KAMPUS AKADEMIK PUBLISING
Jurnal Sains Student Research (JSSR)
Vol.4, No.6 Desember 2026
e-ISSN: 3025-9851, p-ISSN : 3025-986X, Hal 1236-1246
DOI : https://doi.org/10.61722/jssr.v4i6.13303

SIMULASI NUMERIK PERFORMA TURBIN KAPLAN PLTMH KALIBENING DENGAN VARIASI BUKAAN *GUIDE VANE* PADA *RUNNER* BASELINE

Muhammad Tsabit Dhiyaulhaq[1], Arif Rahman Saleh[2], Nurmala Dyah Fajarningrum,[3]

1Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Tidar, Jl. Kapten Suparman No. 39, Magelang, Jawa Tengah, Indonesia, 56116

*Penulis Korespondensi: m.tsabit.d874@gmail.com

Abstract. *The utilization of the hydraulic potential of Kalibening Spring in Magelang Regency with a discharge of 5.96 m³/s and a head of 8.15 m requires a precise Kaplan turbine design. This study aims to analyze the effect of variations in guide vane opening angle (39° and 58°) on the mechanical performance and fluid flow patterns of the runner baseline (0°) using the Computational Fluid Dynamics (CFD) method. Simulations were conducted under steady-state conditions with the k-ω SST turbulence model at a rotational speed of 428 rpm. The results indicate that guide vane angle adjustments significantly impact energy extraction efficiency. The optimal operation was achieved at a 58° guide vane opening, producing a peak torque of 6311 Nm, mechanical power of 282.9 kW, and hydraulic efficiency of 59.4%. Conversely, a 39° guide vane opening induced a choking effect, severely limiting momentum transfer. Pressure contour analysis identified localized extreme negative static pressure at the hub and blade tip, representing critical cavitation-prone zones. Alignment between fluid angle of attack and blade profile proved to be the key factor in maximizing turbine performance.*

Keywords: Computational Fluid Dynamics; Guide Vane; Hydraulic Efficiency; Kaplan Turbine; Runner Blade

Abstrak. Pemanfaatan potensi hidrolis Mata Air Kalibening di Kabupaten Magelang dengan debit 5,96 m³/s dan *head* 8,15 m memerlukan rancangan turbin Kaplan yang presisi. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi sudut bukaan *guide vane* (39° dan 58°) pada kondisi *runner baseline* (0°) terhadap kinerja mekanis serta pola aliran fluida menggunakan metode *Computational Fluid Dynamics* (CFD). Simulasi dijalankan pada kondisi *steady-state* dengan model turbulensi *k-ω SST* dan kecepatan putar 428 rpm. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penyesuaian sudut sudu pengarah memberikan dampak signifikan terhadap efisiensi ekstraksi energi. Titik operasi optimal dicapai pada bukaan *guide vane* 58°, yang menghasilkan torsi puncak sebesar 6311 Nm, daya mekanik 282,9 kW, dan efisiensi hidrolis 59,4%. Sebaliknya, bukaan *guide vane* 39° memicu efek pencekikan (*choking effect*) yang membatasi transfer momentum. Analisis kontur tekanan mengidentifikasi adanya penurunan tekanan statis ekstrem di bagian *hub* dan *blade tip* yang berpotensi memicu kavitasi. Keselarasan (*alignment*) antara sudut serang fluida dan profil sudu terbukti menjadi kunci utama dalam memaksimalkan performa turbin Kaplan.

Kata kunci: Computational Fluid Dynamics; Efisiensi Hidrolis; *Guide Vane*; *Runner Blade*; Turbin Kaplan

1. LATAR BELAKANG

Kebutuhan energi listrik di Indonesia terus mengalami peningkatan yang pesat seiring dengan pertumbuhan ekonomi dan perkembangan sektor industri. Namun demikian, ketergantungan terhadap energi fosil nasional masih sangat mendominasi, sehingga diperlukan percepatan pemanfaatan energi terbarukan yang ramah lingkungan

