

Studi Numerik Aliran Fluida dan Gaya Hidrodinamik pada Turbin Kaplan Menggunakan *Computational Fluid Dynamics*

Dio Muhamad Fadilah¹, Adhita Prasetia², Nia Nuraeni Suryaman³

Email corresponding author: dio.fadilah@widyatama.ac.id

^{1,2,3}Mechanical Engineering, Universitas Widyatama, Bandung, 40126, Indonesia

Article history: Received: 26 Maret 2026 | Revised: 29 April 2026 | Accepted: 5 Mei 2026

Abstract. Indonesia has vast water resources with low-head characteristics, making Kaplan turbines the most suitable technology due to high energy conversion efficiency. However, unstable pressure often leads to serious damage to turbine shaft components from complex dynamic loads. This study aims to analyze pressure distribution, velocity distribution, and hydrodynamic torque in the Tarum Barat Kaplan turbine system using actual data from Perum Jasa Tirta II. Computational Fluid Dynamics (CFD) with the *k-omega SST* model was used to detect flow separation at 250 rpm and 2.46 m³/s. Simulation results show high validity with a 4.28% torque error between numerical results and measured torque data. Findings indicate a stable pressure distribution gradient on the blade surface with a maximum flow velocity of 25.61 m/s. This phenomenon generates an average torque of 5,739 Nm. This study provides a quantitative reference for improving reliability and design standards of hydro turbine transmission systems.

Keywords - Kaplan Turbine; CFD; Pressure Distribution; Velocity Distribution; Hydrodynamic Torque.

Abstrak. Indonesia memiliki kekayaan sumber daya air besar dengan karakteristik low-head, sehingga turbin Kaplan menjadi teknologi paling sesuai dikembangkan karena efisiensi konversi energinya yang tinggi. Namun, tekanan tidak stabil sering menyebabkan risiko kerusakan serius pada komponen poros turbin akibat beban dinamis yang kompleks. Penelitian ini bertujuan menganalisis karakteristik distribusi tekanan, distribusi kecepatan, dan torsi hidrodinamik pada sistem turbin Kaplan Tarum Barat menggunakan data operasional aktual Perum Jasa Tirta II. Metode Computational Fluid Dynamics (CFD) dengan model turbulensi *k-omega SST* digunakan untuk mendeteksi pemisahan aliran secara akurat pada kondisi 250 rpm dan debit 2,46 m³/s. Hasil simulasi menunjukkan validitas tinggi dengan nilai error torsi 4,28% antara hasil numerik terhadap data torsi pengukuran. Temuan menunjukkan gradien distribusi tekanan stabil pada permukaan sudu dengan kecepatan aliran maksimal 25,61 m/s. Fenomena tersebut menghasilkan torsi rata-rata 5.739 Nm. Studi ini memberikan referensi kuantitatif bagi peningkatan reliabilitas dan standar perancangan sistem transmisi turbin hidro di sektor industri.

Kata Kunci - Turbin Kaplan; CFD; Distribusi Tekanan; Distribusi Kecepatan; Torsi Hidrodinamik.

PENDAHULUAN

Peningkatan kebutuhan energi bersih di tingkat global saat ini telah memicu akselerasi dalam optimalisasi pemanfaatan energi hidro sebagai salah satu pilar sumber energi terbarukan yang berkelanjutan dan ramah lingkungan [1]. Indonesia, sebagai negara dengan kekayaan sumber daya air yang masif, memiliki karakteristik hidrologi spesifik berupa aliran sungai berdebit besar namun dengan *head* (tinggi jatuh) yang relatif rendah, sehingga menempatkan turbin Kaplan sebagai teknologi mesin fluida yang paling adaptif dan efisien untuk dikembangkan [2],[3]. Desain inovatif aliran aksial pada turbin Kaplan memungkinkan proses konversi energi mekanik tetap berada pada tingkat efisiensi yang tinggi, meskipun turbin harus beroperasi dalam kondisi fluktuasi debit air yang signifikan [4]. Karakteristik unggul tersebut menyebabkan turbin jenis ini banyak diimplementasikan secara luas, mulai dari sistem pembangkit listrik tenaga mikrohidro hingga instalasi pompa hidrolis skala industri [5],[6],[7].

Kajian literatur terdahulu menunjukkan bahwa tren penelitian mengenai turbin Kaplan saat ini didominasi oleh upaya optimasi geometri sudu guna memperoleh efisiensi hidrolis maksimum melalui variasi parameter operasional yang luas [8],[9],[10]. Berbagai studi investigasi juga telah melaporkan adanya insiden fatal berupa kegagalan mekanis katastropik pada komponen poros (*shaft*) akibat akumulasi beban dinamis yang dipicu oleh pulsasi tekanan (*pressure pulsation*) yang kompleks di dalam sistem [11],[12],[13] dan [14]. Namun demikian, tinjauan terhadap literatur menunjukkan bahwa kajian yang secara spesifik menganalisis karakteristik perilaku internal fluida pada satu titik operasional tetap (*fixed operating parameters*) berdasarkan data teknis aktual masih relatif terbatas. Terdapat celah penelitian (*research gap*) dalam memahami bagaimana profil distribusi tekanan dan kecepatan aliran pada kondisi operasional desain berkontribusi secara langsung terhadap stabilitas torsi hidrodinamik yang bekerja pada sistem rotor [15],[16]. Investigasi pada kondisi debit dan kecepatan putar tertentu menjadi sangat krusial untuk mencegah risiko

kegagalan struktural yang sering kali tidak terprediksi melalui pendekatan perancangan analitik konvensional [11],[17],[18].

