

Optimasi Jumlah dan Sudut *Blade* Terhadap Perfoma Turbin *Vortex Ultra Low-Head* Berbasis CFD

Galang Yuliawan¹, Muhamad Safi'i^{2*}, Hisyam Ma'mun³

^{1,2,3} Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik dan Informatika, Universitas Persatuan Guru Republik Indonesia Semarang, Semarang, Indonesia.

Email Penulis Korespondensi: muhamadsafii@upgris.ac.id.

Info Artikel	Abstrak
Kata Kunci: Kunci: <i>Blade</i> , Jumlah, Sudut, Turbin <i>Vortex</i>	Ketergantungan berlebihan pada bahan bakar fosil telah mendorong pengembangan teknologi energi terbarukan skala kecil, salah satunya turbin <i>vortex ultra-low head</i> yang mampu memanfaatkan situs aliran air tanpa bendungan (<i>dam-less</i>). Studi numerik untuk mengetahui perfoma trubin <i>vortex ultra low head</i> menarik untuk dikaji lebih dalam. Kaji numerik efek variasi jumlah <i>blade</i> (4, 6, dan 8) dan sudut kemiringan <i>blade</i> (0°, 5°, dan 10°) terhadap perfoma turbin <i>vortex ultra-low head</i>. Diusulkan menggunakan Metoda <i>Computational Fluid Dynamics</i> (CFD) dengan pemodelan multifase <i>Volume of Fluid</i> (VOF) dan model turbulensi <i>k-ω Standard</i> diterapkan dalam keadaan <i>steady</i>. Hasil simulasi menunjukkan bahwa peningkatan jumlah dan sudut <i>blade</i> secara konsisten meningkatkan distribusi kecepatan aliran, tekanan, debit, gaya tangensial, serta daya turbin. konfigurasi 4 <i>blade</i> sudut 0° menghasilkan efisiensi 13,15% dikecepatan aliran 23,13 m/s. Sedangkan konfigurasi 8 <i>blade</i> sudut 10° menghasilkan efisiensi 22,5% pada kecepatan aliran 23,13 m/s, Penelitian ini memberikan kontribusi berupa pemetaan pengaruh variasi jumlah dan sudut <i>blade</i> terhadap karakteristik aliran dan efisiensi turbin <i>vortex ultra-low head</i> yang belum banyak dikaji secara numerik, sehingga dapat dijadikan acuan desain awal (<i>preliminary design guideline</i>) dalam pengembangan <i>runner</i> turbin <i>vortex</i> untuk aplikasi pembangkit skala <i>mikro</i> pada aliran air dengan <i>head</i> sangat rendah. Model simulasi yang diperoleh dalam penelitian ini berpotensi untuk dikembangkan lebih lanjut pada kajian numerik maupun eksperimental berikutnya.
Keywords: Angle, Blade, Pics, Turbine, vortex	Over-reliance on fossil fuels has driven the development of small-scale renewable energy technologies, including the ultra-low-head vortex turbine, which can harness water flow at dam-less sites. Investigating the performance of ultra-low-head vortex turbines through numerical analysis is a subject worthy of deeper study. This study numerically examines the effects of varying the number of blades (4, 6, and 8) and blade inclination angles (0°, 5°, and 10°) on the performance of an ultra-low-head vortex turbine. The study employs the Computational Fluid Dynamics (CFD) method, utilizing Volume of Fluid (VOF) multiphase modeling and the Standard <i>k-ω</i> turbulence model under steady-state conditions. Simulation results indicate that increasing both the number of blades and the inclination angle consistently enhances flow velocity distribution, pressure, discharge, tangential force, and turbine power output. The 4-blade configuration with a 0° angle yielded an efficiency of 13.15% at a flow velocity of 23.13 m/s, whereas the 8-blade configuration with a 10° angle achieved an efficiency of 22.5% at the same flow velocity. This research contributes by mapping the influence of blade count and angle variations on the flow characteristics and efficiency of ultra-low-head vortex turbines—an area that has received limited numerical study. Consequently, the findings can serve as preliminary design guidelines for developing vortex turbine runners for micro-scale power generation in very low-head water flows. The simulation model developed in this study holds potential for further refinement in future numerical and experimental investigations.
JuKSIT is licensed under a Creative Commons Attribution-Share Alike 4.0 International License 	

1. PENDAHULUAN

Ketergantungan berlebihan pada bahan bakar fosil telah menimbulkan krisis energi berskala global, yang pada gilirannya mempercepat upaya komunitas ilmiah dunia untuk beralih ke sumber energi terbarukan yang lebih ramah lingkungan [1]. Hidroenergi menjadi salah satu andalan utama karena kematangan teknologi dan keberlanjutannya secara global [2]. Walaupun mampu menghasilkan daya besar, PLTA berskala besar sering terhambat oleh persoalan lingkungan, biaya investasi yang tinggi, dan keterbatasan lahan yang sesuai. Akibatnya, perhatian riset dunia kini beralih ke pengembangan *mikro-hidro*, *piko-hidro*, serta pemanfaatan situs berketinggian jatuh air *ultra rendah* (*ultra-low head*) terutama sebagai solusi elektrifikasi mandiri bagi wilayah terpencil dan pedesaan di negara berkembang [3]. Secara global, terdapat potensi energi bersih yang belum termanfaatkan sebesar 151 GW pada situs-situs *ultra-low head* seperti saluran irigasi, kanal industri, dan aliran sungai dangkal yang sebelumnya dianggap tidak layak secara teknis maupun ekonomis untuk pembangkitan listrik [4]. Dengan demikian, inovasi pada teknologi turbin air kompak yang mampu beroperasi secara efisien pada kondisi aliran tanpa bendungan (*dam-less*) menjadi sangat krusial dalam mendukung ketahanan energi masa depan [5].

Sistem pembangkit listrik tenaga air *ultra-low head* kini menjadi solusi penting bagi sektor industri dan infrastruktur hidrolis modern, khususnya dalam memanfaatkan energi mekanis yang terbuang dari *drainase* industri, pengolahan limbah cair, dan irigasi sekunder [6]. Keunggulan sistem ini terletak pada sifatnya yang bifungsional selain menghasilkan energi listrik secara kontinu dengan biaya operasional yang relatif rendah, karakteristik hidrodinamika pada beberapa jenis turbin, terutama turbin *vortex*, turut mendukung terjadinya aerasi air secara alami saat fluida melintasi sistem [7]. Efek aerasi ini berperan dalam meningkatkan kandungan oksigen terlarut, yang pada gilirannya membantu menurunkan konsentrasi polutan organik pada limbah industri, menjaga keseimbangan ekosistem perairan di wilayah hilir pertanian, sekaligus mengurangi risiko kavitasi yang dapat merusak komponen mekanis pada bagian hilir instalasi [8].

Objek utama dalam penelitian ini adalah *Gravitational Water Vortex Turbine* (GWVT) atau Turbin *Vortex Ultra-Low Head*. Sistem ini bekerja dengan memanfaatkan struktur bak penampung khusus atau *basin* dengan geometri silinder, konikal, atau *scroll* untuk mengonversi aliran fluida translasi menjadi aliran pusaran vertikal (*free-surface air-core vortex*) yang digerakkan oleh gaya gravitasi [1]. Energi kinetik dan momen angular dari pusaran fluida berkecepatan tinggi ini kemudian ditangkap oleh sudu-sudu (*blades*) pada *runner* yang diletakkan tepat di tengah inti pusaran [9]. Kinerja dari objek penelitian ini sangat sensitif terhadap interaksi antara profil pusaran air dengan susunan geometri sudu, dimana aspek desain komponen bilah *runner* memegang peranan paling vital dalam menentukan efisiensi konversi energi total dari fluida menjadi poros mekanis [9].