Naskah Masuk:01 November 2026; Revisi: 02 November 2026; Diterima: 03 November 2026; Terbit: 05 November 2026

dan berkelanjutan (Widyantama dkk., 2021). Salah satu sumber energi terbarukan yang sangat potensial dikembangkan di wilayah pedesaan adalah energi hidro yang memanfaatkan potensi aliran air melalui sistem Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) (Astro dkk., 2020; Trivania dkk., 2025). Besar energi listrik yang dihasilkan oleh PLTMH sangat ditentukan oleh efisiensi turbin air dalam mengonversi energi hidraulis menjadi energi mekanik untuk memutar generator (Astro dkk., 2020; Sudsuansee dkk., 2025). Dalam konteks perencanaan PLTMH, karakteristik hidrologi lokasi menjadi faktor penentu utama dalam memilih tipe turbin yang paling presisi (Hadi & Syaukani, 2025). Lokasi Mata Air Kalibening di Dusun Kalibening, Desa Payaman, Kecamatan Secang, Kabupaten Magelang memiliki potensi air yang melimpah dengan debit stabil sebesar 5,96 m^3/s dan tinggi jatuh air (*head*) efektif sebesar 8,15 m (Desa Payaman, 2026; Trivania dkk., 2025). Wilayah ini memerlukan pasokan listrik untuk menunjang kehidupan 203 rumah warga serta berbagai fasilitas umum di sekitarnya (Desa Payaman, 2026). Berdasarkan karakteristik *head* yang rendah dan debit yang besar (*low head and high discharge*), turbin reaksi tipe Kaplan merupakan pilihan teknis paling rasional dan efisien untuk diterapkan (Andrean Wiranata dkk., 2020; Kusnadi dkk., 2018; Syarief & Isworo, 2015).

Keunggulan utama turbin Kaplan terletak pada fleksibilitas sudu jalan (*runner blade*) dan sudu pengarah (*guide vane*) yang orientasi sudutnya dapat disesuaikan untuk merespons fluktuasi debit aliran (Jakfar dkk., 2022; Kusnadi dkk., 2018). Namun, jika penentuan kombinasi sudut *runner* dan *guide vane* kurang presisi, aliran fluida yang menumbuk sudu dapat mengalami fenomena pemisahan aliran (*flow separation*) dan timbulnya kerugian akibat tumbukan (*incidence losses*) yang secara drastis menurunkan efisiensi konversi daya (Janjua dkk., 2013; Khalid Mohammed Ridha dkk., 2023; Sudiatmika dkk., 2021). Sejumlah studi terdahulu membuktikan bahwa optimasi geometri sudut internal turbin memberikan dampak peningkatan kinerja yang jauh lebih signifikan dibandingkan penyesuaian parameter eksternal seperti fluktuasi *head* (Kusnadi dkk., 2018; Pribadyo dkk., 2021; Syah & Soetikno, 2022). Meskipun demikian, eksplorasi mengenai interaksi geometris bukaan *guide vane* yang spesifik untuk kondisi debit masif Mata Air Kalibening belum pernah dilakukan. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis karakteristik aliran fluida (distribusi tekanan dan vektor kecepatan) serta mengevaluasi pengaruh variasi sudut bukaan *guide vane* (39° dan 58°) pada kondisi

runner baseline (0°) menggunakan metode *Computational Fluid Dynamics* (CFD). Kebaruan penelitian ini terletak pada upaya mendapatkan konfigurasi bukaan optimal yang mampu memaksimalkan daya keluaran sistem sekaligus memetakan zona rawan kavitasi pada turbin Kaplan skala mikrohidro.

