

STUDI SIMULASI *COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS* MEDAN ALIRAN PADA *VERTICAL-INLINE CENTRIFUGAL PUMP*

*Achmad Romy Fatchi Aydin¹, Khoiri Rozi²

¹Mahasiswa Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

²Dosen Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro
Jl. Prof. Soedarto, SH., Tembalang-Semarang 50275, Telp. +62247460059

*E-mail: achmadromyyy@gmail.com

Abstrak

Pompa sentrifugal vertical-inline banyak digunakan pada industri minyak dan gas karena memiliki konfigurasi yang kompak serta mampu diintegrasikan langsung dengan sistem perpipaan. Namun, keberadaan curved inlet sebelum impeler berpotensi menimbulkan distorsi aliran, distribusi kecepatan yang tidak seragam, serta peningkatan kerugian hidraulik yang berdampak terhadap penurunan performa pompa. Penelitian ini bertujuan menganalisis karakteristik medan aliran pada pompa sentrifugal vertical-inline menggunakan metode Computational Fluid Dynamics (CFD) serta mengevaluasi pengaruh modifikasi geometri inlet terhadap distribusi tekanan, distribusi kecepatan, pola streamline, head, dan efisiensi pompa. Simulasi dilakukan menggunakan ANSYS Fluent dengan pendekatan steady-state dan model turbulensi $k-\omega$ SST. Geometri dianalisis pada empat kondisi operasi yaitu 70%, 85%, 100%, dan 115% dari Best Efficiency Point (BEP). Hasil simulasi menunjukkan bahwa seluruh model menghasilkan distribusi tekanan dan kecepatan yang berbeda pada masing-masing debit design.

Kata kunci: computational fluid dynamic; curved inlet; vertical-inline pump

Abstract

Vertical-inline centrifugal pumps are widely used in the oil and gas industry due to their compact configuration and ability to be integrated directly into the piping system. However, the presence of a curved inlet before the impeller has the potential to cause flow distortion, non-uniform velocity distribution, and increased hydraulic losses that impact pump performance. This study aims to analyze the flow field characteristics of a vertical-inline centrifugal pump using the Computational Fluid Dynamics (CFD) method and evaluate the effect of inlet geometry modifications on pressure distribution, velocity distribution, streamline pattern, head, and pump efficiency. Simulations were performed using ANSYS Fluent with a steady-state approach and the $k-\omega$ SST turbulence model. The geometry was analyzed at four operating conditions: 70%, 85%, 100%, and 115% of the Best Efficiency Point (BEP). The simulation results show that all models produce different pressure and velocity distributions at each design discharge.

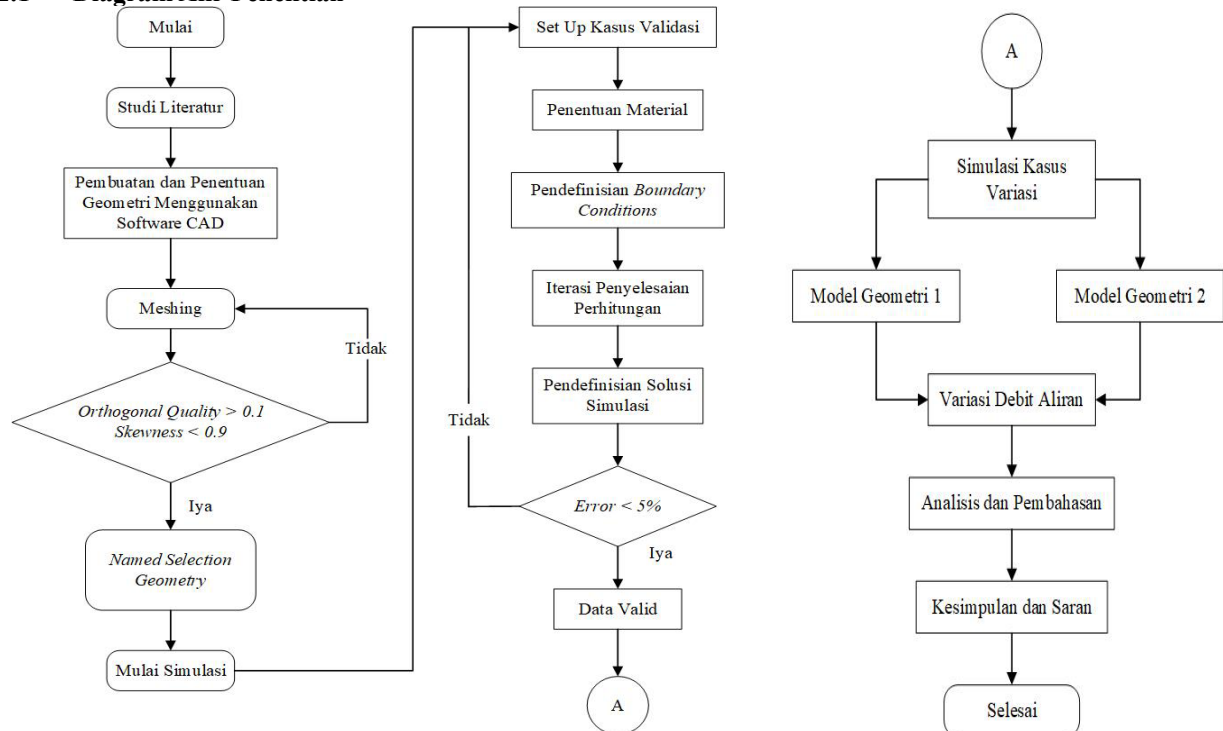
Keywords: computational fluid dynamics; curved inlet; vertical-inline pump