Penelitian mengenai optimasi turbin air pada kondisi *mikro-head* telah didekati melalui berbagai inovasi arsitektur. mekanis Shamsuddeen dkk. [4] mengembangkan turbin pintu air miring (IGT) dengan optimasi sudut *beta runner* yang meningkatkan efisiensi 2,72% (86,55% menjadi 88,9%) dan daya dari 39,9 kW menjadi 42,4 kW, kemudian dilanjutkan oleh Shamsuddeen dkk. [5] melalui studi parametrik pada *runner fixed-blade* Kaplan yang menunjukkan sudut *beta* lebih berpengaruh dibanding sudut *stagger* dengan efisiensi meningkat 1,56% menjadi 87,74%; sementara itu Subekti dkk. [10] menggunakan algoritma *surface vorticity model* pada turbin propeler skala laboratorium menghasilkan peningkatan efisiensi 2,6%, Kora dkk. [9] meneliti pengaruh rasio diameter *runner-basin* pada turbin *vortex* dan menemukan ukuran optimal seperempat diameter *basin* dengan efisiensi maksimum 42,9% (rasio 0,27), Ashar dkk. [8] mengevaluasi variasi jumlah sudu (3, 5, 7) pada sudut tetap 15° dengan konfigurasi 7 sudu memberikan performa terbaik berupa daya 3,90 W, penurunan NPSH 2%, dan peningkatan gaya 6% (52,65 N), dan terakhir Zhou dkk. [3] memperkenalkan turbin *dual-duct* untuk *mikro-head* dengan optimasi *ortogonal* (sudut sudu, jumlah sudu, panjang aksial) serta penambahan rusuk pengarah asimetris yang meningkatkan daya dari 3,38 kW menjadi 3,72 kW (+10,06%) dan efisiensi dari 63,38% menjadi 75,05% (+18,41%), dimana konfigurasi tiga rusuk asimetris mencapai efisiensi tertinggi 80,43%.

Dalam domain spesifik turbin pusaran air gravitasi (GWVT), Maika dkk. [2] menyajikan tinjauan komprehensif atas lebih dari 90 studi terdahulu mengenai bentuk *basin*, konfigurasi saluran masuk-keluar, dan karakteristik sudu *runner*, termasuk studi kasus implementasi GWVHT di Papua Nugini yang mencatat daya 800 – 1700 W dengan efisiensi puncak 70% dan efisiensi rata-rata 51%. Analisis berbasis *Computational Fluid Dynamics* (CFD) yang terverifikasi secara ketat telah diaplikasikan oleh Raja dkk. [7] melakukan analisis *Computational Fluid Dynamics* (CFD) multi-parametrik pada sistem GVHP dan menemukan bahwa konfigurasi optimal (diameter *basin* 1000 mm, sudut notch 13°, sudut kerucut 14°) mampu meningkatkan kecepatan tangensial fluida hingga 50% lebih tinggi dari kecepatan inlet. Terkait geometri bak pusaran, Amin dkk. [1] membandingkan variasi geometri *basin* (*inlet* 180 – 220 mm, *outlet* 120 – 140 mm) pada turbin reaksi *vortex* bersudu aksial. Konfigurasi *basin* 220 – 120 mm terbukti paling optimal, menghasilkan debit 8,312 L/s, gaya 74,149 N, turbulensi 6,673 m/s², dan kecepatan aliran 35,100 m/s. Interaksi dinamis antara bilah dan struktur pusaran juga diteliti oleh Kora dkk. [9] mengoptimalkan rasio diameter *runner-to-basin* pada *scroll basin* menggunakan *OpenFOAM*, memperoleh efisiensi maksimum 25,8%, 42,9%, dan 41,2% pada rasio 0,18, 0,27, dan 0,36. Ukuran *runner* optimum adalah seperempat diameter *basin*, karena baik *runner* terlalu kecil maupun terlalu besar sama-sama menurunkan performa. Lebih spesifik lagi, riset mengenai geometri bilah *runner* dilakukan oleh Ashar dkk. [8]

mengevaluasi pengaruh jumlah *blade* (3, 5, 7) pada sudut tetap 15° menggunakan model turbulensi *k- ω Standard*. Konfigurasi 7 *blade* memberikan hasil terbaik: daya 3,90 W, penurunan NPSH 2%, dan peningkatan gaya 6% (mencapai 52,65 N), menjadikannya rekomendasi desain untuk menekan risiko kavitasi pada turbin *vortex ultra-low-head* skala mikro

Pentingnya pemahaman mendalam mengenai analisis pusaran (*vortex analysis*) dan kontrol pemisahan aliran (*flow separation control*) pada bilah turbin air ini memiliki korelasi erat dengan perkembangan studi aerodinamika pada turbin angin dan turbin pasang surut (*tidal turbine*) [11]. Pada *airfoil* turbin angin, *vortex generator* (VG) terbukti menunda dan menekan *dynamic stall*, dengan ketinggian dan posisi *chordwise* VG sebagai faktor penentu [12]; pada turbin pasang surut, VG profil rendah meningkatkan kinerja bilah dan menekan separasi aliran, dengan kenaikan koefisien daya hingga 1,05% pada $\lambda = 3$ [13]; sementara validasi lapangan pada turbin angin skala MW menunjukkan kenaikan daya 4,83% dan AEP 1,87% [14]. Di sisi lain, eksitasi dinamis ketidakstabilan pusaran ujung sudu melalui pengaturan *pitch* dan kecepatan rotor pada mode $k = 1$ mempercepat pemulihan *wake*, dengan reduksi panjang *wake* dekat lebih dari 80% dan laju pertumbuhan pusaran mendekati 90% dari nilai teoretis maksimum [15]. Pada *gravitational vortex hydropower*, geometri *basin* sudut kerucut, sudut *notch*, dan rasio diameter *outlet* menentukan kekuatan pusaran, dengan konfigurasi optimal (*basin* 1000 mm, *notch* 13° , *cone* 14°) meningkatkan kecepatan tangensial hingga 50% [7], sejalan dengan tinjauan yang mencatat efisiensi sistem berkisar 29 – 85% serta keunggulan *basin* konikal atas silindris [2], sementara pada turbin *dual-duct mikro*, sirip pengarah asimetris lebih efektif memutus pusaran ekor heliks dibanding tata letak simetris, meningkatkan efisiensi dari 63,38% menjadi 80,43% dengan daya keluaran hingga 4,05 kW [3]. Ketujuh studi ini menegaskan bahwa rekayasa perilaku pusaran, baik melalui eksitasi aktif maupun modifikasi geometri pasif, menjadi kunci optimalisasi transfer energi kinetik pada sistem turbin angin dan hidro.

Meskipun berbagai studi terdahulu telah mengeksplorasi kontribusi bentuk geometri *basin*, rasio diameter komponen *runner*, analisis pusaran global, serta evaluasi jumlah *blade* pada satu sudut tunggal yang konstan, masih terdapat keterbatasan signifikan (*research gap*) dalam literatur turbin *vortex* gravitasi: Amin dkk. [1] memfokuskan optimasi pada variasi dimensi *inlet-outlet basin* (180 – 220 mm terhadap 120 – 140 mm) dengan geometri *blade* dibuat konstan, memperoleh gaya terbaik 74,149 N pada debit 8,312 L/s tanpa menyentuh variabel *blade* itu sendiri; Kora dkk. [9] mengisolasi rasio diameter *runner*-terhadap-*basin* pada turbin *vortex scroll*, menemukan efisiensi maksimum 42,9% pada rasio 0,27 tanpa mempertimbangkan variasi *blade*; sementara Ashar dkk. [8] menguji jumlah *blade* (3, 5, 7) namun membatasi sudut kemiringan hanya pada satu nilai tetap 15° , memperoleh hasil terbaik pada 7 *blade* berupa gaya 52,65 N (naik 6%) dan penurunan NPSH 2% sehingga mayoritas peneliti cenderung mengisolasi salah satu parameter geometris bilah dan mengabaikan efek kopel hidrodinamika antara sudut datang aliran pusaran dengan luas permukaan kontak total bilah yang berubah seiring bertambahnya jumlah *blade*, padahal fenomena pemisahan aliran (*flow separation*) dan pusaran sekunder merugikan disekitar bilah sebagaimana dikonfirmasi oleh Zhou dkk. [3] pada turbin *dual-duct*, dimana pusaran ekor yang tidak tertangani menyebabkan kehilangan energi signifikan hingga penataan rusuk pengarah meningkatkan efisiensi dari 75,05% menjadi 80,43% hanya dapat dimitigasi secara tuntas apabila parameter jumlah *blade* dan sudut kemiringan bilah diselaraskan dan dioptimasi secara simultan, bukan diuji secara terpisah seperti pada studi-studi sebelumnya.