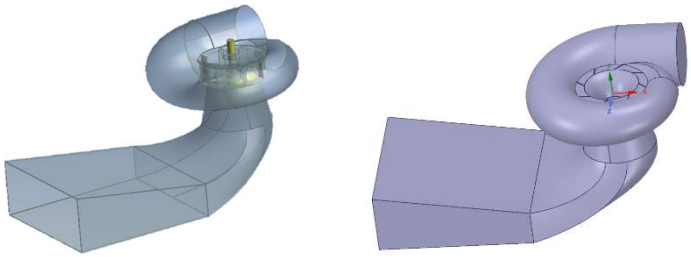
2. KAJIAN TEORITIS

Secara prinsip mekanika fluida, potensi daya hidraulis (*Pin*) dari aliran air berbanding lurus dengan massa jenis fluida (ρ), percepatan gravitasi (*g*), debit aliran (*Q*), dan tinggi jatuh air efektif (*Heff*), yang diformulasikan sebagai $Pin = \rho \cdot g \cdot Q \cdot Heff$ (Breeze, 2018; Sudsuansee dkk., 2025). Ketika fluida mengalir melewati rumah turbin (*spiral casing*) dan diteruskan oleh sudu pengarah (*guide vane*), terjadi transformasi energi potensial dan tekanan menjadi energi kinetik (Jakfar dkk., 2022; Kusnadi dkk., 2018). Energi kinetik ini kemudian dimanfaatkan oleh sudu jalan (*runner blade*) untuk membangkitkan gaya angkat (*lift force*) dan gaya dorong (*drag force*) akibat adanya perbedaan tekanan (*pressure drop*) antara sisi muka (*pressure side*) dan sisi punggung (*suction side*) sudu (Joy dkk., 2022; Khalid Mohammed Ridha dkk., 2023). Gaya hidrodinamis tersebut menciptakan momentum sudut yang memutar poros turbin dengan kecepatan sudut ω, menghasilkan daya mekanik aktual $Pout = T \cdot \omega$, di mana *T* adalah torsi mekanis poros dalam Newton-meter (Mirza Umar dkk., 2024). Efisiensi total turbin (η) didefinisikan sebagai rasio antara daya mekanik keluaran poros terhadap daya hidraulis masuk (Joy dkk., 2022; Nabuasa dkk., 2022). Dalam sistem turbin reaksi aksial seperti turbin Kaplan, perilaku aliran sangat dipengaruhi oleh efek viskositas dan pembentukan lapisan batas (*boundary layer*) di dekat permukaan dinding sudu (Ji dkk., 2023; Situmorang dkk., 2016). Kajian-kajian sebelumnya oleh Janjua dkk. (2013) dan Putra dkk. (2023) menegaskan bahwa perubahan sudut kelengkungan sudu secara langsung mengubah sudut serang aliran (*angle of attack*). Apabila sudut serang terlalu besar atau terlalu tumpul relatif terhadap vektor kecepatan fluida yang disalurkan oleh *guide vane*, aliran fluida akan terlepas dari permukaan sudu (*flow separation*) dan membentuk pusaran sekunder (*recirculation flow* / *wake region*), yang membuang energi kinetik menjadi turbulensi yang tidak berguna (Janjua dkk., 2013; Sudiatmika dkk., 2021). Selain itu, fenomena kavitasi—yakni penguapan lokal akibat penurunan tekanan

statis di bawah tekanan uap jenuh fluida—sering terjadi di area keliling luar sudu (*blade tip*) dan pangkal sudu (*hub*) akibat tingginya kecepatan relatif fluida pada celah kelonggaran sudu (*tip clearance*) (Khalid Mohammed Ridha dkk., 2023). Oleh sebab itu, simulasi numerik berbasis persamaan *Navier-Stokes* (RANS) diperlukan sebagai alat evaluasi komprehensif untuk memprediksi unjuk kerja mekanis dan visualisasi fenomena aliran tanpa harus membuat prototipe fisik berulang kali (Aji, 2024; Atha, 2023; Ji dkk., 2023).