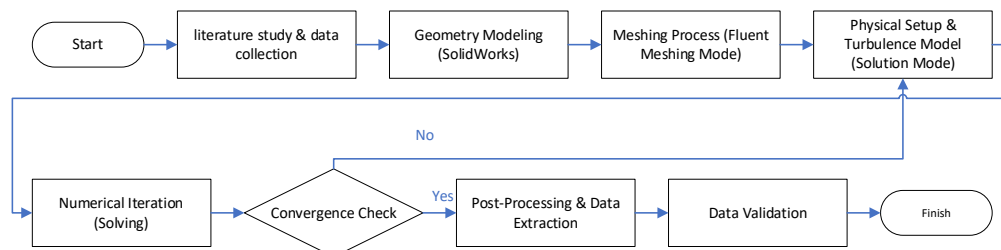
Dalam upaya membedah kompleksitas tersebut, *Computational Fluid Dynamics* (CFD) hadir sebagai metode numerik esensial yang mampu merepresentasikan interaksi antara fluida dan rotor secara mendetail. Penggunaan model turbulensi *k-omega SST (Shear Stress Transport)* dipilih karena kapabilitasnya yang superior dalam menangkap fenomena pemisahan aliran (*flow separation*) dan memprediksi gradien tekanan di area dekat dinding sudu secara akurat [11],[13],[19]. Pendekatan numerik ini memungkinkan evaluasi yang lebih mendalam terhadap profil distribusi tekanan, pola kecepatan, serta estimasi nilai torsi hidrodinamik pada kondisi operasional desain secara realistis dan terukur [11],[17],[14]. Analisis ini menjadi sangat penting sebagai dasar ilmiah untuk melakukan *redesign* atau peningkatan reliabilitas komponen mesin fluida di industri.

Penelitian ini bertujuan untuk melakukan studi numerik komprehensif guna menganalisis karakteristik distribusi tekanan, distribusi kecepatan, dan besaran torsi hidrodinamik pada sistem turbin Kaplan menggunakan data teknis operasional dari Perum Jasa Tirta II. Parameter yang ditentukan mencakup putaran normal sebesar 250 rpm dan debit air sebesar 2,46 m³/detik untuk tipe turbin *propeller* dengan *fixed* distributor. Kebaruan (*novelty*) dari penelitian ini terletak pada analisis mendalam terhadap perilaku internal fluida pada satu parameter operasi tetap untuk mengidentifikasi karakteristik beban hidrodinamik pada kondisi performa optimal. Hasil simulasi ini divalidasi dengan data teknis *output* daya aktual sebesar 210 HP guna menjamin akurasi pemodelan. Melalui kajian ini, diharapkan diperoleh data kuantitatif yang signifikan dalam upaya penyempurnaan standar perancangan dan peningkatan ketahanan sistem transmisi turbin terhadap dinamika beban hidrodinamik di masa mendatang [20],[1],[21].

METODE

A. Rancangan Penelitian dan Prosedur Simulasi Numerik

Penelitian ini menerapkan studi kuantitatif berbasis komputasi menggunakan metode *Computational Fluid Dynamics* (CFD) untuk menganalisis karakteristik hidrodinamika pada turbin Kaplan. Prosedur penelitian dilaksanakan secara sistematis meliputi studi literatur, pemodelan geometris, diskretisasi domain, hingga eksekusi solusi numerik menggunakan perangkat lunak *Ansys Fluent 2025 R1*. Simulasi dilakukan dalam kondisi tunak (*steady-state*) dengan menerapkan model turbulensi *k-omega SST (Shear Stress Transport)* guna memastikan akurasi prediksi fenomena aliran pada daerah dekat dinding (*near-wall region*) serta zona dengan gradien tekanan tinggi. Alur penelitian secara menyeluruh disajikan pada **Gambar 1**.



Gambar 1. Flowchart Penelitian

B. Karakteristik Objek dan Spesifikasi Operasional

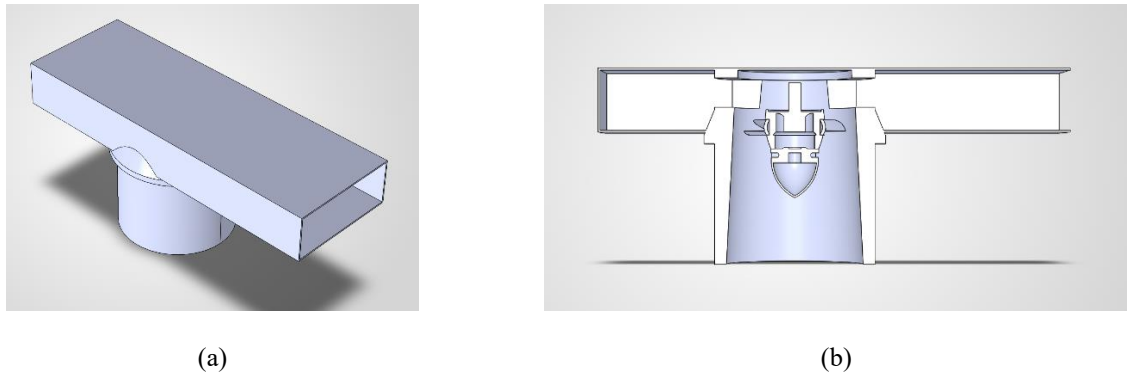
Objek penelitian merupakan unit turbin Kaplan dengan konfigurasi poros vertikal yang terinstalasi pada sistem pemompaan hidrolis di salah satu bendungan besar di wilayah Jawa Barat. Parameter operasional primer mencakup tinggi jatuh efektif (*effective head*) sebesar 7,30 m dan laju aliran volumetrik (*Q*) sebesar 2,46 m³/s. Komponen rotor terdiri atas 6 buah sudu yang beroperasi pada kecepatan rotasi konstan 250 rpm dengan *output* daya desain sebesar 210 HP. Spesifikasi teknis dan parameterisasi kondisi batas model komputasi dirangkum dalam **Tabel 1**.

