaman menyeluruh terhadap karakteristik aliran ini menjadi dasar dalam merancang dan mengoperasikan sistem perpipaan yang efisien (Çengel & Cimbala, 2018).

### 2.2 Pompa Sentrifugal

Pompa sentrifugal adalah jenis pompa dinamis yang mengubah energi mekanik dari motor penggerak menjadi energi kinetik dan energi tekanan pada fluida. Komponen utama pompa sentrifugal meliputi impeller, casing (*volute*), shaft, bearing, seal, serta suction dan delivery pipe. Impeller merupakan komponen terpenting yang berfungsi memberikan energi kinetik pada fluida melalui putaran sudu-sudunya (Stepanoff, 2018).

Prinsip kerja pompa sentrifugal didasarkan pada hukum mekanika fluida. Fluida masuk melalui sisi suction menuju eye impeller. Ketika impeller berputar, fluida terdorong keluar secara

Sebaliknya, pada runout condition ( $head = 0$ ), debit mencapai nilai maksimum (Li et al., 2022).

Hasil kajian literatur menunjukkan bahwa pada pompa sentrifugal ukuran menengah, peningkatan debit sebesar 20% di atas BEP menyebabkan penurunan head efektif sebesar 8–15%. Fenomena ini mengharuskan pemilihan pompa yang tepat sesuai kebutuhan sistem untuk menghindari under-performance atau over-performance (Gulich, 2019).

### 4.2 Pengaruh Debit terhadap Efisiensi Pompa

Efisiensi hidrolik pompa ( $\eta$ ) merupakan rasio antara daya output fluida ( $P_{out} = \rho gQH$ ) dengan daya input motor ( $P_{in}$ ). Kurva efisiensi pompa berbentuk parabola terbuka ke bawah, mencapai puncak pada titik BEP. Efisiensi pada BEP untuk pompa sentrifugal industri umumnya berkisar antara 75–90% tergantung ukuran dan desain (Kumar & Patel, 2021).

Pada kondisi low-flow ( $Q < Q_{BEP}$ ), aliran menjadi tidak stabil dan terjadi recirculation di sisi suction maupun discharge impeller. Recirculation menyebabkan kerugian energi tambahan yang signifikan dan penurunan efisiensi. Getaran dan suara bising meningkat, yang merupakan indikasi kondisi operasi tidak normal (White, 2016).

Pada kondisi high-flow ( $Q > Q_{BEP}$ ), losses hidrolik dan mekanik meningkat tajam sehingga efisiensi turun drastis. Konsumsi daya listrik motor meningkat karena pompa harus bekerja lebih keras melawan losses yang besar. Kajian Rahman dan Putra (2022) menunjukkan bahwa pengoperasian pompa pada 130%  $Q_{BEP}$  menyebabkan penurunan efisiensi hingga 15–20% dari nilai efisiensi maksimum di BEP.

radial menuju casing akibat gaya sentrifugal. Energi kinetik yang dihasilkan kemudian dikonversi menjadi energi tekanan di dalam casing/volute sehingga fluida mampu mengalir menuju sistem perpipaan dengan tekanan yang diinginkan (Gülich, 2019).

Hubungan antara debit ( $Q$ ), luas penampang ( $A$ ), dan kecepatan aliran ( $v$ ) pada pompa dinyatakan sebagai:  $Q = A \times v$ . Persamaan ini menunjukkan bahwa debit berbanding lurus dengan kecepatan dan luas penampang aliran. Peningkatan kecepatan impeller secara langsung meningkatkan kecepatan aliran dan debit fluida.

### **2.3 Debit Fluida dan Best Efficiency Point (BEP)**

Debit fluida ( $Q$ ) didefinisikan sebagai volume fluida yang mengalir melewati suatu penampang per satuan waktu, dinyatakan dalam  $m^3/s$  atau  $L/min$ . Debit menjadi parameter utama yang menentukan kapasitas aliran dan performa keseluruhan pompa. Setiap pompa sentrifugal memiliki kurva karakteristik yang menggambarkan hubungan antara debit, head, efisiensi, dan daya input (Gupta, 2020).