Novelty penelitian ini terletak pada kajian pengaruh gabungan, bukan terpisah, antara jumlah *blade* dan sudut *blade* terhadap struktur aliran, distribusi tekanan, dan efisiensi turbin *vortex ultra-low head*, yang dianalisis secara numerik menggunakan pendekatan *Computational Fluid Dynamics* (CFD) dengan pemodelan multifase *Volume of Fluid* (VOF). Pendekatan gabungan ini berbeda dari studi-studi sebelumnya yang membatasi diri pada satu parameter geometri *blade*, sehingga mampu mengungkap interaksi kedua parameter secara lebih komprehensif dalam menekan kerugian hidrolik akibat separasi aliran

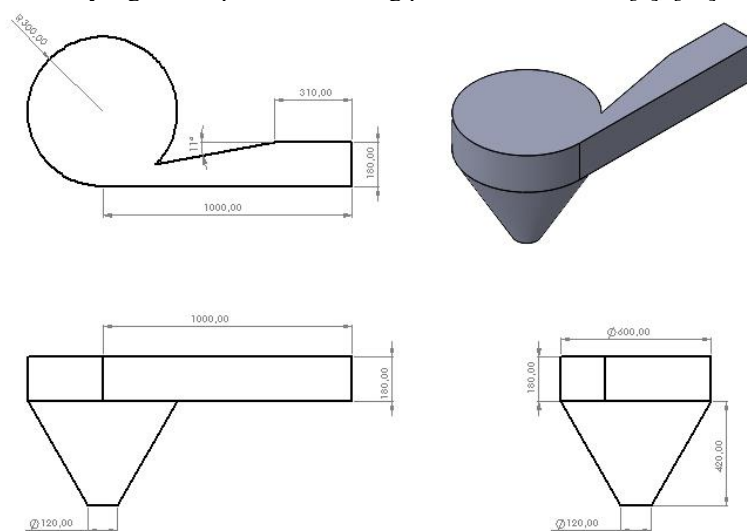
Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis secara sistematis pengaruh interaktif antara variasi jumlah *blade* (4, 6, dan 8) dan variasi sudut *blade* (0° , 5° , dan 10°) terhadap struktur aliran dengan kecepatan (23,13 m/s, 26,37 m/s, 33,6 m/s, 36,63 m/s), dan distribusi tekanan, serta unjuk kerja hidrolik turbin *vortex ultra-low head* menggunakan pendekatan *Computational Fluid Dynamics* (CFD) dengan pemodelan multifase *Volume of Fluid* (VOF). Melalui optimasi parametrik berbasis *Computational Fluid Dynamics* (CFD) ini, Hasil optimasi parametrik ini diharapkan menghasilkan rekomendasi desain *runner* yang optimal dalam meminimalkan kerugian hidrolik akibat separasi aliran fluida, sekaligus menjadi referensi teknis bagi pengembangan pembangkit mikro-hidro berbasis pusaran air gravitasi.

2. METODOLOGI PENELITIAN

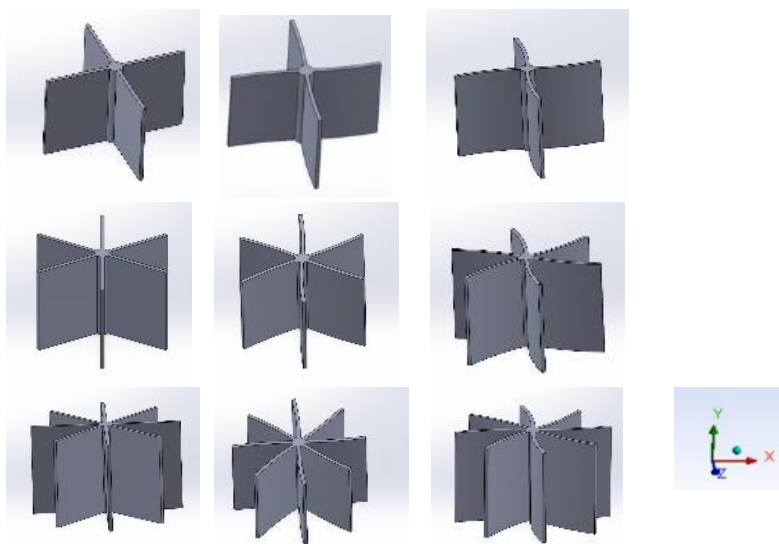
2.1. Model Geometri

Geometri turbin pada Gambar 1 merupakan geometri turbin *vortex ultra low-head*, pada Gambar tersebut menunjukkan pandangan depan, samping, atas dan 3D Geometri turbin *vortex ultra low-head*. Geometri turbin *vortex ultra low-head* dirancang menggunakan perangkat lunak *Computer-Aided Design* (CAD) *SolidWorks*, dalam penelitian

ini desain turbin *vortex ultra low head* terdiri dari dua komponen utama yaitu *basin*, yang membentuk pusaran air, dan *blade*, yang terdiri dari susunan bilah. Parameter pengujian yang kami usulkan adalah variasi geometri saluran *basin inlet* 180 mm dan *outlet* 120 mm. Gambar 2 merupakan 3D geometri *blade* dengan ukuran diameter *shaft* $R = 10$ mm, diameter putar *blade* $R = 200$ mm, tebal 5 mm, tinggi 120 mm, dan jumlah *blade* (4, 6, dan 8) serta sudut kemiringan *blade* (0° , 5° , dan 10°). Pemilihan variasi jumlah *blade* (4, 6, dan 8) dan sudut *blade* (0° , 5° , dan 10°) mengacu pada studi M.Safi'i.[16] yang membatasi variasi jumlah *blade* (3) pada sudut tetap, sehingga kombinasi kedua rentang ini diharapkan mampu mengungkap konfigurasi runner yang lebih optimal dibanding penelitian terdahulu [1], [16].



Gambar 1. Pandangan Depan, Samping, Atas dan 3D Geometri Turbin *Vortex Ultra Low-Head*.



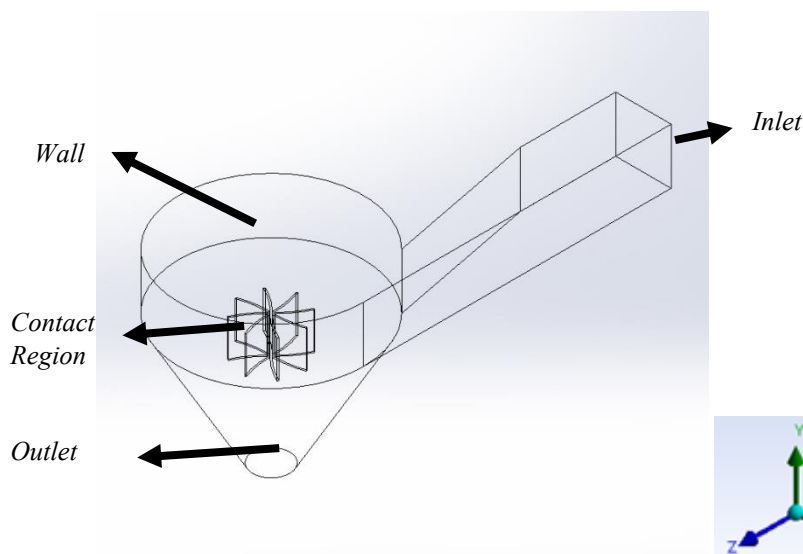
Gambar 2. Variasi Sudut Lengkung dan Jumlah Turbin.