Tabel 1. Parameter Operasi Turbin Kaplan

No	Parameter	Nilai
1	Jenis turbin	Kaplan (<i>Propeller type</i>)
2	Konfigurasi poros	Poros vertikal
3	Jumlah sudu	6 buah
4	Sistem distributor	Fixed distributor
5	Beda tinggi (<i>Head</i>)	7,30 m
6	Debit operasi (<i>Q</i>)	2,46 m ³ /s
7	<i>Output</i> daya (<i>N</i>)	210 HP
8	Putaran normal (<i>n</i>)	250 rpm
9	Putaran tidak terkendali (<i>nd</i>)	690 rpm
10	Daya guna (η_t)	87,5%

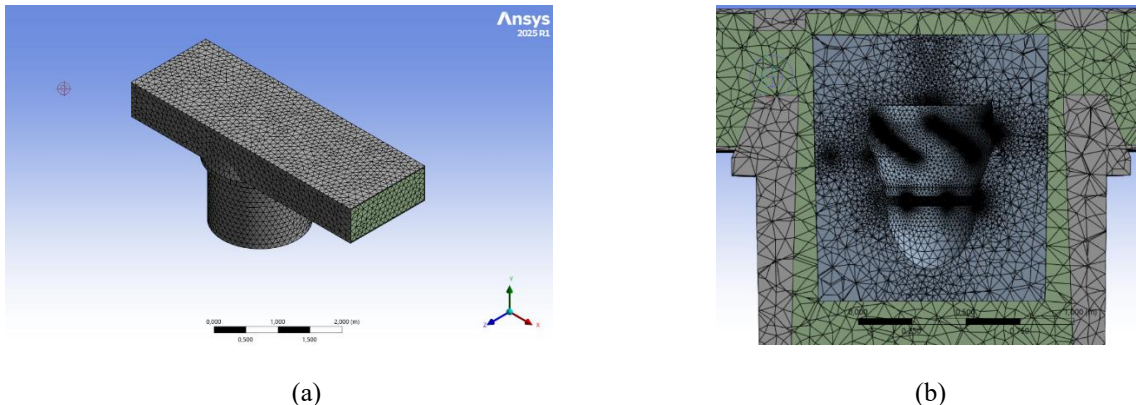
C. Pemodelan Geometris dan Diskritisasi Domain

Tahap pemodelan geometris dilakukan dengan mentransformasikan spesifikasi teknis komponen turbin Kaplan dari bentuk dua dimensi menjadi model tiga dimensi menggunakan perangkat lunak SolidWorks. Fokus pemodelan difokuskan pada komponen rotor utama yang berinteraksi langsung dengan aliran fluida, meliputi poros turbin (*turbine shaft*) bermaterial SCM4 berdiameter 5 inci serta unit *runner* yang dilengkapi dengan 6 buah sudu (*turbine blade*) bermaterial SCS13. Guna mengoptimalkan efisiensi komputasi tanpa mengurangi akurasi pada area kritis, komponen minor seperti baut pengunci tidak disertakan dalam model 3D. Representasi geometri sistem turbin yang menjadi basis simulasi ini ditunjukkan secara mendetail pada **Gambar 2**.



Gambar 2. Geometri Turbin kaplan (a) Pandangan Isometrik dan (b) Pandangan Potongan Depan

Selanjutnya, dilakukan proses diskritisasi *domain* atau *meshing* secara terintegrasi di dalam lingkungan *Ansys Fluent* dengan preferensi fisika berbasis *Computational Fluid Dynamics* (CFD). Strategi penentuan ukuran jaring-jaring (*sizing*) dilaksanakan dengan menetapkan nilai *growth rate* sebesar 1,2 dan ukuran elemen maksimal (*max size*) sebesar 0,2 m. Untuk menjamin profil aliran pada area kurvatur sudu tertangkap dengan presisi, fitur *capture curvature* diaktifkan dengan resolusi ukuran minimal $1 \times 10^{-3} m$. Kualitas jaring-jaring divalidasi melalui dua parameter utama, yaitu *Orthogonal Quality* dan *Skewness*. Berdasarkan data statistik pada Tabel 2, diperoleh nilai rata-rata *Orthogonal Quality* sebesar 0,75199 (kategori *Very Good*) dan rata-rata *Skewness* sebesar 0,24657 (kategori *Excellent*). Visualisasi jaring-jaring pada permukaan komponen kritis dan penampang interior domain disajikan pada **Gambar 3**.