Best Efficiency Point (BEP) adalah titik operasi di mana pompa bekerja pada efisiensi tertinggi dengan getaran minimum dan umur komponen terpanjang. Debit pada BEP ( $Q_{BEP}$ ) merupakan debit desain yang menjadi acuan operasional pompa. Pengoperasian pompa jauh dari BEP, baik pada debit terlalu rendah (low-flow region) maupun terlalu tinggi (high-flow region), menyebabkan penurunan efisiensi yang signifikan (Rahman & Putra, 2022).

### **4.3 Analisis Cavitation akibat Debit Tidak Optimal**

Cavitation merupakan fenomena pembentukan gelembung uap pada fluida akibat tekanan lokal yang turun di bawah tekanan uap jenuh fluida pada temperatur operasi. Pada pompa sentrifugal, cavitation paling sering terjadi di sekitar eye impeller di sisi suction akibat penurunan tekanan yang tajam (Singh & Verma, 2020).

Debit yang terlalu tinggi ( $Q \gg Q_{BEP}$ ) menyebabkan kecepatan aliran di sisi suction meningkat drastis, sehingga tekanan statis pada sisi tersebut turun di bawah tekanan uap fluida. Gelembung uap yang terbentuk kemudian kolaps secara implosif pada daerah tekanan tinggi, menghasilkan micro-jet dengan tekanan lokal sangat tinggi yang merusak permukaan impeller (Zhao et al., 2021).

Dampak cavitation meliputi: erosi permukaan impeller yang progresif, getaran dan kebisingan yang meningkat, penurunan head dan kapasitas pompa secara mendadak, serta kerusakan seal dan bearing akibat getaran berlebih. Parameter Net Positive Suction Head Available (NPSHa) harus selalu lebih besar dari NPSHr (required) untuk mencegah cavitation, dengan safety margin minimal 0.5–1.0 m (Gülich, 2019).

### **4.4 Optimasi Kinerja Pompa Sentrifugal**

Strategi optimasi kinerja pompa sentrifugal pada sistem perpipaan industri dapat dilakukan melalui beberapa pendekatan. Pertama, pengoperasian pompa pada BEP atau dalam rentang 80–110%  $Q_{BEP}$  untuk memastikan efisiensi optimal dan umur komponen yang maksimal. Kedua, pemilihan diameter pipa yang sesuai untuk meminimalkan losses dan menjaga

kecepatan aliran pada rentang optimal (Fox et al., 2019).

Penggunaan Variable Speed Drive (VSD) atau variable frequency drive (VFD) merupakan solusi efektif untuk mengoptimalkan operasi pompa pada beban yang bervariasi. Dengan VSD, kecepatan putaran pompa dapat disesuaikan secara kontinu dengan kebutuhan debit, sehingga pompa selalu beroperasi mendekati BEP. Penghematan energi yang dapat dicapai dengan VSD berkisar 20–50% dibandingkan metode throttling konvensional menggunakan valve (Mott, 2018).

Pemeliharaan berkala (preventive maintenance) juga berperan penting dalam menjaga performa pompa. Kegiatan pemeliharaan meliputi pemeriksaan dan penggantian seal, pelumasan bearing, pembersihan impeller dari scale dan deposit, serta kalibrasi instrumen pengukuran debit dan tekanan. Monitoring kondisi pompa secara real-time menggunakan sistem SCADA dapat mendeteksi anomali operasi secara dini (Li et al., 2022).

## **5. KESIMPULAN**

Berdasarkan hasil analisis literatur yang telah dilakukan, dapat disimpulkan hal-hal berikut:

- (1) Debit fluida memiliki pengaruh yang signifikan dan menyeluruh terhadap kinerja pompa sentrifugal. Peningkatan debit di atas BEP menyebabkan penurunan head efektif pompa secara progresif akibat meningkatnya friction losses dalam sistem perpipaan.
- (2) Efisiensi pompa sentrifugal mencapai nilai maksimum pada titik Best Efficiency Point (BEP). Pengoperasian pompa di luar rentang 80–110%  $Q_{BEP}$  menyebabkan penurunan efisiensi yang signifikan, peningkatan konsumsi energi, dan percepatan keausan komponen.

