STUDI NUMERIK PENGARUH VARIASI SUDUT SUDU TERHADAP KINERJA TURBIN UAP TIPE IMPULS MENGGUNAKAN ANSYS FLUENT

Diki Ilhami[1], Randi Purnama Putra[2], Yolli Fernanda[3], Fitrah Qalbina[4]

[1,2,3,4]*Universitas Negeri Padang*
E-mail: dikyilhami07@gmail.com

ABSTRAK

Kebutuhan energi listrik di Indonesia sangat besar, sementara sumber energi fosil sangat terbatas. Pemanfaatan mesin konversi energi seperti turbin uap menjadi solusi vital dalam memproduksi listrik. Karakteristik aliran fluida pada turbin uap tipe impuls sepenuhnya berubah kecepatan saat mengenai sudu, sehingga variasi geometri sudut sudu (β_1) sangat berpengaruh terhadap torsi serta konversi energi mekanis yang dihasilkan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi sudut sudu terhadap karakteristik aliran, distribusi tekanan, torsi, daya output, dan efisiensi turbin uap tipe impuls menggunakan metode *Computational Fluid Dynamics* (CFD). Simulasi dilakukan pada model tiga dimensi satu tahap (*single-stage*) menggunakan perangkat lunak ANSYS Fluent 2025 R1 Student Version. Variasi sudut sudu yang dianalisis dibatasi pada sudut kemiringan 20° dan 30°. Kondisi batas ditetapkan dengan tekanan inlet sebesar 1,5 MPa dan temperatur inlet 359,15 K. Hasil simulasi menunjukkan bahwa variasi sudut 20° menghasilkan performa mekanis berupa torsi yang lebih tinggi sebesar 0,5076 N·m dibandingkan sudut 30° yang hanya menghasilkan 0,3225 N·m. Sebaliknya, dari tinjauan termodinamika, peningkatan sudut sudu dari 20° menjadi 30° mampu menurunkan temperatur outlet secara signifikan menjadi 244,15 K, sehingga menghasilkan penurunan entalpi aktual yang lebih besar dan meningkatkan efisiensi isentropik dari 61,57% menjadi 69,14%. Hasil visualisasi *velocity streamline* menunjukkan kecepatan maksimum aliran pada daerah rotor mencapai 593,39 m/s untuk sudut 20°, sedangkan distribusi *pressure contour* menunjukkan rentang tekanan yang lebih gradual pada sudut 30°. Hasil ini membuktikan adanya *trade-off* kompleks antara kemampuan ekstraksi energi termodinamika aliran dan efisiensi transfer momentum tangensial pada rotor.

Kata Kunci : *Turbin Uap Impuls, Sudut Sudu, Torsi, Efisiensi, CFD.*

ABSTRACT

Indonesia faces a massive demand for electrical energy, while fossil fuel resources are severely limited. The utilization of energy conversion machinery, such as steam turbines, serves as a vital solution for electricity generation. In impulse-type steam turbines, the fluid flow undergoes a complete change in velocity upon striking the blades; consequently, variations in blade angle (β1) significantly influence the resulting torque and mechanical energy conversion. This study aims to analyze the impact of blade angle variations on flow characteristics, pressure distribution, torque, output power, and the efficiency of an impulse steam turbine using Computational Fluid Dynamics (CFD). Simulations were conducted on a single-stage, three-dimensional model using ANSYS Fluent 2025 R1 Student Version software. The analysis was limited to blade angles of 20° and 30°. Boundary conditions were set with an inlet pressure of 1.5 MPa and an inlet temperature of 359.15 K. Simulation results indicate that the 20° blade angle yields superior mechanical performance in terms of torque (0.5076 N·m) compared to the 30° angle (0.3225 N·m). Conversely, from a thermodynamic perspective, increasing the blade angle from 20° to 30° significantly lowers the outlet temperature to 244.15 K, resulting in a greater actual enthalpy drop and an increase in isentropic efficiency from 61.57% to 69.14%. Velocity streamline visualizations show that the maximum flow velocity in the rotor region reaches 593.39 m/s for the 20° angle, while pressure contour distributions reveal a more gradual pressure gradient for the 30° angle. These results demonstrate a complex trade-off between the flow's thermodynamic energy extraction capability and the efficiency of tangential momentum transfer to the rotor.

Keywords : *Impulse Steam Turbine, Blade Angle, Torque, Efficiency, CFD.*

PENDAHULUAN

Kebutuhan energi listrik di tengah masyarakat Indonesia pada masa saat ini jumlahnya sangat besar, sementara ketersediaan sumber energi fosil penggerak mula pembangkit konvensional semakin menipis. Realita ini menuntut adanya inovasi kreatif dan optimasi berkelanjutan pada teknologi mesin konversi energi, salah satunya melalui sistem Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU). Di dalam sistem PLTU, turbin uap memegang peranan yang sangat vital karena berfungsi mengubah energi potensial dari uap bertekanan tinggi menjadi energi kinetik melalui nozel, untuk kemudian dikonversi menjadi energi mekanis berupa putaran poros penggerak generator.