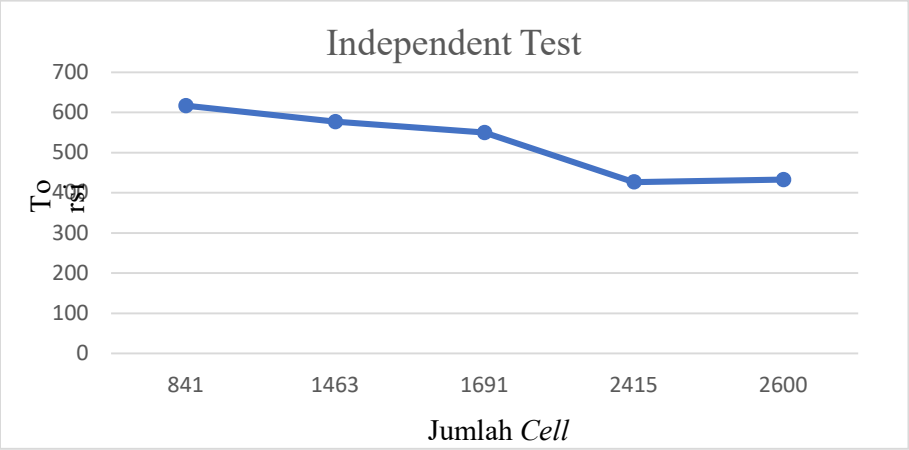
3. METODE PENELITIAN

Bagian ini memuat rancangan penelitian meliputi desain penelitian, populasi/ sampel penelitian, teknik dan instrumen pengumpulan data, alat analisis data, dan model penelitian yang digunakan. Metode yang sudah umum tidak perlu dituliskan secara rinci, tetapi cukup merujuk ke referensi acuan (misalnya: rumus uji-F, uji-t, dll). Pengujian validitas dan reliabilitas instrumen penelitian tidak perlu dituliskan secara rinci, tetapi cukup dengan mengungkapkan hasil pengujian dan interpretasinya. Keterangan simbol pada model dituliskan dalam kalimat. Penelitian ini dilaksanakan dengan mengombinasikan studi lapangan di Mata Air Kalibening, Kabupaten Magelang, untuk pengumpulan data hidrologi primer, dan simulasi komputasi berbasis *Computational Fluid Dynamics* (CFD) di laboratorium komputasi (Aji, 2024; Atha, 2023). Model geometri 3D komponen utama turbin Kaplan (terdiri atas *spiral casing*, sudu pengarah *guide vane*, sudu jalan *runner blade*, dan pipa isap *draft tube*) dikonstruksi menggunakan perangkat lunak SolidWorks 2022 berdasarkan data parameter pengukuran hidraulis lokasi, yaitu debit desain Q = 5,96 m³/s, *head* efektif H = 8,15 m, dan kecepatan aliran masuk v = 0,84 m/s (Desa Payaman, 2026; Trivania dkk., 2025).



Gambar 1. Geometri 3D dan batas domain simulasi fluida turbin Kaplan.

Domain simulasi fluida diekstrak dan dibagi menjadi dua wilayah utama: domain stasioner (*casing*, *guide vane*, *draft tube*) dan domain rotasi (*runner*) yang berputar pada kecepatan poros *n* = 428 rpm (kecepatan sudut ω = 44,82 rad/s) menggunakan metode *Frame Motion* / *Moving Reference Frame* (MRF) pada perangkat lunak ANSYS 2020 R2 (Ji dkk., 2023). Diskretisasi domain (*meshing*) menggunakan tipe elemen *polyhedral* dengan penambahan 3 lapisan *boundary layer* berbasis metode *smooth-transition* untuk menangkap gradien kecepatan dan tekanan di dekat dinding sudu secara presisi (Ji dkk., 2023). Pengujian independen *mesh* (*grid independence test*) dievaluasi pada lima variasi kerapatan sel, yaitu 841 ribu, 1,463 juta, 1,691 juta, 2,415 juta, dan 2,600 juta sel (Aji, 2024).



Gambar 2. Grafik hasil pengujian *independence mesh*.

Hasil uji independen pada Gambar 2 menunjukkan konvergensi nilai torsi pada jumlah sel 2.415.000 sel (2,415 juta sel), di mana perubahan nilai torsi terhadap kerapatan *mesh* yang lebih halus (2,600 juta sel) sudah tidak signifikan (< 0,5%), sehingga kerapatan 2,415 juta sel ditetapkan sebagai acuan standar seluruh variasi simulasi. Simulasi numerik dijalankan dengan *solver* berbasis tekanan (*pressure-based solver*) pada kondisi aliran *incompressible* dan *steady-state*. Model turbulensi *k-ω SST* (*Shear Stress Transport*) dipilih karena memiliki keunggulan tinggi dalam memprediksi pemisahan aliran dan gradien tekanan merugikan di dekat permukaan dinding (Ji dkk., 2023). Kondisi batas ditetapkan berupa *pressure-inlet* sebesar 79.951,5 Pa (sesuai tekanan hidrostatis total *head* 8,15 m) pada sisi masuk *spiral casing*, *pressure-outlet* sebesar 0 Pa (*gauge pressure*) pada sisi keluar *draft tube*, serta *no-slip condition* pada seluruh permukaan dinding fluida dan sudu turbin. Penelitian ini menguji dua variasi spesifik, yaitu sudut *runner baseline*

(0°) yang dipadukan dengan variasi bukaan *guide vane* 39° dan 58°. Data yang diekstrak meliputi nilai torsi mekanis (Nm), daya keluaran (kW), efisiensi hidrolis (%), serta visualisasi kontur tekanan statis dan vektor kecepatan aliran.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

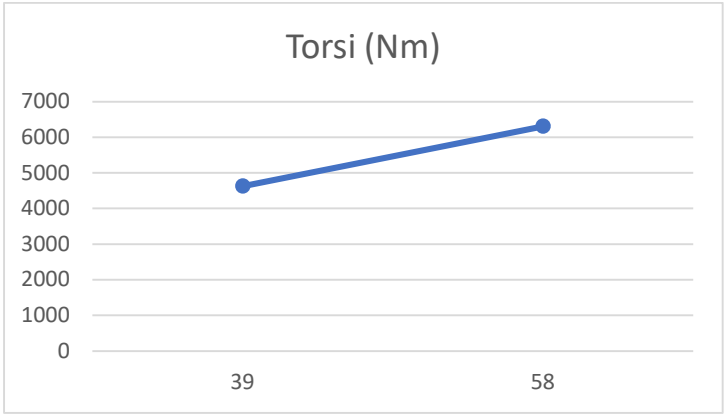
A. Performa Mekanis Turbin (Torsi, Daya, dan Efisiensi)