1. Pendahuluan

Pompa sentrifugal merupakan salah satu peralatan utama yang digunakan dalam sistem transportasi fluida pada industri minyak dan gas, pembangkit energi, serta sistem distribusi air [1]. Salah satu jenis pompa yang banyak digunakan adalah vertical-inline centrifugal pump yang termasuk dalam klasifikasi overhung pump tipe OH4 berdasarkan standar API 610 [2]. Keunggulan utama pompa vertical-inline adalah desain yang kompak, kebutuhan ruang instalasi yang rendah, serta kemudahan integrasi dengan sistem perpipaan. Oleh karena itu, pompa jenis ini banyak diaplikasikan pada fasilitas industri yang memiliki keterbatasan ruang instalasi [3]. Meskipun demikian, keberadaan saluran masuk berbentuk melengkung (curved inlet) dapat menyebabkan distorsi aliran sebelum fluida memasuki impeler. Fenomena ini dapat memicu terbentuknya aliran sekunder, vortex, flow separation, serta resirkulasi aliran yang berdampak terhadap peningkatan rugi-rugi hidraulik dan penurunan efisiensi pompa [4][5]. Penelitian Chen et al. menunjukkan bahwa ketidakseragaman aliran pada inlet pompa vertical-inline dapat menyebabkan peningkatan losses dan menurunkan performa pompa secara keseluruhan [6]. Sementara itu, Tang et al. menemukan bahwa modifikasi geometri curved inlet mampu memperbaiki kualitas aliran menuju impeler dan meningkatkan efisiensi operasi pompa [7].

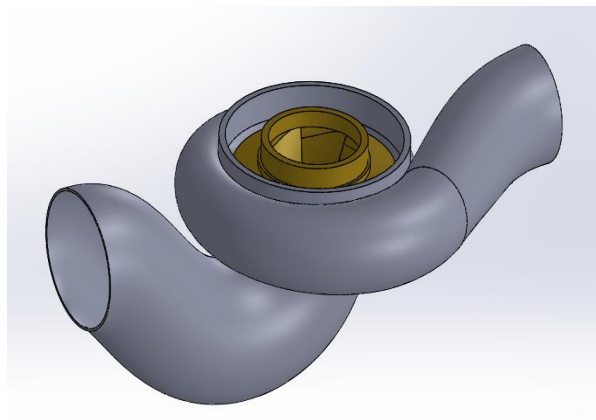
2. Metode Penelitian

2.1 Diagram Alir Penelitian



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

Diagram alir di atas menunjukkan bahwa penelitian ini dirancang dengan mekanisme kontrol kualitas yang ketat pada setiap tahapan kritis. Pendekatan sistematis ini memastikan bahwa hasil CFD yang diperoleh bersifat konsisten, dapat direproduksi, dan dapat dipertanggungjawabkan secara ilmiah, sehingga layak dijadikan dasar rekomendasi desain yang implementatif untuk pompa sentrifugal vertikal inline [8]. Proses simulasi diawali dengan pembuatan geometri fluida yang dilanjutkan dengan tahap meshing, di mana kualitasnya dipastikan memenuhi standar parameter ANSYS seperti nilai skewness dan orthogonal. Setelah mesh dinyatakan valid, pengaturan (set up) dilakukan di dalam Fluent dengan menetapkan model aliran laminar pada kondisi steady-state, mendefinisikan properti fluida (densitas dan viskositas), serta memasukkan input parameter operasional pada boundary condition seperti kecepatan angular dan temperatur [9]. Langkah terakhir mencakup pemilihan metode penyelesaian, penentuan parameter observasi pada solution information, serta pengaturan target konvergensi di bagian solution control sebelum proses iterasi dijalankan. Geometri pompa sentrifugal vertikal inline yang digunakan dalam penelitian ini dimodelkan menggunakan perangkat lunak Computer-Aided Design (CAD) SolidWorks 2023 [10]. Berikut merupakan Gambar 3.1 Geometri 3D Pompa Kasus Validasi.