Dalam studi numerik ini, komponen modul turbin menggunakan material paduan baja ST 60 yang diasumsikan memiliki variasi kecepatan aliran pada *inlet* (2,13 m/s, 2,37 m/s, 33,6 m/s, dan 36,63 m/s) dan untuk konduktivitas termal sebesar $17 \text{ W/m}\cdot\text{K}$. Air dipilih sebagai fluida kerja dengan mempertimbangkan karakteristiknya pada suhu 25°C , yaitu densitas 998 kg/m^3 , kalor spesifik $4.182 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$, viskositas dinamik $1,915 \times 10^{-5} \text{ kg/m}\cdot\text{s}$, dan untuk konduktivitas termal $0,6 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, sesuai dengan kondisi operasional yang ditinjau dalam penelitian. Seluruh parameter tersebut diinput ke dalam *setup* melalui menu *database* yang tersedia pada aplikasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD).

2.2. Studi Numerik

2.2.1. Domain Komputasi

Dalam penelitian ini, domain komputasi didiskritisasi dengan menerapkan teknik berbasis volume kontrol (*finite volume method*) untuk menyelesaikan persamaan pengatur, sementara skema *first-order upwind* digunakan untuk meningkatkan akurasi solusi numerik yang dihasilkan. Perancangan geometri domain komputasi dilakukan menggunakan pendekatan *Computational Fluid Dynamics* (CFD) dengan pemodelan multifase *Volume of Fluid* (VOF), dengan mempertimbangkan karakteristik dua jenis material yang terlibat yaitu material fluida dan material *solid*, sesuai dengan kebutuhan studi numerik. Domain komputasi diterapkan pada ukuran panjang 1000 mm, diameter *basin* 600 mm, diameter *inlet* 180 mm, dan diameter *outlet* 120 mm. Penentuan lokasi kondisi batas dijelaskan pada Gambar konfigurasi lengkap domain komputasi turbin *vortex ultra-low head* ditunjukkan pada Gambar 3.



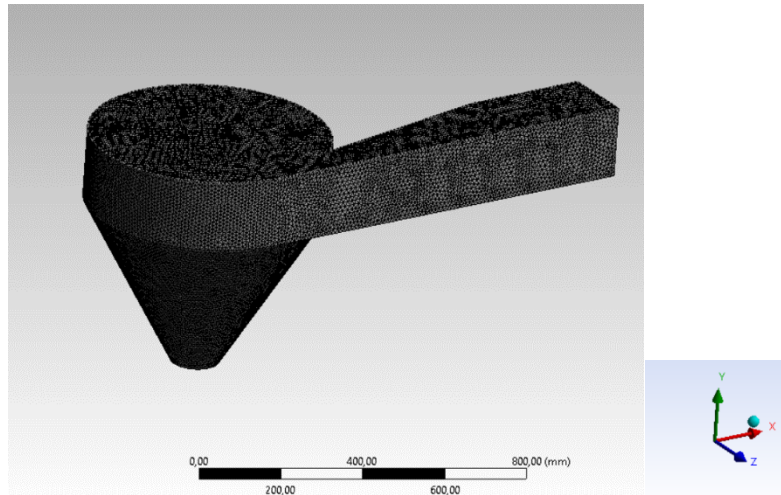
Gambar 3. Domain Komputasi dan Penentuan kondisi Batas pada Turbin *Vortex Ultra Low-Head*.

Untuk menentukan kondisi batas, dilakukan analisis terhadap karakteristik aliran fase tunggal pada kondisi *steady* yang melewati turbin reaksi *vortex* dengan *head ultra-rendah*. Domain komputasi dikonstruksikan berbasis sistem koordinat Cartesian, dengan orientasi sumbu-X searah aliran utama (*streamwise*), sumbu-Y tegak lurus terhadap arah aliran (*spanwise*), dan sumbu-Z tegak lurus terhadap bidang XY. Untuk memperoleh simulasi yang mampu menggambarkan fenomena hidrodinamika secara realistis, Domain komputasi dibagi menjadi dua zona utama: *stationary domain* yang merepresentasikan *basin* sebagai daerah fluida yang diam, dan *rotating domain* yang merepresentasikan *runner* sebagai daerah yang mengalami rotasi akibat putaran sudu. Pemisahan kedua domain ini bertujuan untuk memastikan bahwa interaksi antara fluida yang bergerak secara translasi di dalam stator dan fluida yang berputar di dalam rotor dapat direpresentasikan secara akurat menggunakan skema antarmuka rotor-stator. Diskritisasi persamaan pengatur dilakukan menggunakan teknik berbasis volume kontrol dengan penerapan skema *first-order upwind* guna meningkatkan akurasi numerik tanpa mengorbankan kestabilan solusi secara berlebihan.

2.2.2. Meshing

Proses pembuatan *mesh* dilakukan dengan mempertimbangkan jenis topologi *automatic (tetrahedral)* dan *sizing cell* dengan proses meshing dijalankan menggunakan pendekatan *Computational Fluid Dynamics* (CFD) dengan pemodelan multifase *Volume of Fluid* (VOF). Ukuran dan jenis mesh yang digunakan berpengaruh signifikan terhadap tingkat akurasi dan kualitas hasil simulasi yang diperoleh, sehingga dalam penelitian ini dipilih jenis mesh tetrahedral karena kemampuannya mengoptimalkan jumlah *grid* sehingga dapat mereduksi *computational cost* [16]. Proses pembuatan *mesh* dilakukan dengan ukuran *sizing cell* sebesar 1 mm pada bagian blade turbin dan 2 mm pada bagian *basin*, seperti ditunjukkan pada Gambar 4. Tahapan meshing ini bertujuan untuk membagi domain simulasi menjadi elemen-elemen kecil sehingga perhitungan numerik dapat dilakukan secara lebih akurat, sehingga mampu menangkap perubahan aliran pada area *inlet*, *outlet*, *basin(wall)*, dan *contact region (runner)* dengan lebih baik. Kualitas *mesh* dievaluasi menggunakan parameter *Orthogonal Quality* melalui fitur *Mesh Metrics*. Hasil evaluasi menunjukkan bahwa sebagian besar elemen memiliki nilai *Orthogonal Quality* dengan nilai 0,99996 (*very good*) dan nilai *mesh metric skewness* sebesar 0,9911 (*very good*), dan nilai *wall y+ = 1*. Hasil tersebut menunjukkan bahwa *mesh* yang digunakan memiliki kualitas yang sangat baik sehingga mampu menghasilkan solusi numerik yang stabil dan representatif.

diskritisasi persamaan pengatur dilakukan menggunakan teknik berbasis *volume* kontrol (*finite volume method*) dengan skema *first order upwind*, yang dipilih karena mampu memberikan tingkat akurasi yang memadai dengan waktu komputasi yang relatif lebih cepat. domain komputasi didiskritisasi menggunakan grid tetrahedral yang tersusun secara terstruktur penuh, dengan resolusi yang lebih rapat pada daerah dekat dinding (*near-wall region*) guna menangkap secara akurat efek lapisan batas hidrolis (*hydraulic boundary layer*) yang terbentuk pada permukaan turbin.



Gambar 4. Detail Mesh pada Domain Komputasi.