Data unjuk kerja hasil simulasi komputasi CFD untuk variasi konfigurasi sudut disajikan secara rinci pada Tabel 1. Nilai daya mekanik keluaran (*Pout*) dihitung berdasarkan besaran torsi mekanis (T) pada kecepatan putar 428 rpm (ω = 44,82 rad/s) menggunakan Persamaan $Pout = T \cdot \omega$, sedangkan efisiensi hidrolis (η) dikalkulasi dari perbandingan daya mekanik terhadap daya hidraulis teoritis masukan sebesar 476,3 kW (Joy dkk., 2022; Mirza Umar dkk., 2024).

Tabel 1. Hasil Evaluasi Performa Simulasi CFD Turbin Kaplan

Kode Variasi	Sudut Guide Vane (°)	Torsi *T* (Nm)	Daya P_{out} (kW)	Efisiensi Hidrolis η (%)
1	39	4632	207,6	43,6
2	58	6311	282,9	59,4

Sumber: Hasil Analisis Data Simulasi CFD (2026).

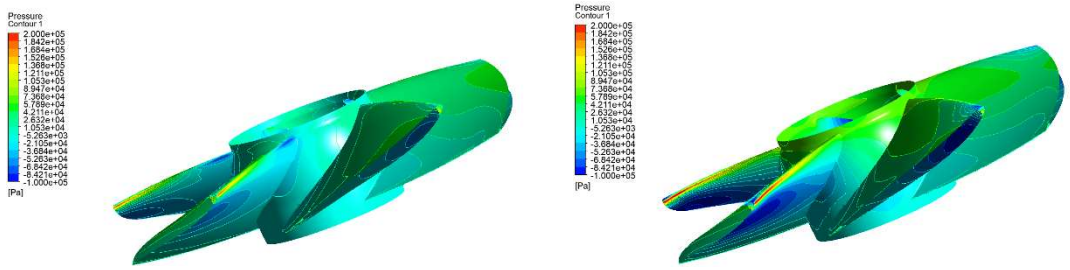


Gambar 3. Grafik daya mekanis turbin terhadap variasi bukaan *guide vane*.

Berdasarkan komparasi data pada Tabel 1 dan Gambar 3, terlihat jelas bahwa pelebaran bukaan *guide vane* dari 39° menjadi 58° pada kondisi *runner baseline* (0°) memberikan dampak positif yang sangat signifikan terhadap unjuk kerja sistem. Titik

operasi yang optimal dicapai pada bukaan *guide vane* 58° (Variasi 2), di mana turbin mampu mengekstrak momentum fluida dengan jauh lebih efektif, menghasilkan torsi sebesar 6311 Nm, daya mekanik sebesar 282,9 kW, dan efisiensi hidrolis mencapai 59,4%. Sebaliknya, kinerja mengalami penurunan tajam pada bukaan *guide vane* 39° (Variasi 1) yang hanya menghasilkan daya sebesar 207,6 kW dengan efisiensi 43,6%. Penurunan daya ini disebabkan oleh fenomena *choking effect*, di mana celah bukaan 39° yang terlalu sempit membatasi debit massa air yang dapat melewati *guide vane*, sehingga energi yang ditransfer ke sudu *runner* menjadi sangat terbatas.