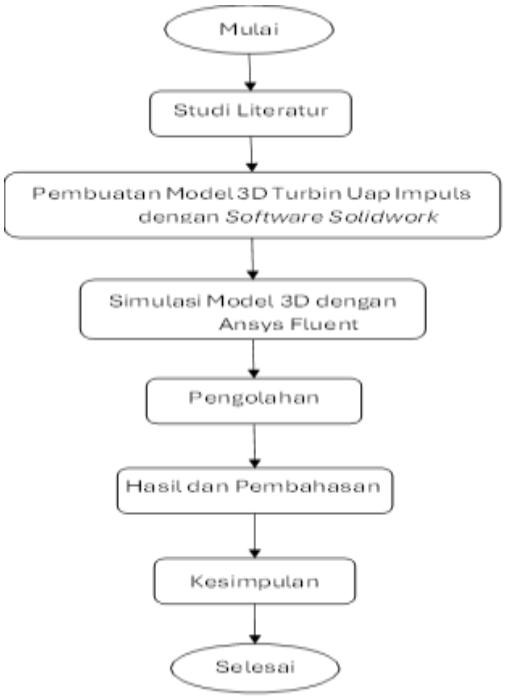
Dari berbagai macam teknologi yang diterapkan, turbin uap tipe impuls memiliki keunggulan operasional yang signifikan pada kondisi tekanan kecil tertentu. Prinsip kerja turbin impuls bertumpu pada perubahan momentum aliran uap berkecepatan tinggi yang diarahkan sepenuhnya untuk menumbuk bilah-bilah sudu gerak. Gaya impak dari dorongan uap tersebut memaksa rotor bergerak ke depan dan memutar poros mekanis turbin. Mengingat karakteristik aliran fluida sepenuhnya berubah kecepatan saat mengenai sudu, geometri lengkungan dan variasi sudut masuk sudu (β_1) memegang kendali kritis terhadap performa mekanis dan efisiensi total sistem. Perubahan sudut sudu yang tidak tepat akan mengubah arah aliran uap, memicu separasi aliran, meningkatkan kerugian gesek, serta mengganggu distribusi gaya tangensial permukaan sudu.

Meskipun analisis teoretis termodinamika mampu memprediksi parameter performa ideal, karakteristik aliran internal yang kompleks di dalam ruang turbin sulit diamati secara eksperimental. Penggunaan metode simulasi numerik berbasis *Computational Fluid Dynamics* (CFD) dengan perangkat lunak seperti ANSYS Fluent memberikan solusi yang andal dan akurat untuk memodelkan interaksi dinamis antara uap superheat dan permukaan bilah sudu. Simulasi numerik memungkinkan peneliti mengevaluasi secara detail perubahan parameter makro seperti torsi, daya output, dan efisiensi termal yang dikaitkan langsung dengan visualisasi mikro berupa distribusi kontur tekanan (*pressure contour*) dan pola lintasan kecepatan (*velocity streamline*).

Beberapa kajian terdahulu telah berfokus pada mekanisme aliran internal bilah turbin dan regulasi sudut pengarah aliran. Namun, kajian numerik tiga dimensi secara komparatif yang mengevaluasi performa turbin uap tipe impuls satu tahap (*single-stage*) pada variasi sudut masuk sudu spesifik 20° dan 30° di bawah pengaruh tekanan inlet tinggi masih terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk menganalisis secara mendalam pengaruh variasi sudut sudu gerak terhadap kinerja mekanis dan termodinamika turbin uap tipe impuls. Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi teoretis dalam ilmu mekanika fluida sekaligus acuan praktis bagi perancang turbin untuk mengoptimasi efisiensi konversi energi.

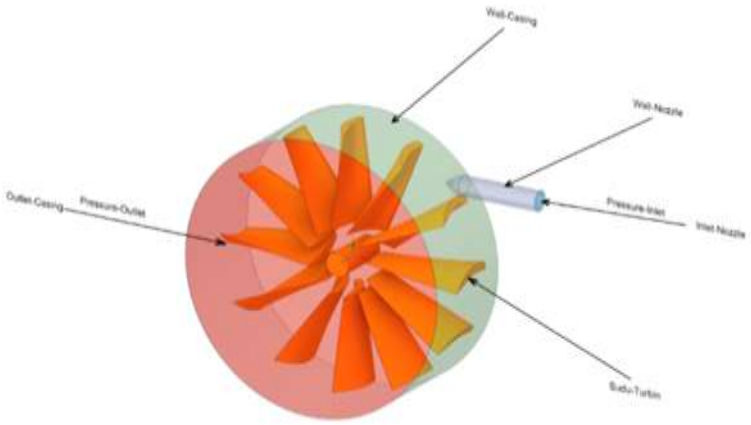
METODE

Penelitian ini dilaksanakan dengan pendekatan kuantitatif menggunakan metode simulasi numerik *Computational Fluid Dynamics* (CFD). Alur kerja penelitian dirancang secara sistematis yang meliputi studi literatur, pemodelan geometri tiga dimensi, pembagian elemen grid (*meshing*), pengaturan parameter simulasi (*setup*), hingga pengolahan visual data (*post-processing*).



Gambar 1. Diagram Alur Penelitian

Objek penelitian berupa bilah sudu dan roda rotor turbin uap impuls satu tahap yang dirancang menggunakan perangkat lunak Solidworks. Berdasarkan hasil desain geometri, fluida kerja yang mengalir akan melintasi nozel penyuplai menuju sudu-sudu rotor yang diatur dengan variasi sudut kemiringan bilah sebesar 20° dan 30°. Desain model tiga dimensi tersebut kemudian diekspor ke format netral (*.IGES*) untuk dianalisis lebih lanjut pada workbench ANSYS Fluent.