Gambar 2. Geometri 3D Pompa Kasus Validasi

Pemodelan geometri difokuskan pada tiga komponen utama domain fluida, yaitu: (1) Saluran inlet berfungsi sebagai zona transisi aliran sebelum fluida memasuki impeller ; (2) Impeller adalah komponen rotasi utama yang paling menentukan distribusi kecepatan dan tekanan internal ; dan (3) Volute casing mengumpulkan aliran dari impeller dan membantu konversi energi kinetik menjadi tekanan statis. Setelah geometri pompa sentrifugal selesai dibuat dan domain fluida berhasil didefinisikan, tahapan selanjutnya adalah proses meshing. Meshing merupakan proses diskretisasi domain fluida kontinu menjadi sejumlah elemen-elemen kecil (control volume) yang digunakan sebagai dasar perhitungan numerik pada perangkat lunak ANSYS Fluent dengan metode Finite Volume Method (FVM) [11]. Kualitas mesh yang baik sangat berpengaruh terhadap kestabilan iterasi, konvergensi solusi, serta tingkat akurasi hasil simulasi yang diperoleh (Aqilah et al., 2018). Pada penelitian ini digunakan metode hybrid mesh, yaitu kombinasi elemen tetrahedral pada volume utama domain fluida dan mesh yang lebih halus pada area-area kritis seperti impeller, sudu impeller, inlet, dan outlet. Strategi ini dipilih untuk memperoleh keseimbangan antara akurasi simulasi dan efisiensi waktu komputasi.

Tabel 1. Kriteria Hasil Meshing

<i>Mesh Kriteria</i>	<i>Nilai</i>
Jumlah <i>Nodes</i>	4.790.707
Jumlah <i>Element</i>	17.818.743
<i>Min. Orthogonality</i>	0,22348
<i>Max. Orthogonality</i>	0,99819
<i>Max. Skewness</i>	0,87652
<i>Min. Skewness</i>	4,156e-011
<i>Average Skewness</i>	0,23105

Penggunaan pressure-based solver pada simulasi pompa sentrifugal didukung oleh praktik numerik yang luas pada perangkat lunak ANSYS dan OpenFOAM. Pada studi pompa sentrifugal dan pompa turbin, solver berbasis tekanan dengan kopling tekanan–kecepatan seperti SIMPLE digunakan untuk menyelesaikan medan aliran internal dan memprediksi distribusi tekanan serta kecepatan secara stabil. Pemilihan model turbulensi $k-\omega$ SST didasarkan pada kemampuannya menangani aliran dekat dinding, gradien tekanan merugikan, dan separasi aliran yang umum muncul pada pompa sentrifugal. Model ini bekerja melalui blending antara formulasi $k-\omega$ di daerah dekat dinding dan $k-\epsilon$ di daerah aliran bebas, sehingga mampu memberikan prediksi yang lebih baik terhadap lapisan batas dan aliran berkembang di luar dinding. Fluida kerja yang digunakan dalam simulasi ini adalah air cair (water liquid) yang diasumsikan bersifat incompressible, homogen, dan Newtonian [12]. Kondisi batas (boundary conditions) merupakan informasi matematis yang mendefinisikan perilaku aliran fluida pada batas-batas domain komputasional dan berfungsi sebagai pengganti informasi dari daerah di luar domain yang tidak disimulasikan.