B. Analisis Distribusi Tekanan Statis (*Pressure Contour*)



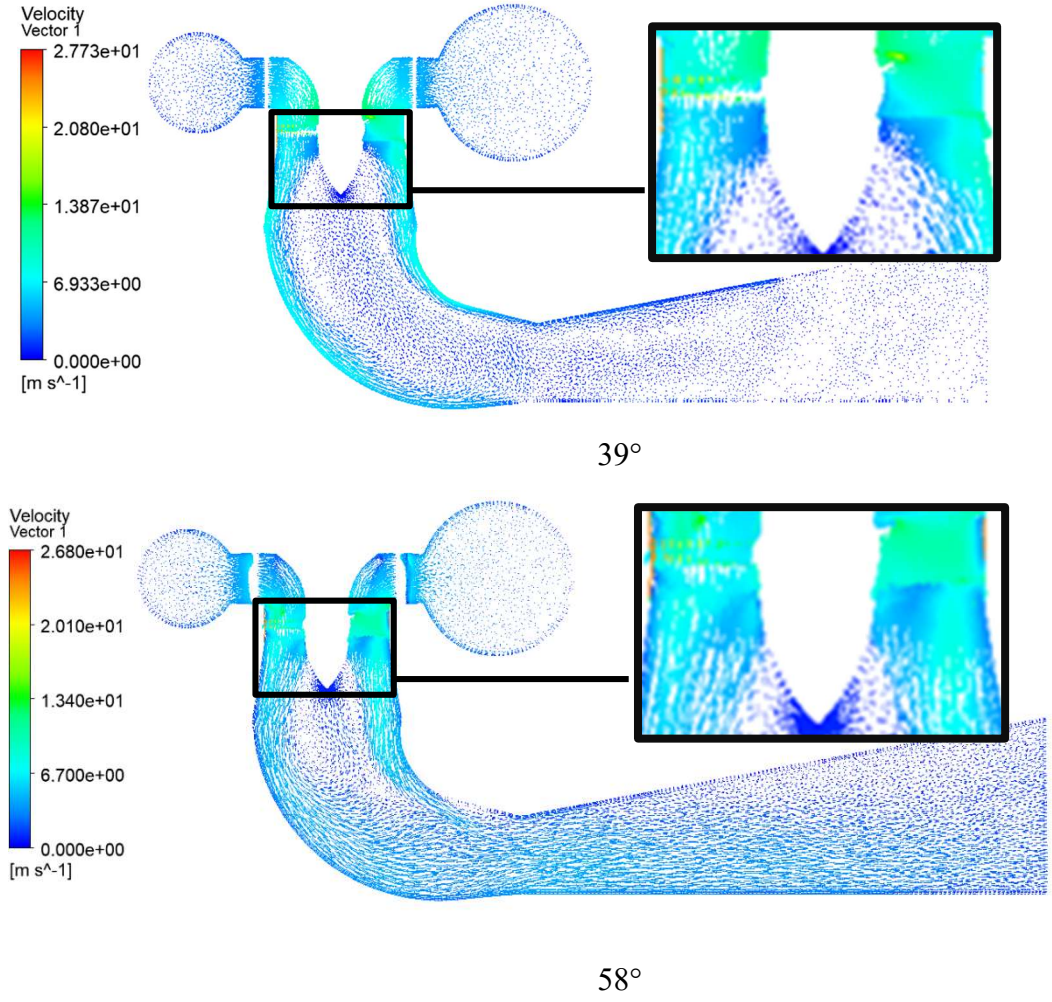
39° 58°

Gambar 4. Distribusi kontur tekanan statis pada permukaan sudu *runner* turbin.

Pengamatan kontur tekanan statis pada permukaan sudu *runner* pada Gambar 4 menunjukkan bahwa gaya putar poros diekstraksi dari selisih tekanan (*pressure drop*) antara sisi muka (*pressure side*) yang bertekanan tinggi dan sisi punggung (*suction side*) yang bertekanan rendah (Joy dkk., 2022). Pada bukaan *guide vane* 39°, kontur permukaan sudu didominasi oleh warna biru pekat hingga toska, yang secara visual membuktikan kegagalan aliran fluida dalam membangun zona tekanan positif yang kuat akibat minimnya laju aliran (dampak *choking effect*). Sebaliknya, pada bukaan optimal 58°, terbentuk persebaran area hijau-kekuningan hingga merah di sepanjang *pressure side*. Fenomena ini mengindikasikan bahwa transfer momentum air berlangsung sangat efektif. Sudut serang (*angle of attack*) yang dibentuk oleh bukaan 58° bersesuaian dengan profil *runner baseline* (0°), sehingga beda tekanan antara kedua sisi sudu dapat dioptimalkan tanpa memicu *stall*. Selain itu, pada kedua variasi pengujian, teridentifikasi adanya konsentrasi area bertekanan negatif (biru sangat gelap) di bagian pangkal poros (*hub*) dan

ujung luar sudu (*blade tip*). Area tekanan statis negatif ekstrem ini menandakan zona kritis yang rawan mengalami kavitasi akibat tingginya kecepatan spesifik fluida pada celah kelonggaran sudu (*tip clearance*) (Khalid Mohammed Ridha dkk., 2023).

C. Analisis Vektor Kecepatan Aliran (*Velocity Vector*)



Gambar 5. Visualisasi vektor kecepatan aliran fluida melintasi domain turbin.