(3) Cavitation merupakan dampak kritis dari pengoperasian pompa pada debit yang terlalu tinggi. Fenomena ini menyebabkan erosi impeller, getaran, kebisingan, dan penurunan performa pompa yang dapat berujung pada kegagalan komponen secara prematur.

(4) Penggunaan Variable Speed Drive (VSD) terbukti sebagai solusi paling efektif dalam mengoptimalkan operasi pompa sentrifugal pada beban yang bervariasi, dengan potensi penghematan energi 20–50% dibandingkan metode konvensional.

## 6. SARAN

1. Industri perlu memastikan pompa sentrifugal dioperasikan pada titik BEP atau dalam rentang 80–110%  $Q_{BEP}$  melalui seleksi pompa yang tepat dan monitoring debit secara berkala.

2. Implementasi Variable Speed Drive (VSD) sangat direkomendasikan untuk sistem dengan variasi beban tinggi guna meningkatkan efisiensi energi dan memperpanjang umur pakai pompa.

3. Penelitian eksperimental lebih lanjut perlu dilakukan dengan variasi debit yang terukur menggunakan peralatan instrumentasi presisi untuk memvalidasi hasil kajian literatur ini.

4. Sistem monitoring kondisi pompa secara real-time berbasis IoT perlu dikembangkan untuk memungkinkan deteksi dini anomali operasi dan pencegahan kerusakan komponen.

## DAFTAR PUSTAKA

- Çengel, Y. A., & Cimbala, J. M. (2018). *Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications* (4th ed.). McGraw-Hill Education.
- Fox, R. W., McDonald, A. T., & Pritchard, P. J. (2019). *Introduction to Fluid Mechanics* (9th ed.). John Wiley & Sons.
- Gupta, R. (2020). Performance Analysis of Centrifugal Pumps in Industrial Applications. *International Journal of Mechanical Engineering*, 8(2), 112–120.
- Gülich, J. F. (2019). *Centrifugal Pumps* (3rd ed.). Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Karassik, I. J., Messina, J. P., Cooper, P., & Heald, C. C. (2017). *Pump Handbook* (4th ed.). McGraw-Hill Education.

- Kumar, S., & Patel, D. (2021). Effect of Flow Rate on Centrifugal Pump Efficiency. *Journal of Hydraulic Engineering*, 15(3), 210–218.
- Li, X., Wang, Y., & Zhao, H. (2022). Flow Characteristics and Energy Losses in Industrial Pump Systems. *Energy Engineering Journal*, 45(2), 150–165.
- Mott, R. L. (2018). *Applied Fluid Mechanics* (7th ed.). Pearson Education.
- Munson, B. R., Young, D. F., Okiishi, T. H., & Huebsch, W. W. (2019). *Fundamentals of Fluid Mechanics* (8th ed.). John Wiley & Sons.
- Rahman, A., & Putra, D. (2022). Analisis Pengaruh Debit Fluida terhadap Efisiensi Pompa Sentrifugal. *Jurnal Teknik Mesin Indonesia*, 14(1), 22–30.
- Singh, P., & Verma, R. (2020). Experimental Study on Cavitation in Centrifugal Pumps. *International Journal of Fluid Machinery*, 11(1), 45–54.
- Stepanoff, A. J. (2018). *Centrifugal and Axial Flow Pumps: Theory, Design and Application* (2nd ed.). Krieger Publishing Company.
- Sularso, & Tahara, H. (2017). *Pompa dan Kompresor: Pemilihan, Pemakaian dan Pemeliharaan*. Pradnya Paramita.
- White, F. M. (2016). *Fluid Mechanics* (8th ed.). McGraw-Hill Education.
- Zhao, L., Chen, X., & Liu, Y. (2021). Cavitation Characteristics in Centrifugal Pumps. *Journal of Mechanical Systems*, 19(4), 210–218.