Kualitas *mesh* dinyatakan baik apabila nilai *Orthogonal quality* >0,1, *Max skewness* <0,95, dan *Wall y+*<1 [16]. Persamaan kontinuitas dan *Navier-Stokes* yang dirata-ratakan *Reynolds* (*Reynolds-Averaged Navier-Stokes/RANS*) diselesaikan menggunakan model *viskos k- ω Standard*, yang mampu menyelesaikan persamaan numerik secara cepat, tepat, dan akurat, bergantung pada asumsi yang digunakan dalam model viskos tersebut. Persamaan pengatur (*governing equations*) untuk domain komputasi 3D pada turbin *vortex ultra-low head* dituliskan dalam koordinat *Cartesian*. Persamaan kontinuitas dan *Navier-Stokes* yang dirata-ratakan *Reynolds* dapat dinyatakan dalam notasi tensor sebagai berikut:

Persamaan kontinuitas:

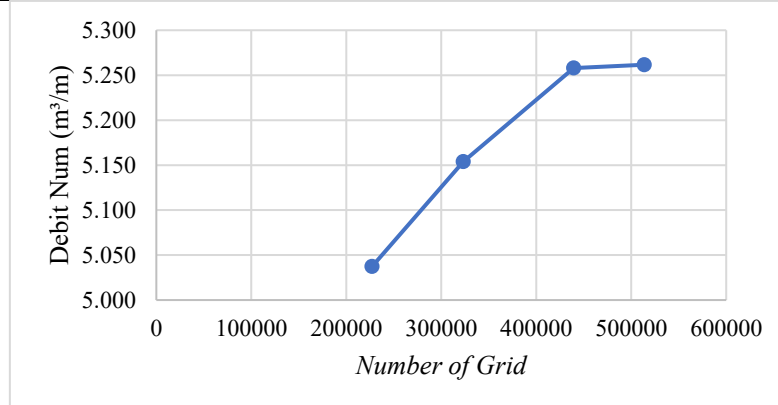
$$\frac{\partial(\alpha_k \rho_k)}{\partial t} + \nabla \alpha_k \rho_k v_k = r_k \quad (1)$$

Persamaan momentum:

$$\frac{\partial}{\partial t} + (\alpha_k \rho_k v_k) + \nabla \cdot (\alpha_k \rho_k v_k) = (\alpha_k \nabla \rho_k \nabla \cdot [\alpha_k (\tau_k + \tau_{Tk} + \tau_{Dk})] + \alpha_k \rho_k f_k + M_k) \quad (2)$$

2.2.3. Uji Grid Independent

Uji *grid* (*grid independence test*) dilakukan untuk memperoleh titik maksimal dari nilai debit hasil simulasi pada turbin *vortex ultra-low head*. Pengujian ini menggunakan variasi jumlah *cell mesh* pada domain komputasi, yaitu sebesar 227.187, 323.366, 439.499, dan 513.810 *sel*. Seluruh tahapan pengaturan simulasi mengacu pada skema eksperimen yang telah dilaporkan sebelumnya [16]. Hasil pengujian ditampilkan dalam bentuk grafik yang menunjukkan hubungan antara jumlah *grid* dan nilai debit, sebagaimana disajikan pada Gambar 5. Berdasarkan perhitungan, diperoleh kesalahan relatif antara *grid* 227.187 dan 323.366 sebesar $\pm 0,9\%$, antara *grid* 323.366 dan 439.499 sebesar $\pm 0,4\%$, serta antara *grid* 439.499 dan 513.810 sebesar $\pm 0,2\%$. Jumlah *grid* 513.810 ditetapkan sebagai konfigurasi paling optimum, mengingat penambahan jumlah *grid* pada tahap ini hanya menghasilkan perubahan nilai debit yang sangat kecil (5,25 L/s menjadi 5,26 L/s), sehingga dapat dianggap konvergen. Oleh karena itu, jumlah *grid* 513.810 dipilih sebagai acuan dalam pengambilan data simulasi turbin reaksi *vortex ultra-low head* untuk seluruh variasi yang telah ditentukan. Parameter yang dibandingkan pada setiap jumlah elemen mesh meliputi debit aliran, torsi, kecepatan aliran, *head*, serta daya turbin hasil simulasi terhadap nilai eksperimental sebagai acuan.



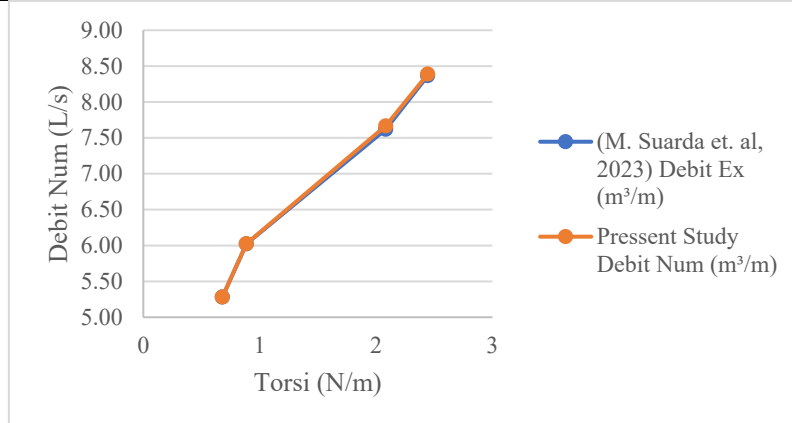
Gambar 5. Nilai Jumlah Grid terhadap Debit pada Turbin *Vortex Ultra-Low Head*.

2.2.4. Set Up Simulasi

Set up simulasi dilakukan dengan mempertimbangkan skema eksperimen yang telah dilakukan oleh peneliti terdahulu [17]. Aliran fluida berupa air dialirkan melalui saluran *inlet basin* kemudian membentuk pusaran (*vortex*) di dalam *basin* sebelum melewati *runner* turbin menuju saluran *outlet*. Fluida air yang berperan sebagai fluida kerja memiliki spesifikasi densitas (ρ) = 998 kg/m³, panas spesifik (C_p) = 1,0057 J/kg.K, *Dynamic viscosity* (μ) = 1,75E-05 (N.s/m²), dan konduktivitas termal (k) = 0,0242 W/m.K pada temperatur 25°C, sedangkan material *runner* turbin menggunakan paduan baja ST 60, diasumsikan konduktivitas termalnya yaitu $k = 17$ W/m².K. Pada tahap *Design Modeler*, dilakukan pembuatan domain komputasi dengan empat bagian utama, yaitu *inlet*, *outlet*, *wall basin*, dan *contact region* pada setiap bagian turbin reaksi *vortex ultra-low head* yang akan dianalisis. Setelah domain komputasi terbentuk, proses dilanjutkan ke tahap *meshing* dengan mengatur ukuran elemen (*element size*) untuk memperoleh jumlah *grid* yang sesuai dengan kebutuhan simulasi. Tahap berikutnya dilakukan pada bagian setup, diawali dengan model viskos yang digunakan adalah model turbulensi *k- ω Standard* karena model ini sesuai untuk menganalisis aliran fluida turbulen di dalam ruang turbin *vortex*. Pada bagian *material*, ditambahkan material *water liquid* sebagai fluida kerja yang digunakan dalam simulasi. Setelah itu, pada bagian *cell zone condition*, zona fluida dipilih sebagai *water liquid* dan materialnya dipilih sebagai *solid (aluminium)*. Proses kemudian dilanjutkan ke bagian *boundary condition* untuk menentukan parameter kecepatan aliran dan debit sesuai dengan variasi pengujian yang telah ditentukan pada sisi *inlet*. Pada bagian *reference values*, nilai acuan dihitung dengan memilih opsi *compute from inlet*, sehingga parameter referensi yang digunakan berasal dari kondisi pada sisi masuk aliran. Selanjutnya, pada bagian *methods*, skema penyelesaian yang digunakan adalah model *Coupled*. Adapun diskritisasi untuk parameter *pressure* hingga momentum menggunakan metode *first order upwind*. Setelah pengaturan metode numerik selesai, Tahap berikutnya adalah proses *initialization* menggunakan *standard initialization* dengan opsi *compute from inlet*. Setelah seluruh pengaturan selesai, simulasi dijalankan melalui menu *run calculation* dengan jumlah literasi sebanyak 5000. Proses perhitungan dilakukan hingga residual menunjukkan kondisi konvergen, sehingga hasil simulasi dapat digunakan untuk tahap analisis selanjutnya.