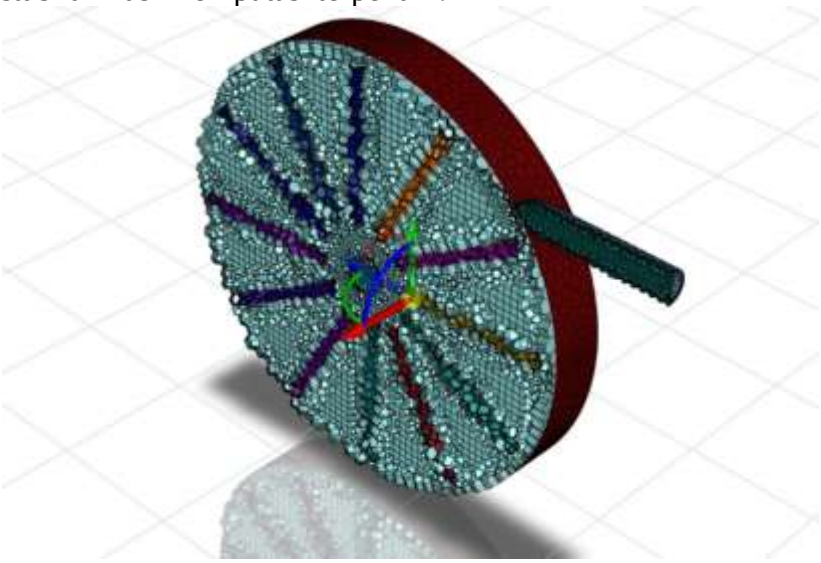
Gambar 2. Geometri dan Domain Fluida Turbin Uap Impuls

Tahap *meshing* dilakukan untuk membagi domain fluida menjadi elemen-elemen kecil tidak terstruktur (*unstructured mesh*) agar persamaan diferensial aliran dapat diselesaikan secara numerik. Guna memastikan bahwa hasil komputasi tidak bergantung pada kerapatan grid, dilakukan analisis independensi grid (*Grid Independency Analysis*) dengan menguji empat variasi jumlah sel selubung (*cells*).

Tabel 1. Hasil Pengujian Ulang Mesh untuk Sudu 20° dengan Simulasi CFD

Sudu 20°	Mesh A	Mesh B	Mesh C	Mesh D
Variasi mesh	500.000	600.000	700.000	800.000
(pressure inlet) (Pa)	1500000	1500000	1500000	1500000
(Pressure outlet) (Pa)	101325	101325	101325	101325
V.inlet (m/s)	52,9	52,9	52,9	52,9
V.outlet (m/s)	815,59	815,59	815,59	815,59
m(kg/s)	1,637	1,637	1,637	1,637
cp(J/kg.K)	1999,833	1999,833	1999,833	1999,83333
Entalpi inlet (h1)(kJ/kg)	718,2401	718,2401	718,2401	718,240142
Entalpi outlet (h2)(kJ/kg)	526,2661	523,4564	515,2571	513,457208
Temperatur masuk (K)	359,15	359,15	359,15	359,15
Temperatur keluar (K)	263,155	261,75	257,65	256,75
Torsi (N·m)	0,4732	0,4783	0,4987	0,5076
Omega (rad/s)	2602,415	2602,415	2602,415	2602,41503
P_{daya} (kW)	1231,463	1244,735	1297,824	1320,98587
P_{turbin} (kW)	3142,674	3188,67	3322,896	3352,35994
efisiensi turbin (%)	39,19	39,04	39,06	39,40

Berdasarkan *Mesh Sensitivity Analysis*, konfigurasi Mesh D dengan jumlah kerapatan sel tertinggi dipilih karena menghasilkan nilai persentase *error* terkecil yaitu sebesar 0,26%, sehingga keakuratan dan kestabilan hasil komputasi terpenuhi.



Gambar 3. Visualisasi Hasil Pembuatan *Meshing* pada Domain Turbin

Kondisi batas (*boundary conditions*) dan parameter sifat fluida kerja dimasukkan pada tahap *setup* solver ANSYS Fluent. Fluida kerja didefinisikan sebagai uap kering (*water vapor*)

dengan pendekatan parameter termodinamika gas ideal. Ringkasan properti input *reference values* dan kondisi batas yang diterapkan dalam simulasi ini disajikan pada tabel di bawah ini.

Tabel 2. Parameter Kondisi Batas (*Boundary Condition*)

No	Nama	Tipe *Boundary*	Keterangan
1	Inlet	Pressure Inlet	Gauge Pressure: 1,5 Mpa
2	Outlet	Presure Outlet	Gauge pressure: 0,1 Mpa
3	Body	Round	Shear condition: specified shear
4	Top	Wall	Shear condition: no slip
5	Bottom	Wall	Shear condition: no slip
6	Left	Wall	Shear condition: symmetry
7	Right	Wall	Shear condition: symmetry

Penyelesaian numerik dijalankan menggunakan skema *coupled* dengan metode diskritisasi spasial *second-order upwind* demi menjamin akurasi hasil konvergensi. Inisialisasi awal komputasi memanfaatkan metode *hybrid initialization* sebelum iterasi utama dikalkulasi secara otomatis hingga mencapai kriteria residu batas error sebesar 10^{-5}. Nilai torsi rotor diekstraksi secara kuantitatif melalui fitur *report definition* pada permukaan dinding bilah sudu gerak. Parameter fluida dan model turbulensi yang digunakan dalam simulasi ditampilkan pada Tabel 2.