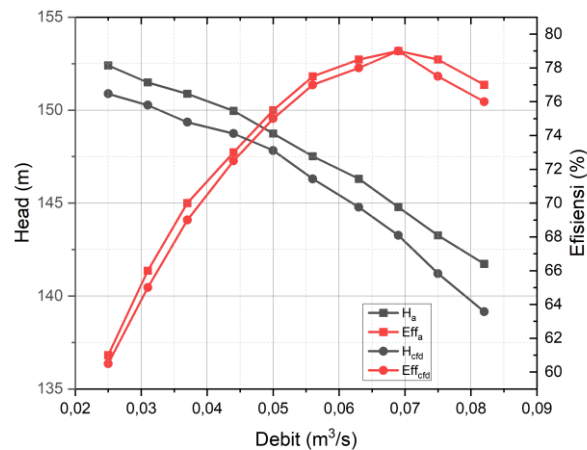
Tabel 2. Kondisi Batas Simulasi

Batas	Kondisi Batas	Nilai
Inlet	Pressure Inlet	0 Pa
Outlet	Mass Flow Outlet	68 kg (100%)
Stationary Wall	No Slip Condition	-
Moving Wall	No Slip Condition	3575 rpm

Akurasi solusi numerik dalam CFD tidak hanya bergantung pada kualitas mesh dan model fisika, tetapi juga pada pemilihan skema diskretisasi yang digunakan untuk turunan-turunan parsial dalam persamaan pembangun. Persamaan pembentuk diselesaikan dengan pendekatan finite volume, yaitu persamaan kontinu diubah menjadi sistem persamaan aljabar pada setiap sel kontrol dan kemudian diselesaikan secara iteratif. Dalam praktik CFD berbasis Fluent pada mesin fluida, proses ini memang sangat bergantung pada pemilihan skema diskretisasi spasial dan algoritma kopling tekanan–kecepatan. Pemilihan skema Second Order Upwind untuk momentum dan besaran turbulensi dapat dibenarkan karena studi numerik pada sistem aliran yang digerakkan pompa melaporkan bahwa second order upwind merupakan konfigurasi yang layak dan stabil untuk memperoleh prediksi yang baik. Konvergensi numerik tidak cukup dinilai hanya dari penurunan residual, karena residual pada dasarnya hanya menunjukkan tingkat ketidakseimbangan persamaan diskret pada setiap iterasi. Oleh sebab itu, penggunaan kriteria ganda berupa residual dan kestabilan parameter global, seperti head total dan efisiensi hidraulik, merupakan

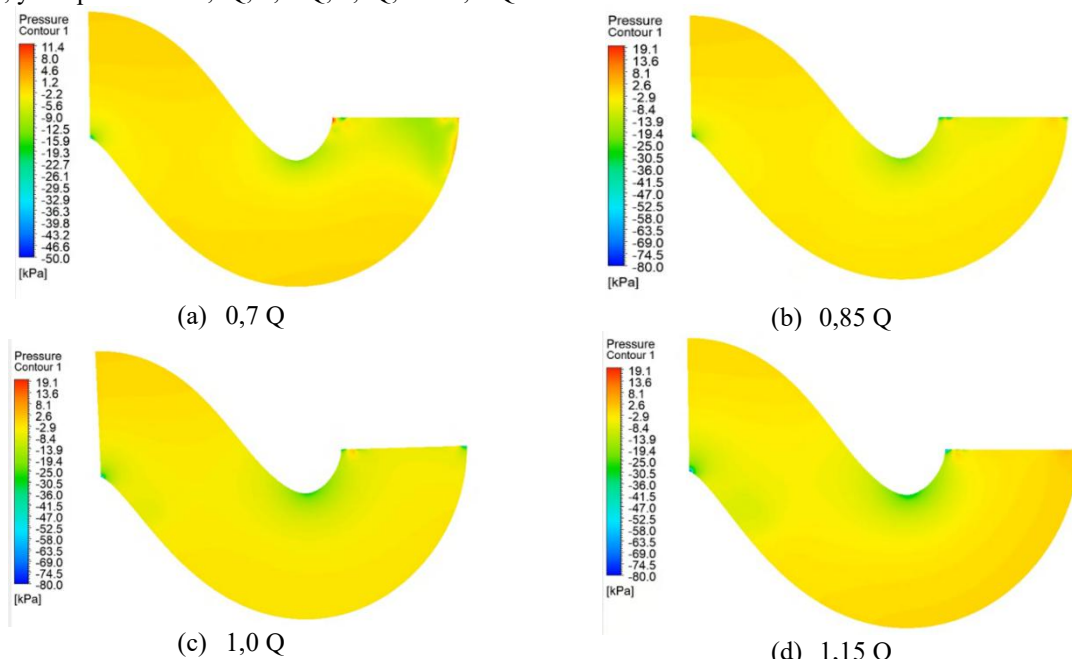
pendekatan yang lebih kuat untuk memastikan bahwa solusi yang diperoleh telah mencapai keadaan tunak yang bermakna secara fisik. Target residual sebesar 1×10^{-4} untuk persamaan kontinuitas, momentum, dan variabel turbulensi sejalan dengan praktik umum simulasi steady CFD.