2.2.5. Validasi

Validasi model numerik dilakukan dengan membandingkan hasil eksperimental (Ex) [17] dan numerik (Num) pada *mesh* optimum sebanyak 513.810 elemen untuk empat variasi kondisi debit aliran, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 6. Hasil perbandingan menunjukkan bahwa kedua kurva debit terhadap torsi memiliki tren dan besaran nilai yang hampir berimpit di seluruh rentang pengujian, dengan nilai debit eksperimental berkisar 5,28 – 8,36 L/s berbanding nilai numerik 5,28 – 8,39 L/s serta kecepatan aliran yang identik pada rentang 23,13 – 36,63 m/s, sehingga menghasilkan kesalahan relatif dibawah 0,7%. Deviasi sekecil ini tergolong sangat baik untuk simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD) pada sistem turbin hidrolik, mengingat toleransi *error* dibawah 5% umumnya telah dianggap dapat diterima secara akademis, sehingga tingkat kesesuaian yang jauh lebih ketat ini menegaskan bahwa pemodelan numerik yang dibangun benar-benar merepresentasikan fenomena fisik aktual. Dengan demikian, dapat dinyatakan secara tegas bahwa konfigurasi numerik yang digunakan meliputi model turbulensi *k- ω Standard*, pemodelan *multifase* VOF, dan *mesh* 513.810 elemen telah tervalidasi dan layak dijadikan acuan untuk menganalisis pengaruh variasi jumlah dan sudut *blade* terhadap performa turbin *vortex ultra-low head*, termasuk sebagai pembanding (*baseline*) terhadap konfigurasi optimum dari penelitian sebelumnya guna mengevaluasi peningkatan performa secara lebih komprehensif, pada tahap simulasi selanjutnya.



Gambar 6. Nilai Debit Terhadap Effisiensi.

2.3. Reduksi Data

Beberapa data perlu ditentukan dan dihitung dalam penelitian ini guna memperoleh nilai gaya (*force*) yang dihasilkan oleh turbin.

Debit (*Q*) dapat ditentukan menggunakan Persamaan 3:

$$Q = A \cdot v \cdot 3 \quad (3)$$

Nilai percepatan gravitasi dan tinggi muka air di atas *basin* ditentukan menggunakan Persamaan 4:

$$D = \left(\frac{Q}{C \cdot \sqrt{2gH}} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (4)$$

Untuk menghitung energi potensial yang tersedia dalam *basin* kerucut *vortex*, perlu dipertimbangkan energi potensial gravitasi dari air yang mengalir melalui sistem [17]. Energi potensial gravitasi tersebut dapat dihitung menggunakan Persamaan 5:

$$P_p = \rho \cdot Q \cdot g \cdot h \quad (5)$$

Untuk menghitung daya teoritis yang dapat dihasilkan oleh *basin* kerucut *vortex* [17] yang dapat dihitung dengan Persamaan 6 dan 7:

$$P = \eta \cdot \rho \cdot Q \cdot g \cdot h \quad (6)$$

$$V = \frac{1}{3} \pi r^2 h \quad (7)$$

Luas penampang saluran masuk (*inlet*) pada *basin* kerucut dengan model trapesium dapat dihitung menggunakan Persamaan 8:

$$A = \frac{1}{2} \cdot (a + b) \cdot h \quad (8)$$

Force Turbin menggunakan Persamaan 9:

$$P = C_p \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V^3 \quad (9)$$

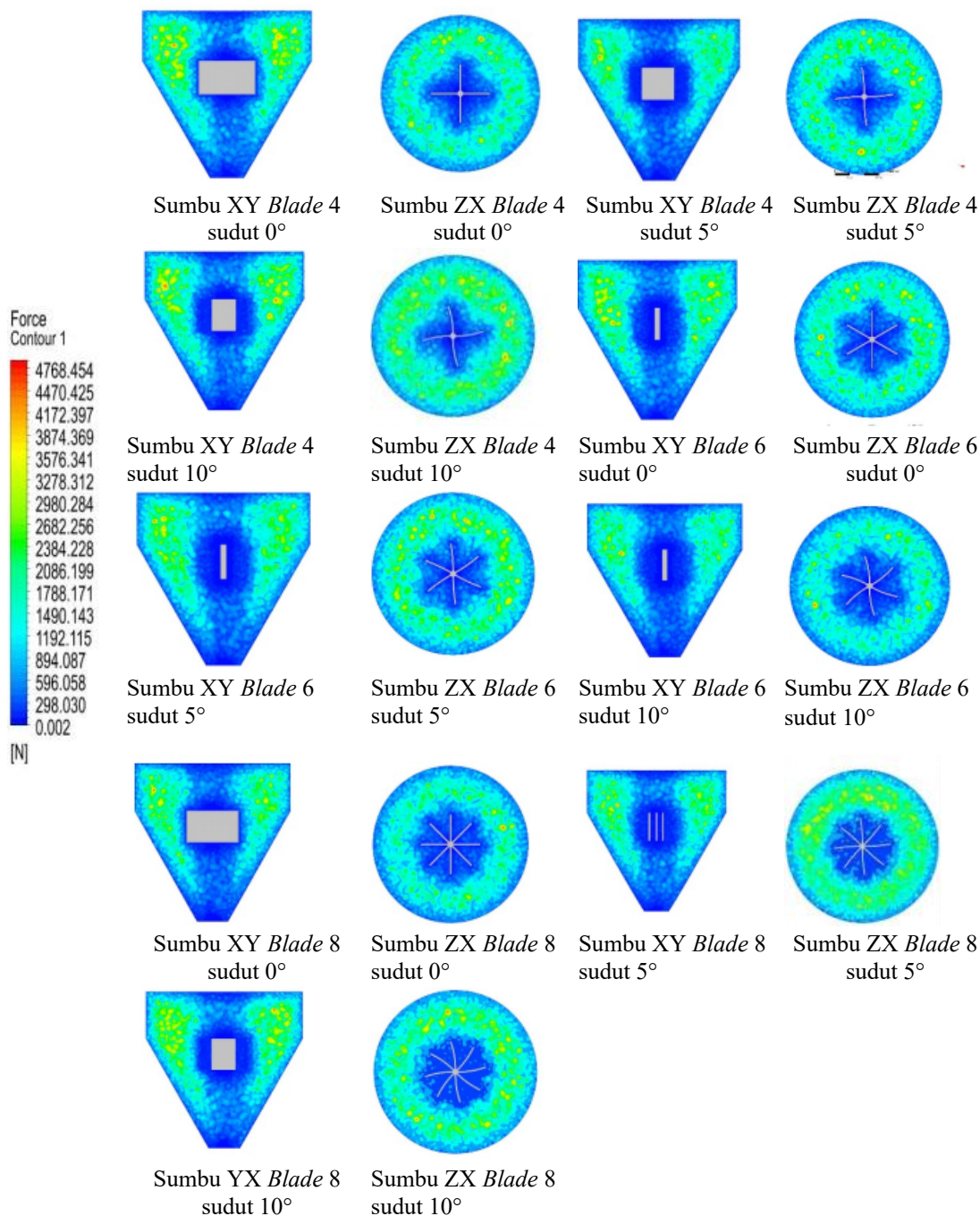
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Karakteristik Aliran Fluida