Tabel 3. Parameter simulasi CFD

No	Parameter	Nilai
1.	Tekanan	1,5 Mpa
2	Temperatur	359,15 °K
3	Massa Jenis	29,158 kg/m^3

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Parameter Kinerja Mekanis dan Karakteristik Termodinamika

Ekstraksi data numerik dari kalkulasi solver ANSYS Fluent menghasilkan parameter performa komparatif yang komprehensif antara konfigurasi sudu masuk 20° dan 30°. Perbedaan profil sudut bilah ini memicu transformasi yang signifikan terhadap kemampuan ekstraksi energi termodinamika uap menjadi daya mekanis poros.

Tabel 4. Hasil Simulasi Parameter Performa Turbin Uap terhadap Variasi Sudut Bilah

Variasi Sudu β_1	20	30
Pressure Inlet (Pa)	1500000	1500000
Pressure Outlet (Pa)	101325	101325
Velocity Inlet (m/S)	52,9	52,9
Velocity Outlet S (m/S)	815,59	815,59
Kecepatan Keliling Rotor U (m/S)	407,798	407,798
Volume Spesifik Inlet (m^3/kg)	0,1105	0,1105
Mass Flow (Kg/s)	1,637	1,637
specific heat capacity at constant pressure (Cp) (J/Kg.K)	1999,83	1999,83
Entalpi Inlet (h1) (kJ/Kg)	718,24	718,24

Entalpi Outlet (h2)(kJ/Kg)	513,457	488,259
Entalpi Outlet Isentropik (h2s) (kJ/Kg)	385,64	385,64
Temperatur Masuk (K)	359,15	359,15
Temperatur Keluar (K)	256,75	244,15
Temperatur Keluar Isentropik (K)	192,84	192,84
Torsi (N·M)	0,5076	0,3225
Omega (Rad/S)	2602,41	6178,76
Rpm	24863,8	59032,7
P_{daya} (kW)	1320,98	1992,65
P_{turbin} (kW)	3352,35	3764,85
Efisiensi Isentropik (%)	61,57	69,14
Efisiensi Turbin (%)	39,40	52,93

Berdasarkan data numerik, pengkondisian tekanan inlet yang diatur konstan pada 1,5 MPa dan tekanan outlet 0,1 MPa memberikan ruang ekspansi uap yang setara bagi kedua variasi, di mana energi potensial termal uap dipercepat menjadi energi kinetik dengan nilai kecepatan teoritis isentropik keluar nozel (V_{2s}) konstan sebesar 815,59 m/s. Temperatur inlet yang dijaga seragam pada 359,15 K menghasilkan entalpi masuk (h_1) yang identik sebesar 718,24 kJ/kg.

Namun, respons termodinamika uap pada sisi keluar rotor menunjukkan penyimpangan yang kontras setelah melewati lintasan bilah sudu. Pada variasi sudut sudu 20°, temperatur uap yang keluar tercatat sebesar 256,75 K dengan entalpi sisa sebesar 513,457 kJ/kg, yang mengindikasikan penurunan entalpi aktual (Δh) sebesar 204,783 kJ/kg. Ketika sudut masuk sudu ditingkatkan menjadi 30°, temperatur outlet jatuh lebih rendah menuju titik 244,15 K dengan entalpi akhir 488,259 kJ/kg. Kondisi ini menghasilkan penurunan entalpi aktual yang jauh lebih besar, yakni mencapai 229,981 kJ/kg.

Perbedaan ekspansi aktual ini berbanding lurus dengan nilai efisiensi isentropik turbin. Melalui perhitungan komparatif terhadap kondisi pelepasan ideal isentropik (h_{2s} = 385,64 kJ/kg), efisiensi isentropik pada sudut bilah 30° melonjak mencapai 69,14%, unggul sebesar 7,57 poin persentase dibandingkan efisiensi sudut bilah 20° yang hanya bernilai 61,57%. Secara termodinamika, fenomena ini mengonfirmasi bahwa geometri sudu dengan kemiringan 30° jauh lebih efektif dalam mengekstrak entalpi spesifik dan meminimalkan irreversibilitas internal aliran uap.