Gambar 3. Geometry Mesh (a) Isometric Mesh View dan (b) Interior Section Mesh View

Tabel 2. Statistik Kualitas Mesh Domain Turbin Kaplan

Parameter Kualitas Mesh	Nilai Minimal	Nilai Maksimal	Nilai Rata-rata	Kategori Kualitas
<i>Orthogonal Quality</i>	$1,36 \times 10^{-4}$	0,99364	0,75199	<i>Very Good</i>
<i>Skewness</i>	$2,67 \times 10^{-6}$	0,99986	0,24657	<i>Excellent</i>

D. Pengaturan Solver dan Kondisi Batas

Tahap akhir dalam metode penelitian ini adalah melakukan konfigurasi pada perangkat lunak *Ansys Fluent* untuk menjalankan simulasi numerik. Proses ini menggunakan tipe *pressure-based solver* dalam kondisi aliran tetap atau *steady-state*. Untuk menghitung interaksi air dengan komponen turbin, digunakan model turbulensi *k-omega SST*

(*Shear Stress Transport*) karena kemampuannya dalam memprediksi aliran yang menyentuh permukaan benda padat secara presisi. Parameter utama yang digunakan dalam pengaturan ini merujuk pada data operasional aktual, yaitu laju aliran (*debit*) dan kecepatan putar turbin.

Penerapan kondisi batas dilakukan dengan menetapkan saluran masuk (*inlet*) menggunakan nilai debit air sebesar $2,46 \text{ m}^3/\text{s}$. Mengingat parameter *input* pada *software* memerlukan satuan kecepatan, maka dilakukan konversi menggunakan rumus kontinuitas sebagai berikut:

$$v = Q / A \quad (1)$$

Dimana:

v : kecepatan aliran masuk (m/s)

Q : laju aliran volumetrik atau debit (m^3/s)

A : luas penampang saluran masuk (m^2)

Dari perhitungan tersebut, didapatkan nilai kecepatan *inlet* sebesar $2,50 \text{ m/s}$ yang kemudian diinput ke dalam pengaturan *Velocity Inlet*. Pada bagian rotor yang mencakup poros dan sudu turbin, diberikan perintah putaran konstan sebesar 250 rpm menggunakan metode *frame motion*.

Proses perhitungan dijalankan hingga mencapai tingkat ketelitian (residu) sebesar 10^{-4} . Setelah konvergensi tercapai, data torsi yang diperoleh divalidasi dengan membandingkan data torsi hasil simulasi terhadap data torsi hasil pengukuran guna menjamin keandalan data sebelum dianalisis lebih lanjut pada tahap hasil dan pembahasan. Magnitudo penyimpangan (*error*) dalam *valid asi* dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$\text{Error (\%)} = \left[\left(\frac{p - u}{p} \right) \times 100\% \right] \quad (2)$$

Dimana:

p : Nilai hasil simulasi

u : Nilai hasil perhitungan

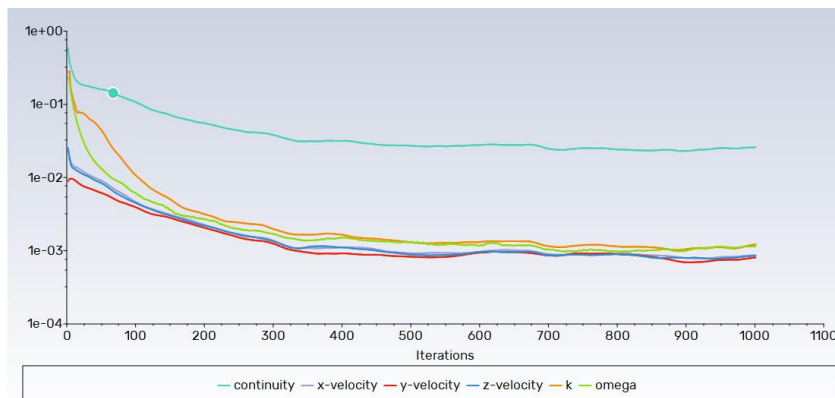
HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Analisis Konvergensi dan *Valid asi* Numerik

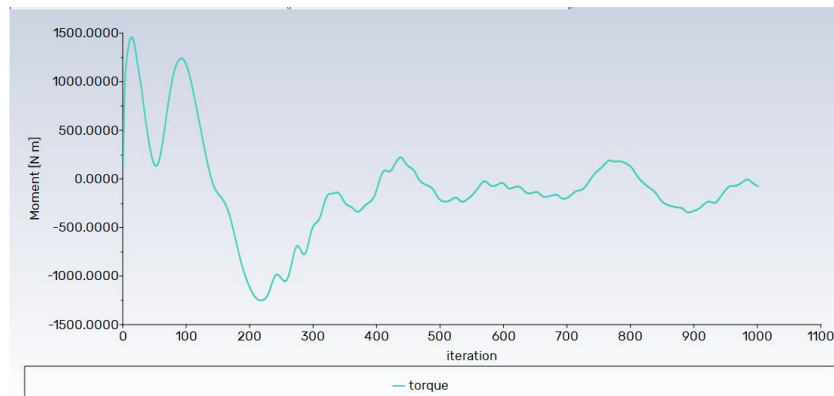
Keandalan hasil simulasi dievaluasi melalui kestabilan iterasi dan *valid asi* terhadap data desain operasional untuk memastikan model yang dibangun representatif.

Evaluasi Stabilitas Numerik melalui Grafik *Residual*

Verifikasi terhadap stabilitas numerik dilakukan untuk memastikan solusi telah mencapai kondisi konvergen. Berdasarkan Gambar 4, seluruh *variabel* utama yang meliputi persamaan kontinuitas, momentum (sumbu x, y, dan z), serta parameter turbulensi (*turbulent kinetic energy dan specific dissipation rate*) menunjukkan tren penurunan residu yang konsisten seiring bertambahnya iterasi.