Mekanisme konversi energi pada turbin ini diinisiasi oleh aliran fluida cair yang masuk melalui penampang *inlet*, yang kemudian mengalir melewati sudu-sudu (*blade*). Gaya dorong fluida tersebut menyebabkan *blade* berputar karena menerima transfer daya mekanis, yang sekaligus memicu terbentuknya aliran pusaran (*vortex*) [1]. Investigasi ini

menerapkan metode numerik *Computational Fluid Dynamics* (CFD) untuk menganalisis pengaruh gaya fisik (*force*) terhadap variasi geometri kompartemen pusaran (*basin*). Variasi dimensi jumlah *blade* yang diuji adalah 4, 6 dan 8, yang dikombinasikan dengan variasi dengan jumlah sudut sebesar 0° , 5° , dan 10° , sementara dimensi geometri *basin* dipertahankan konstan. Rekayasa dimensi ini diproyeksikan mampu mendongkrak performa turbin, dimana optimasi parameter *force* terbukti dapat meningkatkan efisiensi sistem. Peningkatan debit aliran dalam sistem ini sekaligus menjadi indikator kuat bahwa turbin beroperasi dengan performa yang optimal.

3.2 Pembahasan



Gambar 7. Kontur Distribusi *Velocity* Pada Turbin *Vortex* Diberbagai Variasi Jumlah *Blade* dan Sudut *Blade*.

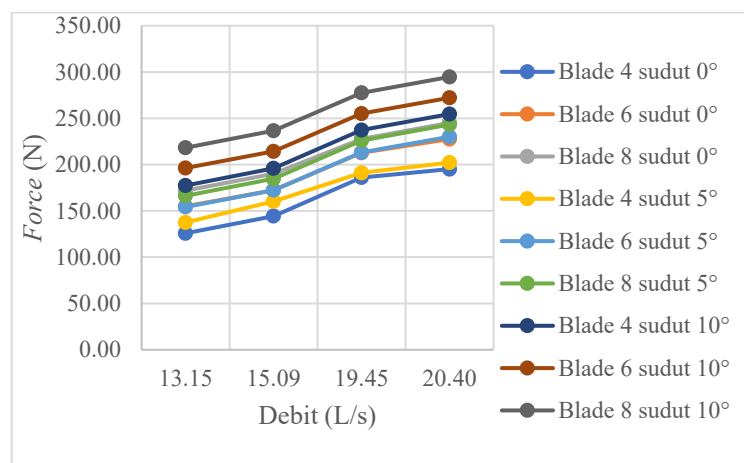
Pada dasarnya mekanisme kerja turbin berawal dari fluida air masuk melalui saluran penampang *inlet*, kemudian masuk melewati *blade* dimana *blade* bekerja berputar karena adanya daya putar sehingga membuat air membentuk sebuah pusaran, lalu fluida dilepaskan menuju saluran penampang *outlet* untuk kemudian dari sistem tersebut dihasilkan energi [18]. Pengaruh *force* terhadap variasi geometri jumlah *blade* (4, 6, dan 8) dan sudut (0° , 5° , dan 10°) dipelajari dengan menggunakan metoda numerik pada variasi geometri *basin* yang diasumsikan dengan ukuran konstan. Variasi tersebut dipilih dan diharapkan mampu memberikan dampak positif terhadap kinerja turbin, terutama aspek *force*.

Secara hidrodinamis, transfer energi kinetik pusaran menjadi energi mekanik poros dipengaruhi oleh struktur aliran di sekitar *runner*. Ketika fluida berkecepatan tinggi memasuki ruang *basin*, terbentuk momentum sudut akibat kontur sirkular. Pada konfigurasi *blade* 4 sudut 0° , fenomena pemisahan aliran (*flow separation*) dan pusaran sekunder (*secondary vortex*) teramati mendominasi di bagian belakang bilah (*leeward side*). Pemisahan aliran ini memicu area rensirkulasi yang meningkatkan kerugian energi (*viscous dissipation*) serta membatasi transfer momentum dari pusaran utama ke permukaan sudu.

Seiring bertambahnya jumlah *blade* (hingga 8) dan sudut kemiringan (hingga 10°), fenomena pemisahan aliran ini tertekan secara signifikan. Sudut kemiringan 10° menciptakan sudut serang (*angle of attack*) yang lebih proporsional terhadap vektor kecepatan tangensial fluida, sehingga aliran tetap melekat (*attached flow*) sepanjang permukaan sudu (*windward side*). Hal ini mengurangi kerugian hambatan (*drag losses*) dan memaksimalkan gaya angkat tangensial (*tangential lift force*) yang mendorong putaran *runner*.

Simulasi numerik dijalankan pada kondisi aliran tunak (*steady state*) dengan menggunakan model turbulensi *k- ω Standard*. Pemilihan model ini didasarkan pada karakteristik studi yang melibatkan bilangan Reynolds (*Reynolds Number*) tinggi, sejalan dengan berbagai literatur terdahulu yang mengonfirmasi akurasi model *k- ω Standard* untuk fenomena aliran serupa. Pengaruh variasi geometri jumlah *blade* (4, 6, dan 8) terhadap sudut *blade* (0° , 5° , dan 10°) memainkan peran penting terhadap fluktuasi *force* yang dihasilkan turbin. Secara umum, nilai *force* cenderung tereduksi seiring dengan bertambahnya jumlah *blade* dan sudut *blade*. Kendati demikian, fenomena menarik terjadi ketika jumlah *blade* dan sudut *blade* dikurangi, dimana nilai *force* justru mengalami penurunan. Hal ini dipicu oleh intensitas pencampuran aliran (*mixing*) yang lebih kompleks antara kontur geometri *basin* dan sudut sudu disekitar saluran pembuangan. Di sisi lain, ekspansi dimensi pada kedua jumlah *blade* dan sudut *blade* secara berlebihan berisiko meningkatkan faktor kerugian gesek (*friction factor*), yang pada gilirannya menurunkan efektivitas kerja turbin dan memperkecil nilai *force*. Gambar 7 menunjukkan kontur distribusi nilai *force* pada turbin dengan geometri jumlah *blade* (4, 6, dan 8) dan sudut *blade* (0° , 5° , dan 10°).

Pada *force zone* energi potensial fluida menjadikan energi mekanik bekerja pada *blade*, akibatnya gaya jatuh fluida mendorong *blade* sehingga turbin berputar. Putaran turbin mengakibatkan karakteristik fluida membentuk pusaran atau *vortex* disekitar *blade* seperti yang ditunjukkan pada *vortex zone*, hal itu dapat diketahui adanya nilai *force*. Mulanya, nilai *force* pada turbin ini berkisar antara 125,81 – 195,14 pada debit 13,05 L/s – 20,40 L/s, namun dengan bertambahnya debit fluida turbin saat bekerja menjadikan nilai *force* perlahan naik, akibatnya *blade* bekerja dengan putaran yang lebih tinggi sehingga memungkinkan nilai debit perlahan naik. Dengan naiknya nilai debit tersebut diketahui dapat meningkatkan nilai efisiensi turbin hingga 7%. Dengan meningkatnya nilai debit maka dikonfirmasi bahwa turbin bekerja dengan baik.