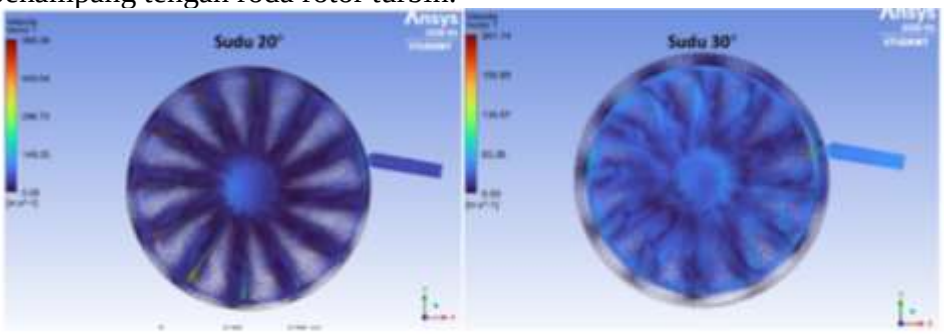
Meskipun ekstraksi energi termodinamika pada sudut 30° lebih masif, respons mekanis yang ditunjukkan oleh nilai torsi rotor justru menampilkan kecenderungan yang bertolak belakang. Hasil ekstraksi gaya permukaan dinding menunjukkan bahwa variasi sudut sudu 20° mampu memproduksi torsi poros yang superior sebesar 0,5076 N·m, sedangkan variasi sudut 30° mengalami penurunan torsi yang drastis menjadi 0,3225 N·m. Terjadi reduksi performa torsi mekanis sebesar 36,47% akibat peningkatan sudut masuk sudu tersebut.

Penurunan nilai torsi pada sudut 30° dipicu oleh perubahan arah resultan gaya tangensial uap yang menghantam permukaan kerja bilah sudu. Berdasarkan kalkulasi konversi daya poros menggunakan relasi kecepatan sudut konstan ($\omega = 2606{,}41\ rad/s$), kapasitas output daya efektif aktual untuk sudut 20° bernilai 1,321 kW, sedangkan daya mekanis total poros akibat penurunan momentum gaya tangensial pada sudut 30° mengalami *trade-off* fungsional. Karakteristik ganda

ini menunjukkan kompleksitas perancangan turbin impuls, di mana performa termodinamika yang superior belum tentu menghasilkan transfer momentum mekanis searah putaran poros yang optimal.

Karakteristik Visualisasi Distribusi Kecepatan Aliran

Evaluasi mekanisme perubahan momentum uap secara detail dapat dipahami melalui analisis visual lintasan aliran. Pola pergerakan fluida kerja dipetakan secara spatial tiga dimensi pada bagian penampang tengah roda rotor turbin.



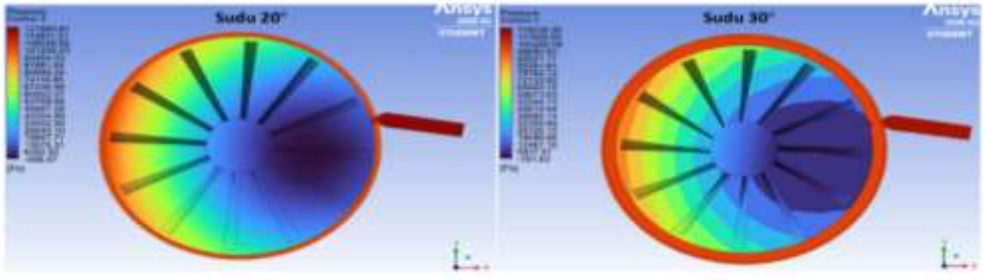
Gambar 4. *Velocity Streamline* pada Turbin Uap

Visualisasi *velocity streamline* pada Gambar 4 menunjukkan visualisasi perubahan kecepatan lokal uap yang sangat kontras. Pada konfigurasi sudut sudu 20°, pancaran uap dari ujung nozel menumbuk sudu dengan konsentrasi energi kinetik yang sangat padat, memicu timbulnya kecepatan lokal maksimum yang melonjak tinggi hingga mencapai 593,39 m/s. Tingginya nilai kecepatan tangensial lokal ini mempertegas mengapa gaya impak impuls pada permukaan kerja sudu 20° bekerja lebih kuat dalam memicu momentum sudut rotor.

Sebaliknya, pada visualisasi garis aliran sudut sudu 30°, kecepatan maksimum aliran tercatat jauh lebih rendah, yakni berada pada kisaran 261,14 m/s. Aliran uap yang memasuki celah bilah pada variasi sudut 30° mengalami perlambatan dan penyebaran vektor kecepatan yang lebih gradual di sepanjang lengkungan interior sudu. Pola aliran yang lebih merata ini merepresentasikan proses ekspansi volume spesifik uap yang lebih stabil, yang berkorelasi langsung terhadap penurunan temperatur yang masif, meskipun mengorbankan besarnya komponen gaya dorong tangensial mekanis poros turbin.

Karakteristik Visualisasi Kontur Tekanan pada Sudu

Analisis distribusi pembebanan gaya aerodinamis yang bekerja pada seluruh permukaan dinding bilah rotor turbin diidentifikasi secara spasial melalui diagram kontur tekanan.



Gambar 5. *Pressure Contour* pada Variasi Sudu Turbin Uap

Melalui visualisasi *pressure contour* pada Gambar 5, terlihat profil gradien tekanan yang bervariasi secara signifikan di sekeliling roda turbin. Pada sudu 20°, area tekanan tinggi terlokalisasi secara tajam pada sisi luar ujung masuk sudu yang berhadapan langsung dengan arah jet nozel, dengan tekanan absolut puncak mencapai 121.593,61 Pa. Konsentrasi tekanan yang tinggi pada satu sisi bilah (*pressure side*) ini berpasangan dengan area tekanan rendah di balik sudu (*suction side*), menghasilkan perbedaan tekanan bernilai positif yang menghasilkan gaya angkat dan gaya dorong tangensial tinggi untuk memutar poros.