Gambar 4. Grafik *Residual*



Gambar 5. Garfik *Torque Monitor*

Profil grafik yang melandai dan menetap di bawah target residu 10^{-4} mengindikasikan bahwa perhitungan telah mencapai titik saturasi dengan galat relatif minimum. Hal ini membuktikan bahwa skema diskritisasi spasial dan model turbulensi *k-omega SST (Shear Stress Transport)* yang diterapkan memiliki stabilitas tinggi dalam menangani fenomena hidrodinamika kompleks di sekitar sudu turbin Kaplan. Ketiadaan fluktuasi ekstrem pada grafik *Residual* memastikan bahwa data distribusi tekanan dan kecepatan yang diekstraksi selanjutnya merupakan hasil yang *valid* secara numerik dan representatif untuk dianalisis lebih lanjut.

Analisis Karakteristik Grafik Torsi (*Torque Monitor*)

Indikator konvergensi pada simulasi mesin rotasi ditentukan oleh stabilitas nilai torsi terhadap jumlah iterasi. Gambar 5 menunjukkan bahwa profil torsi memiliki fluktuasi periodik yang teratur pada fase akhir iterasi. Secara fisik, karakteristik ini merepresentasikan fenomena hidrodinamika akibat interaksi dinamis antara aliran fluida dengan profil sudu pada sudut serang (*angle of attack*) tertentu.

Meskipun simulasi menggunakan pendekatan *steady-state, solver* tetap menangkap osilasi tekanan lokal akibat interaksi fluida terhadap geometri sudu yang kompleks. Karena fluktuasi telah berulang secara periodik dalam rentang nilai stasioner, solusi dinyatakan mencapai kondisi *pseudo-steady* atau kestabilan statistik. Nilai torsi rata-rata yang dihasilkan adalah 5.739 Nm, yang digunakan sebagai basis perhitungan kekuatan mekanis poros turbin.

Analisis *Validasi* Numerik Terhadap Karakteristik Torsi

Prosedur *validasi* dilakukan dengan membandingkan nilai torsi hasil simulasi terhadap data operasional lapangan pada debit $2,46 \text{ m}^3/\text{s}$ dan kecepatan rotasi 250 rpm. Parameter kecepatan *inlet* sebesar $2,5 \text{ m/s}$ diterapkan sebagai kondisi batas (*boundary condition*) pada *software Ansys Fluent*. Hasil komparasi data *validasi* disajikan secara sistematis pada **Tabel 3**.

Tabel 3. *Validasi* Komparatif Nilai Torsi Pengukuran terhadap Hasil Simulasi CFD

Parameter Perbandingan	Hasil Pengukuran (Nm)	Hasil Simulasi (Nm)	Error (%)
Torsi Hidrodinamik	5985	5739	4,28

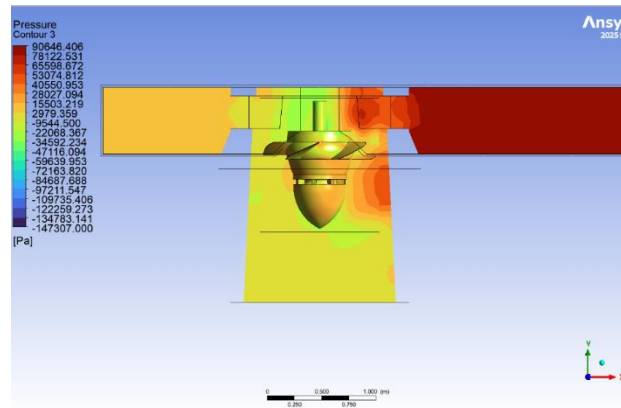
Berdasarkan Tabel 3, diperoleh nilai penyimpangan (*error*) sebesar 4,28%. Secara metodologis, hasil ini menunjukkan akurasi yang baik karena berada di bawah ambang batas toleransi 5% untuk *validasi* mesin fluida. Selisih tersebut dipicu oleh penerapan asumsi *smooth wall* (kekasaran nol) dan pengabaian *tip clearance* pada model numerik, sehingga nilai torsi simulasi sedikit berbeda dengan kondisi aktual akibat minimnya rugi-rugi gesek dinding.

Tren *validasi* ini menunjukkan konsistensi dengan penelitian [22], [23], mengenai efektivitas model turbulensi *k-omega SST (Shear Stress Transport)* dalam memprediksi aliran dekat dinding (*near-wall*). Selain itu, *margin error* yang didapat selaras dengan studi validasi pada referensi [18], yang mengonfirmasi bahwa konfigurasi numerik dan kerapatan *mesh* dalam penelitian ini telah *valid* serta representatif untuk analisis lebih lanjut.

B. Karakteristik Hidrodinamika Turbin

Analisis Distribusi Tekanan (*Pressure Contour*)

Distribusi tekanan statis pada sistem turbin Kaplan berdasarkan hasil simulasi disajikan pada Gambar 6. Teramati adanya gradien tekanan yang konsisten dari sisi saluran masuk (*inlet*) menuju saluran buang (*draft tube*). Nilai tekanan statis tertinggi mencapai 90.646,41 Pa pada area distributor dan *stay vanes*, yang merepresentasikan energi potensial *head* sebelum dikonversi. Sebaliknya, tekanan mengalami penurunan gradual hingga mencapai nilai negatif minimal -147.307,00 Pa pada area di bawah sudu *runner* dan bagian awal *draft tube*.