3. Hasil dan Pembahasan



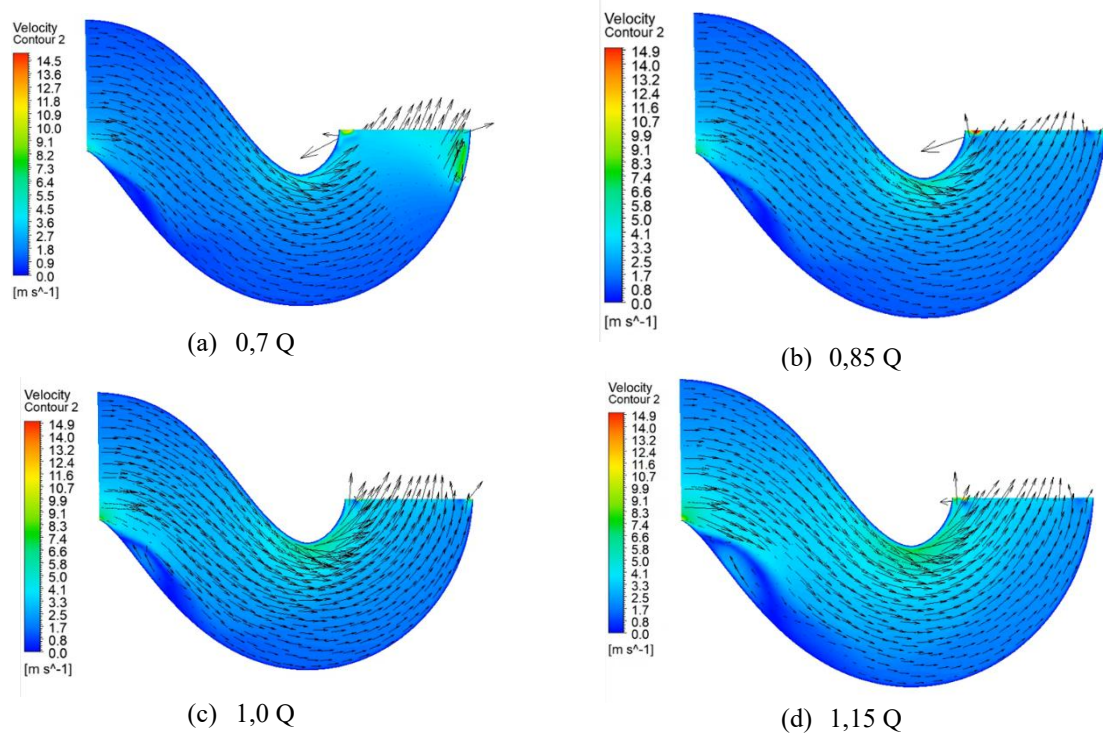
Gambar 3. Validasi Simulasi dengan Desain

Tahap awal pembahasan dilakukan dengan memvalidasi model numerik yang telah dibangun terhadap data spesifikasi teknis (manufacturer's curve) dari pompa vertical inline centrifugal. Validasi ini bertujuan untuk memastikan bahwa setelan turbulensi, meshing, dan boundary conditions yang digunakan mampu merepresentasikan kondisi aktual secara akurat. Validasi dilakukan untuk memastikan bahwa model CFD mampu merepresentasikan karakteristik performa pompa secara akurat pada berbagai variasi kapasitas hasil simulasi dari kapasitas desain. Parameter yang digunakan dalam validasi meliputi head (H) dan efisiensi dengan debit aliran (Q) yang kemudian dibandingkan dengan data spesifikasi pompa. Tahap validasi merupakan bagian penting dalam studi CFD untuk memastikan model mampu merepresentasikan kondisi hidrodinamika pompa secara akurat. Analisis distribusi tekanan pada Model I dilakukan untuk mengevaluasi karakteristik tekanan inlet rata-rata yang terbentuk di sepanjang saluran masuk dan domain impeller pada berbagai kondisi operasi. Gambar 4 merepresentasikan distribusi tekanan statis pada impeler Model I untuk empat kondisi operasi yang berbeda, yaitu pada debit 0,7Q, 0,85Q, 1,0Q, dan 1,15Q.