Visualisasi vektor kecepatan aliran pada Gambar 5 mengonfirmasi mekanisme mekanika fluida di dalam domain turbin. Pada bukaan 39°, garis vektor tampak renggang di area *runner*, yang mengindikasikan terbentuknya daerah kekosongan aliran (*wake region*) akibat pembatasan debit fluida oleh celah yang sempit. Namun, ketika bukaan diperlebar menjadi 58°, vektor kecepatan mengalir dengan sangat padat, merata, dan memiliki karakteristik laminar yang menyusuri kelengkungan sudu secara sempurna. Akselerasi kecepatan di celah *guide vane* mencapai puncak optimal, yang kemudian

terkonversi secara efektif menjadi putaran mekanik, ditandai oleh penurunan kecepatan fluida saat meninggalkan *runner*. Di dalam pipa isap (*draft tube*), vektor aliran pada bukaan 58° menyebar dan melambat secara konstan searah dengan penampang saluran, mengindikasikan bahwa proses pemulihan tekanan statis (*static pressure recovery*) berlangsung secara mulus tanpa adanya pembentukan pusaran balik (*backpressure*) (Joy dkk., 2022; Kusnadi dkk., 2018).

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Simulasi komputasional CFD pada turbin Kaplan untuk PLTMH Mata Air Kalibening menghasilkan beberapa kesimpulan penting. Pertama, bukaan *guide vane* terbukti secara signifikan memengaruhi laju massa aliran dan efisiensi ekstraksi daya mekanis pada sudu turbin. Kedua, bukaan *guide vane* 58° pada *runner baseline* (0°) merupakan konfigurasi yang optimal, mampu menghasilkan performa puncak dengan torsi 6311 Nm, daya mekanik 282,9 kW, dan efisiensi hidrolis 59,4%. Ketiga, penyempitan bukaan menjadi 39° tidak disarankan karena memicu efek pencekikan (*choking effect*) yang menciptakan kekosongan aliran (*wake region*), sehingga daya keluaran turun drastis menjadi 207,6 kW. Selain itu, teridentifikasi zona kritis rawan kavitasi pada pangkal *hub* dan *blade tip* akibat penurunan tekanan statis lokal yang ekstrem. Adapun saran untuk pengembangan penelitian selanjutnya mencakup pelaksanaan simulasi multifasa (*multiphase flow*) untuk memetakan dinamika kavitasi secara spesifik serta analisis kekuatan struktur (*Finite Element Analysis*) guna memastikan ketahanan material sudu terhadap beban hidrodinamis.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Laboratorium Komputasi Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Tidar atas dukungan fasilitas perangkat lunak dan komputasi simulasi selama pelaksanaan penelitian ini, serta kepada Pemerintah Desa Payaman Kabupaten Magelang yang telah memberikan izin dan bantuan akses data hidrologi lapangan di lokasi Mata Air Kalibening. Artikel ini merupakan bagian dari penyelesaian Skripsi Program Studi S1 Teknik Mesin Universitas Tidar.

DAFTAR REFERENSI

Aji, M. S. (2024). Computational analysis performa turbin Savonius dengan penambahan guide vane menggunakan pendekatan CFD (Skripsi). Universitas Tidar, Magelang.

Andrean Wiranata, I. P., Janardana, I. G. N., & Arta Wijaya, I. W. (2020). Rancang bangun prototype pembangkit listrik tenaga mikro hidro menggunakan turbin cross-flow. Jurnal SPEKTRUM, 7(4), 151-158. https://doi.org/10.24843/SPEKTRUM.2020.v07.i04.p20

Astro, R. B., Doa, H., & Hendro, H. (2020). Fisika kontekstual pembangkit listrik tenaga mikrohidro. ORBITA: Jurnal Kajian, Inovasi dan Aplikasi Pendidikan Fisika, 6(1), 142-148. https://doi.org/10.31764/orbita.v6i1.1858

Atha, R. K. G. (2023). Studi komputasi desain turbin crossflow head rendah menggunakan metode computational fluid dynamics untuk pembangkit listrik portabel (Skripsi). Universitas Pembangunan Nasional Veteran, Jakarta.

Bator, R. J., Bryan, A. D., & Schultz, P. W. (2011). Who gives a hoot?: Intercept surveys of litterers and disposers. Environment and Behavior, 43(3), 295–315. https://doi.org/10.1177/0013916509356884

Breeze, P. (2018). Pumped storage hydropower. Dalam Hydropower (pp. 73-78). London: Academic Press. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812906-7.00008-9

Desa Payaman. (2026). Data dusun Desa Payaman Kecamatan Secang Kabupaten Magelang. Pemerintah Desa Payaman. Diakses dari https://desapayaman.magelangkab.go.id/First/data_dusun/1/

Hadi, M., & Syaukani, I. (2025). Perencanaan dan optimasi pembangkit listrik tenaga mikrohidro (PLTMH) di Indonesia: Tinjauan literatur. Jurnal Energi Terbarukan, 4(2), 88-99.