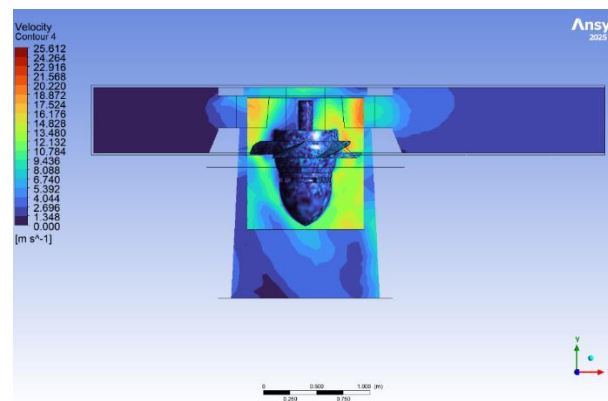
Gambar 6. Kontur Distribusi Tekanan Statis pada Turbin Kaplan

Perbedaan tekanan yang signifikan antara sisi tekan (*pressure side*) dan sisi isap (*suction side*) pada sudu menghasilkan gaya dorong normal yang membangkitkan torsi sebesar 5.739 Nm. Penurunan tekanan drastis pada celah antar sudu selaras dengan prinsip *Bernoulli*, di mana terjadi konversi energi tekanan menjadi energi kinetik lokal. Distribusi kontur tekanan yang menyebar secara halus (*smooth gradient*) mengindikasikan beban hidrodinamik yang merata, sehingga meminimalisir risiko pulsasi tekanan (*pressure pulsation*) dan kelelahan material (*fatigue*).

Karakteristik distribusi tekanan ini menunjukkan tren yang selaras dengan temuan pada [1], di mana gradien tekanan pada sudu Kaplan terkonsentrasi pada area hambatan utama untuk menghasilkan gaya angkat (*lift*) yang optimal. Selain itu, pola transisi tekanan dari *runner* menuju *draft tube* juga konsisten dengan analisis hidrodinamika yang dilaporkan pada [19]. Meskipun terdapat tekanan negatif yang cukup besar, profil kontur yang stabil menunjukkan risiko kavitasi masih berada dalam batas operasional yang aman.

Analisis Distribusi Kecepatan (*Velocity Contour*)

Karakteristik kinetik aliran fluida di dalam sistem turbin Kaplan dievaluasi melalui profil kecepatan lokal pada Gambar 7. Teramati fenomena akselerasi aliran saat fluida bergerak dari domain *inlet* menuju zona interaksi sudu *runner*. Secara kuantitatif, kecepatan maksimal mencapai 25,61 *m/s* yang terkonsentrasi pada celah sempit antara ujung sudu (*blade tip*) dengan dinding rumah turbin (*shroud*). Hal ini menunjukkan adanya konsentrasi momentum aliran pada radius terluar sistem turbin.



Gambar 7. Kontur Distribusi Kecepatan Aliran pada Turbin Kaplan

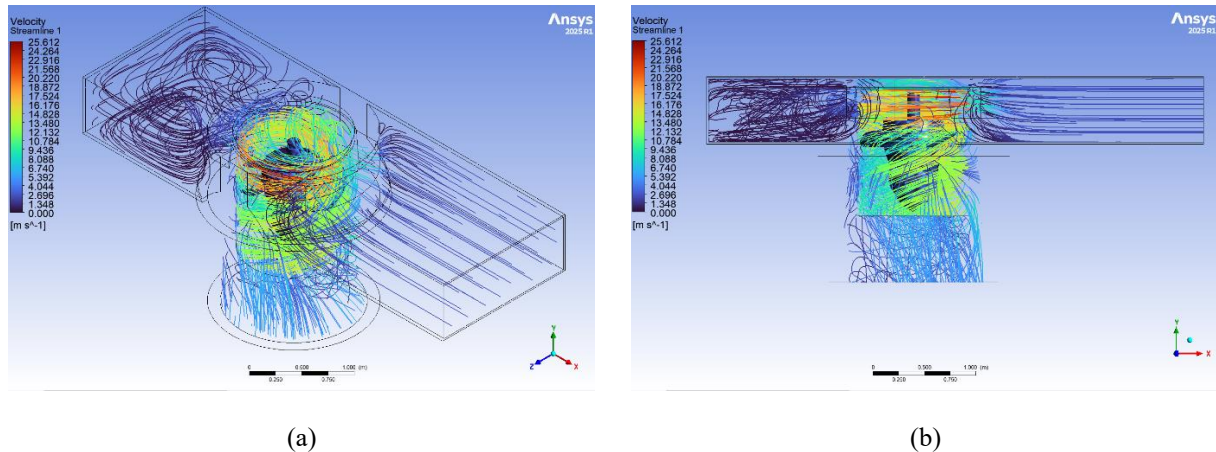
Eskalasi kecepatan dari rata-rata 2,5 *m/s* pada *inlet* menjadi 25,61 *m/s* dipicu oleh penyempitan luas penampang efektif pada zona kerja sudu. Berdasarkan hukum kontinuitas, reduksi luas area memaksa fluida berakselerasi untuk menjaga stabilitas debit massa tetap konstan pada 2,46 m^3/s . Peningkatan energi kinetik lokal ini dikonversi menjadi gaya impuls dan gaya angkat hidrodinamik saat fluida berinteraksi dengan permukaan sudu, menghasilkan *output* torsi sebesar 5.739 Nm.