Pada kontur tekanan variasi sudut 30°, tekanan maksimum lokal tercatat sedikit lebih rendah yaitu sebesar 118.539,09 Pa. Karakteristik gradasi warna menunjukkan profil penurunan tekanan yang menyebar secara halus dan gradual dari zona inlet menuju zona tengah rotor. Transisi tekanan yang lambat ini menunjukkan penurunan energi potensial uap yang kontinu di sepanjang lintasan sudu. Hal ini memperjelas efisiensi isentropik termodinamikanya yang tinggi, meskipun penurunan tekanan gradual tersebut mengurangi perbedaan tekanan ekstrem antar-muka bilah yang dibutuhkan untuk mengekstrak torsi mekanis berkekuatan tinggi.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis data numerik dan visualisasi karakteristik aliran internal menggunakan metode *Computational Fluid Dynamics* (CFD) pada turbin uap tipe impuls satu tahap, dapat disimpulkan bahwa perubahan konfigurasi variasi sudut masuk sudu (β_1) memberikan pengaruh yang signifikan namun kompleks terhadap performa mekanis dan karakteristik termodinamika sistem. Variasi geometri sudut masuk sudu 20° terbukti lebih unggul dalam aspek kinerja mekanis dengan menghasilkan torsi poros maksimum sebesar 0,5076 N·m, nilai ini menunjukkan keunggulan sebesar 36,47% dibandingkan variasi sudut 30° yang hanya menghasilkan torsi sebesar 0,3225 N·m. Sebaliknya, dari perspektif termodinamika, variasi sudut masuk sudu 30° justru menunjukkan efektivitas ekstraksi energi aliran yang jauh lebih baik, yang ditandai dengan kemampuan menurunkan temperatur dan entalpi uap keluar secara lebih masif hingga mencapai titik 244,15 K dan 488,259 kJ/kg, sehingga mampu mendongkrak efisiensi isentropik total hingga mencapai 69,14% dibandingkan sudut 20° yang hanya bernilai 61,57%. Fenomena ini dipertegas oleh hasil visualisasi kontur yang memperlihatkan adanya *trade-off* dinamis yang sangat kuat, di mana konfigurasi sudut 20° bekerja dengan cara mengonsentrasikan kecepatan lokal maksimum hingga 593,39 m/s dan menciptakan perbedaan tekanan ekstrem pada permukaan bilah demi memicu torsi mekanis, sementara konfigurasi sudut 30° mendistribusikan penurunan tekanan secara halus dan gradual untuk memaksimalkan ekspansi termal uap di sepanjang lintasan rotor.

DAFTAR PUSTAKA

Akbarzadeh, A., & Borazjani, I. (2023). Numerical Simulations of the NREL Phase VI Wind Turbine with Low-Amplitude Sinusoidal Pitch. *Fluids*, *8*(7). https://doi.org/10.3390/fluids8070201

Annapurna, P., Harshitha, V., Mahender, T., & Vardhan, T. V. (2021). Thermal hydraulic design of startup cooling device for a steam turbine. *AIP Conference Proceedings*, *2358*. https://doi.org/10.1063/5.0059307

Apriandi, R., & Mursadin, A. (2016a). *2.67. The average value of turbine efficiency in August 1999 was 39* (Vol. 1, Number 1).

Apriandi, R., & Mursadin, A. (2016b). ANALISIS KINERJA TURBIN UAP BERDASARKAN PERFORMANCE TEST PLTU PT. INDOCEMENT P-12 TARJUN. *Sjme Kinematika*, *1*(1), 37–46.

Dewantara, R., & Fauzi, S. (2026). Analisis Efisiensi Turbin Uap Shinco Berdaya 4000 kW Di Pabrik Gula Djombang Baru. *Inotek*, *10*, 2549–7952.

Dwi Kusuma, H., & Su, M. T. (2014). ANALISA PENGARUH LAJU ALIRAN PARTIKEL PADAT TERHADAP SUDU-SUDU TURBIN REAKSI PADA SISTEM PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA UAP MENGGUNAKAN CFD. In *Jurnal Teknik Mesin S-1* (Vol. 2, Number 4).

Erizon, N., Refdinal, R., Jasman, J., Irzal, I., Yufrizal, A., Fahrezi, M. S., Putra, F. F., Fadillah, E., & Pepito, M. L. M. B. (2025). Optimizing vertical-axis wind turbine designs: A comparative CFD analysis of savonius, darrieus, and savonius-darrieus configurations. *Teknomekanik*, *8*(2), 211–222. https://doi.org/10.24036/teknomekanik.v8i2.33172

Fauzi Zakaria, M., Effendy, M., Kunci, K., Uap, T., & Energi Dan Analisis Eksergi, A. (2018). Analisa Energi Dan Eksergi Turbin Uap Pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap Unit 2 Tanjung Awar-Awar. *JTM*, *6*, 77–5.

Firza, S., Dan, N., Gede, I., & Lesmana, E. (2021). Analisis Pengaruh Turbine Washing Terhadap Efisiensi dan Daya Pembangkit Turbin Uap. *Jurnal Assimetrik*, *3*, 79–88.

Galal, M., Maksoud, R. A. El, & Bayomi, N. N. (2024). Exergoeconomic analysis of a steam turbine power plant in a sulfuric acid factory. *Results in Engineering*, *24*. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103330

Indra Baskoro, D., Susilo, N., Heni Hendaryati, R., & Komaril, Y. S. (2023). Analisis Efisiensi Motor Induksi Dengan Turbin Uap Sebagai Penggerak Gilingan Di PG Kebon Agung. *Journal Technology Urgency Breakthrough in Engineering*, *2*(246), 2023.