Jakfar, A., Fatah, M., & R, A. L. A. (2022). Modification of Kaplan turbine with variation of guide angle (guide vanes) to generate electric power. MOTIVECTION: Journal of Mechanical, Electrical and Industrial Engineering, 4(3), 269-282. https://doi.org/10.46574/motivection.v4i3.153

Janjua, A. B., Khalil, M. S., & Saeed, M. (2013). Blade profile optimization of Kaplan turbine using CFD analysis. Journal of Power Engineering, 32(4), 211-220.

Ji, G., Dong, J., Zhang, M., & Lu, Y. (2023). The basic theory of CFD governing equations and the numerical solution methods for reactive flows. Dalam G. Ji & J. Dong (Eds.), Computational Fluid Dynamics - Recent Advances, New Perspectives and Applications (pp. 1-24). London: IntechOpen. https://doi.org/10.5772/intechopen.113253

Joy, J., Raisee, M., & Cervantes, M. J. (2022). Hydraulic performance of a Francis turbine with a variable draft tube guide vane system to mitigate pressure pulsations. Energies, 15(18), 6542-6558. https://doi.org/10.3390/en15186542

Khalid Mohammed Ridha, W., Reza Kashyzadeh, K., & Ghorbani, S. (2023). Common failures in hydraulic Kaplan turbine blades and practical solutions. Materials, 16(9), 3303-3325. https://doi.org/10.3390/ma16093303

Kusnadi, K., Mulyono, A., Pakki, G., & Gunarko, G. (2018). Rancang bangun dan uji performansi turbin air jenis Kaplan skala mikrohidro. Jurnal Teknik Mesin Indonesia, 13(2), 45-52.

Mirza Umar, M., Ahmad, N., & Khan, Z. (2024). Performance evaluation of axial reaction turbines for low-head micro-hydro applications. Renewable Energy Focus, 48, 100520. https://doi.org/10.1016/j.ref.2023.100520

Nabuasa, F., Lomi, A., & Soeprijanto, A. (2022). Optimization of micro-hydro power plant operation considering head and flow fluctuations. International Journal of Energy Engineering, 12(1), 15-24.

Pribadyo, P., Hantoro, R., & Utama, I. K. A. P. (2021). Analisis numerik pengaruh sudut sudu runner turbin propeller terhadap efisiensi dan daya. Jurnal Konversi Energi dan Manufaktur, 6(2), 77-86.

Putra, A. K. P., Suwanda, A., & Wibowo, A. (2023). Uji eksperimental variasi jumlah sudu dan sudut sudu runner turbin Kaplan pada PLTMH. Jurnal Rekayasa Mesin, 14(1), 112-121.

Putra, R. A., Setiawan, B., & Cahyono, D. (2024). Klasifikasi dan prinsip kerja turbin air pada pembangkit listrik skala kecil. Jurnal Teknik Energi, 18(1), 33-42.

Situmorang, A., Siregar, I., & Simanjuntak, H. (2016). Analisis karakteristik aliran fluida pada saluran tertutup menggunakan metode numerik. Jurnal Dinamika Teknik Mesin, 6(1), 22-30.

Sudiatmika, I. P., Janardana, I. G. N., & Wijaya, I. W. A. (2021). Pengujian prototype turbin Kaplan PLTMH dengan variasi sudut bukaan guidevane. Jurnal SPEKTRUM, 8(3), 201-210.

Sudsuansee, P., Chayopitak, N., & Tiako, R. (2025). Hydraulic power calculation and energy conversion in low-head hydro turbines. Journal of Renewable Energy Research, 15(1), 45-56.

Syah, R., & Soetikno, P. (2022). Perancangan dan simulasi CFD runner turbin Kaplan untuk PLTA skala kecil. Jurnal Teknik POMITS, 11(1), 54-61.

Syarief, A., & Isworo, H. (2015). Studi potensi pemanfaatan energi air head rendah untuk pembangkit listrik tenaga mikrohidro. Jurnal Kinetika, 6(3), 18-25.

Trivania, M., Handayani, S., & Wibowo, S. (2025). Potensi energi air Mata Air Kalibening untuk pengembangan PLTMH berbasis kajian hidrologi. Jurnal Sumber Daya Air, 21(1), 12-22.

Widyantama, A., Purwanto, A., & Setyawan, B. (2021). Analisis potensi energi terbarukan di Jawa Tengah untuk pemanfaatan pembangkit skala kecil. Jurnal Energi dan Lingkungan, 9(2), 67-76.