Profil kecepatan tertinggi secara konsisten ditemukan pada radius luar *runner*. Fenomena ini memberikan keuntungan mekanis karena kecepatan tangensial sudu berada pada nilai tertinggi di radius luar, sehingga menghasilkan resultan segitiga kecepatan yang optimal untuk transfer momentum menuju poros. Karakteristik percepatan aliran ini selaras dengan tren yang dilaporkan pada [19], di mana distribusi kecepatan pada turbin Kaplan cenderung meningkat secara signifikan saat memasuki area *runner*. Selain itu, stabilitas pola aliran tanpa pemisahan aliran (*flow separation*) yang masif mengonfirmasi akurasi model turbulensi *k-omega SST* (*Shear Stress Transport*) dalam memprediksi profil lapisan batas dan efek tegangan geser dinding, sesuai dengan analisis pada [10].

Analisis Pola Aliran (*Velocity Streamline*)

Karakteristik pola aliran fluida pada turbin Kaplan disajikan melalui garis arus (*streamline*) pada Gambar 8. Visualisasi menunjukkan fluida memasuki saluran *inlet* dengan pola yang relatif teratur sebelum mengalami transisi arah secara aksial dan rotasional saat berinteraksi dengan sudu *runner*.

Visualisasi karakteristik pola aliran fluida yang melintasi *domain* turbin Kaplan disajikan secara komprehensif melalui garis arus (*streamline*) pada Gambar 8. Pengamatan mendalam terhadap lintasan partikel fluida ini dilakukan menggunakan dua perspektif visual yang berbeda, yakni pandangan 3D perspektif (Gambar 8a) untuk meninjau distribusi aliran secara global, serta pandangan 2D penampang samping (Gambar 8b) untuk menganalisis perilaku aliran secara longitudinal. Berdasarkan visualisasi tersebut, teramati bahwa fluida masuk melalui saluran *inlet* dengan pola yang relatif *laminar* dan teratur sebelum akhirnya mengalami perubahan arah aliran secara aksial dan rotasional yang sangat signifikan saat berinteraksi dengan area kerja *runner*.



Gambar 8. Visualisasi Garis Arus (*Streamline*) Aliran pada Turbin Kaplan (a) Pandangan 3D Perspektif dan (b) Pandangan 2D Penampang Samping

Teramati adanya pembentukan pola aliran *heliks* saat melewati sudu (Gambar 8a), yang merupakan indikator konversi momentum efektif menjadi gaya dorong tangensial pada rotor. Akselerasi aliran mencapai puncak 25,61 m/s pada zona interaksi utama tanpa menunjukkan adanya pemisahan aliran (*flow separation*) yang masif. Hal ini mengindikasikan bahwa geometri sudu memiliki performa aerodinamis yang baik pada kondisi operasional 250 rpm. Kondisi aliran yang *kontinu* ini selaras dengan profil aliran internal yang dilaporkan pada [13], dimana stabilitas streamline pada *runner* sangat menentukan efisiensi konversi energi.

Pada bagian saluran keluar (Gambar 8b), garis arus mengalami perlambatan terkendali saat memasuki *draft tube*. Proses ini krusial untuk mengubah energi kinetik sisa menjadi energi tekanan guna meningkatkan *head* efektif sistem. Meskipun terdapat fluktuasi turbulensi *minor* di belakang kerucut *hub*, pola aliran tetap terorganisir tanpa adanya aliran balik (*backflow*). Fenomena perlambatan aliran di area *draft tube* ini menunjukkan konsistensi dengan karakteristik aliran yang dianalisis pada [19] dan [21], yang menekankan pentingnya pemulihan tekanan (*pressure recovery*) untuk optimalisasi performa total turbin. Penggunaan model turbulensi *k-omega SST (Shear Stress Transport)* terbukti mampu memvisualisasikan perilaku sirkulasi fluida secara realistis, memastikan beban hidrodinamik pada rotor tetap stabil dan meminimalisir potensi vibrasi sistem.

KESIMPULAN

Penelitian ini menyimpulkan bahwa penerapan model turbulensi *k-omega SST (Shear Stress Transport)* pada simulasi turbin Kaplan Tarum Barat mampu merepresentasikan fenomena hidrodinamika secara akurat sesuai kondisi operasional aktual. Efektivitas model dalam menangkap profil aliran pada area near-wall menjadikannya instrumen *valid* yang reliabel untuk menganalisis distribusi beban fluida pada sistem turbin.

Secara teknis, profil distribusi tekanan dan kecepatan memberikan implikasi desain bahwa geometri sudu saat ini telah mencapai performa hidrodinamik yang stabil, namun beban torsi yang dihasilkan sebesar 5.739 Nm menjadi parameter kritis bagi integritas struktural poros. Sebagai kontribusi praktis, hasil studi ini menyediakan data beban hidrodinamik (*hydrodynamic loading*) yang presisi sebagai dasar analisis kekuatan material (*finite element analysis*) untuk mengidentifikasi penyebab kegagalan poros. Metodologi yang divalidasi ini menjadi landasan penting bagi evaluasi desain sistem transmisi daya guna mencegah terjadinya kelelahan material (*fatigue*) dan kegagalan katastrofik pada unit turbin di masa mendatang.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada Perum Jasa Tirta II atas dukungannya dalam penyediaan data teknis operasional dan spesifikasi turbin yang menjadi basis data utama dalam penelitian ini. Penulis juga mengapresiasi seluruh pihak yang telah memberikan bantuan teknis serta literatur pendukung sehingga studi numerik ini dapat diselesaikan dengan baik sesuai dengan kaidah ilmiah.