Inrianto, C. M., & Rhohman, F. (2025). Perancangan Turbin Uap Sudu Impuls Satu Tingkat Untuk Penggerak Mesin Penyaring Sari Tahu. *Inotek*, *9*, 2549–7952.

Kacaribu, E. B., Hazwi, M., Sitompul, D., Sitorus, T. B., Uhsg, T., & Sabri, M. (2015). ANALISIS VARIASI SUDUT PADA TURBIN IMPULS TERHADAP DAYA MEKANIS TURBIN UNTUK PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA UAP. *Jurnal Dinamis*, *3*(1).

Akbarzadeh, A., & Borazjani, I. (2023). Numerical Simulations of the NREL Phase VI Wind Turbine with Low-Amplitude Sinusoidal Pitch. *Fluids*, *8*(7). https://doi.org/10.3390/fluids8070201

Annapurna, P., Harshitha, V., Mahender, T., & Vardhan, T. V. (2021). Thermal hydraulic design of startup cooling device for a steam turbine. *AIP Conference Proceedings*, *2358*. https://doi.org/10.1063/5.0059307

Apriandi, R., & Mursadin, A. (2016a). *2.67. The average value of turbine efficiency in August 1999 was 39* (Vol. 1, Number 1).

Apriandi, R., & Mursadin, A. (2016b). ANALISIS KINERJA TURBIN UAP BERDASARKAN PERFORMANCE TEST PLTU PT. INDOCEMENT P-12 TARJUN. *Sjme Kinematika*, *1*(1), 37–46.

Dewantara, R., & Fauzi, S. (2026). Analisis Efisiensi Turbin Uap Shinco Berdaya 4000 kW Di Pabrik Gula Djombang Baru. *Inotek*, *10*, 2549–7952.

Dwi Kusuma, H., & Su, M. T. (2014). ANALISA PENGARUH LAJU ALIRAN PARTIKEL PADAT TERHADAP SUDU-SUDU TURBIN REAKSI PADA SISTEM PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA UAP MENGGUNAKAN CFD. In *Jurnal Teknik Mesin S-1* (Vol. 2, Number 4).

Erizon, N., Refdinal, R., Jasman, J., Irzal, I., Yufrizal, A., Fahrezi, M. S., Putra, F. F., Fadillah, E., & Pepito, M. L. M. B. (2025). Optimizing vertical-axis wind turbine designs: A comparative CFD analysis of savonius, darrieus, and savonius-darrieus configurations. *Teknomekanik*, *8*(2), 211–222. https://doi.org/10.24036/teknomekanik.v8i2.33172

Fauzi Zakaria, M., Effendy, M., Kunci, K., Uap, T., & Energi Dan Analisis Eksergi, A. (2018). Analisa Energi Dan Eksergi Turbin Uap Pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap Unit 2 Tanjung Awar-Awar. *JTM*, *6*, 77–5.

Firza, S., Dan, N., Gede, I., & Lesmana, E. (2021). Analisis Pengaruh Turbine Washing Terhadap Efisiensi dan Daya Pembangkit Turbin Uap. *Jurnal Assimetrik*, *3*, 79–88.

Galal, M., Maksoud, R. A. El, & Bayomi, N. N. (2024). Exergoeconomic analysis of a steam turbine power plant in a sulfuric acid factory. *Results in Engineering*, *24*. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103330

Indra Baskoro, D., Susilo, N., Heni Hendaryati, R., & Komaril, Y. S. (2023). Analisis Efisiensi Motor Induksi Dengan Turbin Uap Sebagai Penggerak Gilingan Di PG Kebon Agung. *Journal Technology Urgency Breakthrough in Engineering*, *2*(246), 2023.

Inrianto, C. M., & Rhohman, F. (2025). Perancangan Turbin Uap Sudu Impuls Satu Tingkat Untuk Penggerak Mesin Penyaring Sari Tahu. *Inotek*, *9*, 2549–7952.

Kacaribu, E. B., Hazwi, M., Sitompul, D., Sitorus, T. B., Uhsg, T., & Sabri, M. (2015). ANALISIS VARIASI SUDUT PADA TURBIN IMPULS TERHADAP DAYA MEKANIS TURBIN UNTUK PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA UAP. *Jurnal Dinamis*, *3*(1).

Karakurt, A. S., Özsari, İ., Başhan, V., & Güneş, Ü. (2022). Evolution of steam turbines: A bibliometric approach. *Journal of Thermal Engineering*, *8*(5), 681–690. https://doi.org/10.18186/thermal.1187839

Karudin, A., Leni, D., Purnama, A., & Akbar, Y. (2025). Implementasi Prototipe Trainer Turbin Uap sebagai Media Pembelajaran SMKN 1 Sumatera Barat. *Jurnal Vokasi*, *9*.

Lianda, J., & Negeri Bengkalis Jl Bathin Alam, P. (2016). Rancang Bangun Vertical Wind Axis Turbin (VWAT) Dua Tingkat. *Seminar Nasional Teknologi Informasi, Komunikasi Dan Industri (SNTIKI)*, *8*.