Gambar 4. Distribusi Tekanan pada mid plane

Gambar 5 menunjukkan distribusi kecepatan beserta vektor kecepatan aliran pada Model I untuk keempat kondisi operasi. Nilai kecepatan direpresentasikan oleh degradasi warna di mana warna merah mengindikasikan kecepatan tertinggi dan warna biru mengindikasikan kecepatan terendah. Panjang dan arah anak panah vektor memberikan informasi mengenai besaran dan orientasi aliran di setiap titik di dalam domain impeler. Peningkatan kecepatan inlet rata-rata yang bersifat linear ini secara fisis konsisten dengan persamaan kontinuitas, di mana kecepatan rata-rata pada penampang inlet akan meningkat secara proporsional seiring bertambahnya laju volumetrik aliran. Namun yang lebih penting untuk dianalisis adalah bagaimana distribusi spasial kecepatan tersebut berubah di dalam domain impeller ketika debit bervariasi



Gambar 5. Distribusi Kecepatan pada mid plane

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil proses pemodelan dan simulasi numerik menggunakan ANSYS Fluent 2023 R2 berhasil dilakukan dengan tahapan berupa pembuatan geometri, proses meshing, penentuan boundary condition, pemilihan model turbulensi, hingga proses iterasi simulasi. Hasil validasi menunjukkan bahwa model CFD mampu merepresentasikan performa aktual pompa dengan baik, dimana nilai deviasi antara hasil simulasi dan data aktual berada di bawah 5%. Hal ini menunjukkan bahwa metode numerik yang digunakan cukup akurat untuk menganalisis karakteristik medan aliran pada vertical inline centrifugal pump. Variasi debit berpengaruh signifikan terhadap distribusi tekanan dan kecepatan di dalam impeler. Kondisi 1,0Q (BEP) menunjukkan distribusi tekanan dan kecepatan yang paling merata dengan gradien aliran yang stabil, sehingga menghasilkan kerugian hidraulik yang minimum. Sebaliknya, pada kondisi 0,7Q dan 1,15Q muncul ketidakseragaman distribusi tekanan serta zona kecepatan rendah dan tinggi yang lebih dominan, mengindikasikan peningkatan potensi separasi aliran, turbulensi, dan penurunan efisiensi hidraulik.

5. Daftar Pustaka

- [1] Chen, Y., Wang, X., Zhang, H., & Liu, J. (2021). Numerical Investigation of Flow Distortion in Vertical Inline Centrifugal Pumps. *Journal of Fluids Engineering*, 143(8), 081201.
- [2] Tang, F., Li, Z., Wang, Y., & Zhao, C. (2021). Influence of Curved Inlet Pipe on Hydraulic Performance of Vertical Inline Pump. *Processes*, 9(10), 1758.
- [3] Gan, X., Zhang, W., Li, H., & Sun, Q. (2022). Flow Characteristics and Secondary Flow Structures in Vertical Inline Centrifugal Pumps. *Energies*, 15(12), 4315.
- [4] Wang, K., Chen, H., Liu, X., & Yang, D. (2022). CFD-Based Analysis of Internal Flow in Centrifugal Pumps. *Applied Sciences*, 12(4), 1942.
- [5] Güner, M., & Özbayer, M. (2020). Performance Characteristics of Centrifugal Pumps. *Engineering Science and Technology*, 23(4), 950–960.

-
- [6] Alanbaee, A., & Elkhzim, N. (2021). Analytical Evaluation of Pump Characteristic Curves and Operating Points. *Energy Reports*, 7, 559–568.
 - [7] Jones, J., & Korkowski, J. (2017). API 610 Centrifugal Pumps for Petroleum Industries. *Pump Users Handbook*. Elsevier.
 - [8] Lugova, P., Korkowski, J., & Jones, D. (2017). Mechanical Design Considerations in API 610 Pumps. *Pump Industry Analyst*, 11(3), 25–31.
 - [9] Singh, R., Sharma, P., & Verma, A. (2016). Vibration and Bearing Analysis in Overhung Pumps. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 70–71, 114–125.
 - [10] Baloni, S., Kumar, R., & Patel, M. (2026). Hydraulic Performance Assessment of Centrifugal Pumps under Variable Operating Conditions. *International Journal of Fluid Machinery and Systems*, 19(1), 12–23.
 - [11] API Standard 610. (2021). *Centrifugal Pumps for Petroleum, Petrochemical and Natural Gas Industries*. American Petroleum Institute.
 - [12] ISO 9906. (2012). Rotodynamic Pumps – Hydraulic Performance Acceptance Tests. International Organization for Standardization.