REFERENSI

- [1] C. Abeykoon, "Modelling and optimisation of a Kaplan turbine — A comprehensive theoretical and CFD study," *Clean. Energy Syst.*, vol. 3, no. July, p. 100017, 2022, doi: 10.1016/j.cles.2022.100017.
- [2] I. N. Sudiatmika, I. W. A. Wijaya, and I. M. Suartika, "Pengaruh Variasi Sudut Buka Guide Vane Terhadap Kinerja Prototype PLTMH Dengan Turbin," vol. 8, no. 2, pp. 110–118, 2021.
- [3] A. Anam, I. T. Rahardjo, and M. Asroni, "Terhadap Kinerja Turbin Kinetik Bersudu Mangkok Dengan Sudut Input 10 o," pp. 324–329, 2019.
- [4] M. Saidiman, R. Krisnha, and T. Supriyono, "Design of a 100 KW Kaplan Turbin : A Case Study on a Small-Scale Hydropower System Rancangan Turbin Kaplan 100 kW : Studi kasus pada sistem PLTA skala kecil," vol. 7, no. 01, pp. 23–39, 2025.
- [5] A. Rajab and S. Habiba, "Karakteristik Daya Turbin Kaplan dengan Variasi Jumlah Sudu Turbin," vol. 4, pp. 9137–9149, 2024.
- [6] A. K. Sosilo, H. Hadi, and T. Soehartanto, "Design of Hydro Power by Using Turbines Kaplan on The Discharge Channel Paiton 1 and 2," vol. 01008, pp. 4–8, 2018.
- [7] T. O. Sihombing and O. C. Pattipawaej, "Pemanfaatan Turbin Kaplan dengan Variasi Debit Air Sungai Ciparay di Kampung Stamplat Girang Desa Indragiri ABSTRACT . Utilization of Kaplan Turbine with Variation of Water Discharge of Ciparay," vol. 20, pp. 241–254, 2024, doi: 10.28932/jts.v20i2.7282.
- [8] A. P. Maulana, F. Arifin, R. E. Engineering, P. N. Sriwijaya, P. N. Sriwijaya, and P. N. Sriwijaya, "Jurnal Polimesin," pp. 311–317, 2023.
- [9] S. V. R., "Comparative Study of Kaplan Turbine Blades for Making More Rotations," vol. 9, no. 4, pp. 882–885, 2025.
- [10] Z. Lai *et al.*, "Study on the Internal Flow Field in the Tip Clearance of a Kaplan Turbine," pp. 1–18, 2025.
- [11] C. Liu *et al.*, "Study on Pressure Pulsation and Force Characteristics of Kaplan Turbine," pp. 1–19, 2023.
- [12] R. Roig, O. D. La Torre, E. Jou, B. Mulu, and X. Escaler, "Experimental and numerical modal analysis of a reduced scale Kaplan turbine model," 2021.
- [13] D. Yan *et al.*, "Inner Flow Analysis of Kaplan Turbine under Off-Cam Conditions," 2024.
- [14] R. Gabriela, A. S. Dehkharghani, D. M. Bucur, and M. J. Cervantes, "Numerical Simulation and Experimental *Valid* ation of a Kaplan Prototype Turbine Operating on a Cam Curve," pp. 1–24, 2022.
- [15] L. Pramesti, R. Dimas, E. Witjonarko, and B. B. Aji, "G-Tech : Jurnal Teknologi Terapan," vol. 6, no. 2, pp. 249–256, 2022.
- [16] P. Romero-gomez, "*Valid* ation of Computational Fluid Dynamics Simulations for the Biological Performance Assessment of Hydropower Generation Units," 2021.
- [17] R. G. Iov, G. Dunca, D. M. Bucur, and M. J. Cervantes, "Numerical Simulation of the Flow in a Kaplan Turbine Model during Transient Operation from the Best Efficiency Point to Part Load †," 2020.
- [18] E. Science, "Kaplan turbine working as a propeller : CFD investigation and experimental *valid* ation of generated power fluctuation Kaplan turbine working as a propeller : CFD investigation and experimental *valid* ation of generated power fluctuation," 2019, doi: 10.1088/1755-1315/240/2/022049.
- [19] Q. Yan *et al.*, "Computational Fluid Dynamics Analysis of *Draft tube* Flow Characteristics in a Kaplan Turbine," pp. 1–24, 2025.
- [20] P. A. Julián, J. D. Pérez, F. Santiago, J. Andrés, and S. Del, "Indonesian Journal of Science & Technology Parametric Rotor Innovation for Gravitational Vortex Turbines : Advancing Clean Energy through Integrated Computational Fluid Dynamics (CFD) Simulation and Experimentation to Support the Sustainable Development Goals (SDGs)," vol. 11, pp. 391–410, 2026.
- [21] P. Turbine, "Optimization of Elbow Draft Tubes for Variable Speed," 2024.
- [22] N. N. Suryaman, "Kaji Numerik dan Eksperimental Proses Pemanas Ruangan untuk Pertumbuhan Anak Ayam".
- [23] R. Mudzakir and H. Widianoro, "Jurnal Rekayasa Mesin Simulasi CFD Turbin Francis Skala Laboratorium Sebagai Alat Bantu Praktikum Menggunakan Software Solidwork Rizal dkk / Jurnal Rekayasa Mesin," vol. 19, no. 2, pp. 223–232, 2024.