Marinescu, G., & Brunner, P. B. (2013). Experimental Investigation Into Thermal Behavior of Steam Turbine Components: Part 3 -- Startup and the Impact on LCF Life. *Proceedings of ASME Turbo Expo 2013: Turbine Technical Conference and Exposition*. http://www.asme.org/abo

Meleychuk, O., Vanyeyev, S., Koroliov, S., Miroshnychenko, O., Baha, T., Pavlenko, I., Ochowiak, M., Krupińska, A., Matuszak, M., & Włodarczak, S. (2025). Experimental Study and CFD Analysis of a Steam Turbogenerator Based on a Jet Turbine. *Energies*, *18*(14). https://doi.org/10.3390/en18143867

Muhammad, R., & Yulianto, S. (2022). PENERAPAN PEMROGRAMAN PYTHON DALAM MENENTUKAN WAKTU OVERHOUL KONDENSOR TURBIN UAP Application of Python Programming in Determining the Overhoul Steam Turbine Condenser. *Jurnal Konversi Energi Dan Manufaktur*, *8*.

Mulyadi, D., Rusirawan, D., & I, N. (2023). Desain Pembangkit Listrik Turbin Uap Berbahan Bakar Batu Bara yang Efektif dan Ramah Lingkungan. *Jurnal Tekno Insentif*, *17*(1), 58–68. https://doi.org/10.36787/jti.v17i1.1083

Naryono, I., & Budiono, L. (2015). ANALISIS EFISIENSI TURBIN GAS TERHADAP BEBAN OPERASI PLTGU MUARA TAWAR BLOK 1. *SINTEK*.

Pranata, T., Abdulkadir, M., & Sugati, D. (2022). Analisis Efisiensi Turbin Uap Di PT. Madu Baru Yogyakarta. *Jurnal Cendekia Mekanika*, *03*(02), 175–181.

Rajneesh, N. S., Kumar, C. H. A., Sharma, M., & Pavuluri, S. (2023). CFD Analysis Flow Through Cryogenic Expansion Turbine. *AIP Conference Proceedings*, *2821*(1). https://doi.org/10.1063/5.0158518

Ramadhan, D. F., & Rusirawan, D. (2025). Evaluation Turbine Blade Design and Materials Steam Power Plant : Literature Review. *JURNAL REKAYASA ENERGI DAN MEKANIKA*, *05*(01), 8–21.

Ricci, M., Pacciani, R., Macelloni, P., Cecchi, S., Bettini, C., & Marconcini, M. (2021). An automated strategy for gas turbines off-design predictions with a CFD-based throughflow method. *Applied Thermal Engineering*, *192*. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.116783

Rizky Septianto, M., & Subekti, M. (2017). RANCANG BANGUN TURBIN UAP PADA MAKET PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA UAP. *Journal of Electrical and Vocational Education and Technology*.

Rusin, A., Lipka, M., & Łukowicz, H. (2013). Selection of the rotor heat-up rate for supercritical parameter turbines. *Archives of Thermodynamics*, *34*(3), 89–104. https://doi.org/10.2478/aoter-2013-0017

Shabani, S., & Majkut, M. (2024). CFD approach for determining the losses in two-phase flows through the last stage of condensing steam turbine. *Applied Thermal Engineering*, *253*. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.123809

Suarda, M., Sucipta, M., & Muttakin, I. G. (2023). Semi Twisted Curve Blade Vortex Turbine Performance at Runner Rotation Speed Variation using CFD Simulation. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, *104*(2), 26–35. https://doi.org/10.37934/arfmts.104.2.2635

Suriaman, I., Suprayitno, A., & Hermanto, A. (2022). ANALISIS PENGARUH LAJU UAP TERHADAP EFISIENSI TURBIN UAP CONDENSING PADA PLTU PT. XXX. *Jurnal Teknologika*, *2022*(2), 205–215.

Susilowati, S. E., & Budiman, A. (2016). Rancang Bangun Propotipe Pembangkit Listrik Tenaga Uap dengan Turbin Impuls Diameter 70 cm. *Jurnal UTA'45*.

Syamjith, P., Aggarwal, A., Dinakar, Y., & Babu, K. R. (2023). *Thermal and CFD analysis on modified design of turbine blade used for pelton wheel*. 100008. https://doi.org/10.1063/5.0169525

Venkatraman, K., Moreau, S., Christophe, J., & Schram, C. (2023). Numerical investigation of h-Darrieus wind turbine aerodynamics at different tip speed ratios. *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*, *33*(4), 1489–1512. https://doi.org/10.1108/HFF-09-2022-0562

Wahyu Irawan, O., Susdiawan Pratama, L., Insani, C., Studi Teknik Mesin ITI, P., Raya Puspiptek Serpong, J., & Selatan-Banten, T. (2021). Analisis Termodinamika Siklus Pembangkit Listrik Tenaga Uap Kapasitas 1500 kW. *JURNAL TEKNIK MESIN-ITI*, *5*(3).

Wang, P., Chen, G., & Li, W. (2018). IMPROVEMENT IN THE RAPID STARTUP PERFORMANCE FOR THE SOLAR STEAM TURBINE. *Proceedings of ASME Turbo Expo 2018 Turbomachinery Technical Conference and Exposition*. http://www.asme.org/about-asme/terms-of-use