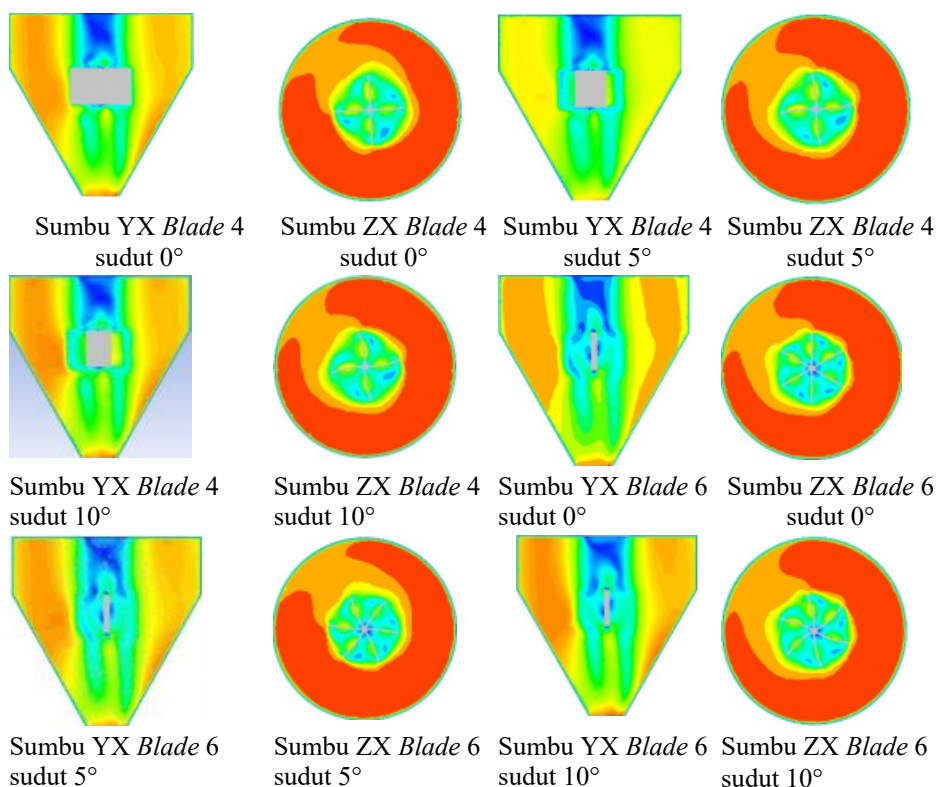


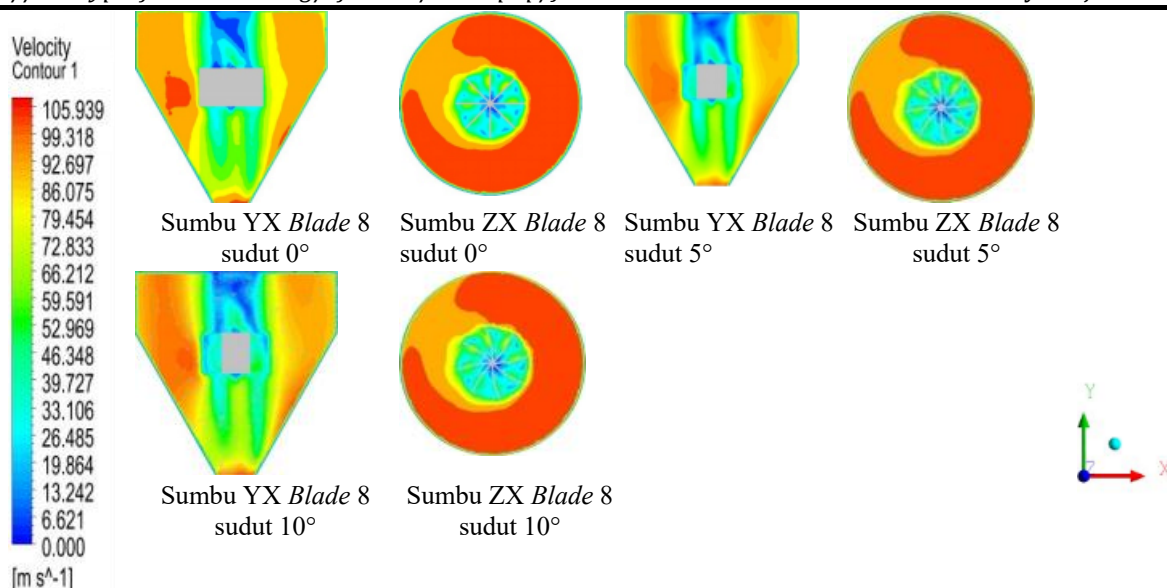
Gambar 8. Nilai Debit Terhadap Force.

Karakteristik hubungan antara debit aliran dan gaya dorong (*force*) pada *runner* untuk sembilan konfigurasi geometri kombinasi jumlah *blade* (4, 6, dan 8) dengan sudut kemiringan *blade* (0° , 5° , dan 10°), disajikan Gambar 8. diatas yaitu hubungan antara debit aliran (L/s) dan gaya dorong (*force*, N) yang bekerja pada sudu turbin *vortex ultra low head*, untuk sembilan konfigurasi uji yang meliputi variasi jumlah sudu (4, 6, dan 8) serta sudut kemiringan sudu (0° , 5° , dan 10°). Turbin *vortex ultra low head* bekerja dengan memanfaatkan pembentukan pusaran (*vortex*) pada *basin* sirkular akibat aliran air yang masuk secara tangensial, sehingga energi kinetik aliran dikonversi menjadi gaya dorong tangensial yang menggerakkan sudu turbin meskipun pada kondisi *head* yang sangat rendah. Berdasarkan hasil pengujian pada rentang debit 13,15 L/s hingga 20,40 L/s, seluruh konfigurasi menunjukkan tren yang konsisten, yaitu gaya dorong pada sudu meningkat secara proporsional seiring bertambahnya debit aliran yang masuk ke dalam *basin vortex*.

Pada debit minimum (13,15 L/s), gaya dorong terendah diperoleh pada konfigurasi *blade* 4 sudut 0° , yaitu sekitar 125 N, sedangkan gaya tertinggi pada debit yang sama dicapai oleh konfigurasi *blade* 8 sudut 10° , yaitu sekitar 218 N. Kecenderungan ini konsisten hingga debit maksimum (20,40 L/s), dimana konfigurasi *blade* 8 sudut 10° kembali menghasilkan gaya dorong tertinggi, mendekati 295 N, sementara konfigurasi *blade* 4 sudut 0° tetap menghasilkan gaya terendah, yaitu sekitar 200 N. Peningkatan gaya yang cukup tajam teramati pada rentang debit 15,09 L/s menuju 19,45 L/s pada seluruh konfigurasi, yang mengindikasikan penguatan intensitas pusaran *vortex* sejalan dengan bertambahnya debit pada rentang tersebut, sebelum laju peningkatan gaya melandai mendekati debit maksimum.

Peningkatan sudut kemiringan sudu dari 0° menuju 10° memperluas bidang tangkap efektif (*effective catchment area*) sudu terhadap komponen kecepatan tangensial pusaran, sehingga gaya impuls yang diteruskan ke permukaan sudu dan diakumulasikan pada poros turbin menjadi lebih besar pada debit yang sama. Di sisi lain, penambahan jumlah sudu meningkatkan *solidity ratio* turbin, yang berkontribusi terhadap perluasan total luas permukaan interaksi antara sudu dan pusaran *vortex*, sehingga distribusi gaya dorong menjadi lebih merata dan menghasilkan resultan gaya total yang lebih tinggi dibandingkan konfigurasi dengan jumlah sudu lebih sedikit. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa konfigurasi *blade* 8 sudut 10° merupakan konfigurasi paling optimal dalam menghasilkan gaya dorong tertinggi pada turbin *vortex ultra low head* diseluruh rentang debit yang diuji, sedangkan konfigurasi *blade* 4 sudut 0° secara konsisten menunjukkan performa hidrodinamik terendah diantara seluruh variasi yang diteliti. Temuan ini memperkuat pemahaman bahwa optimasi geometri sudu, khususnya sudut kemiringan dan jumlah sudu, menjadi faktor kunci dalam meningkatkan kapasitas ekstraksi energi hidrokinetik pada teknologi turbin *vortex ultra low head*.

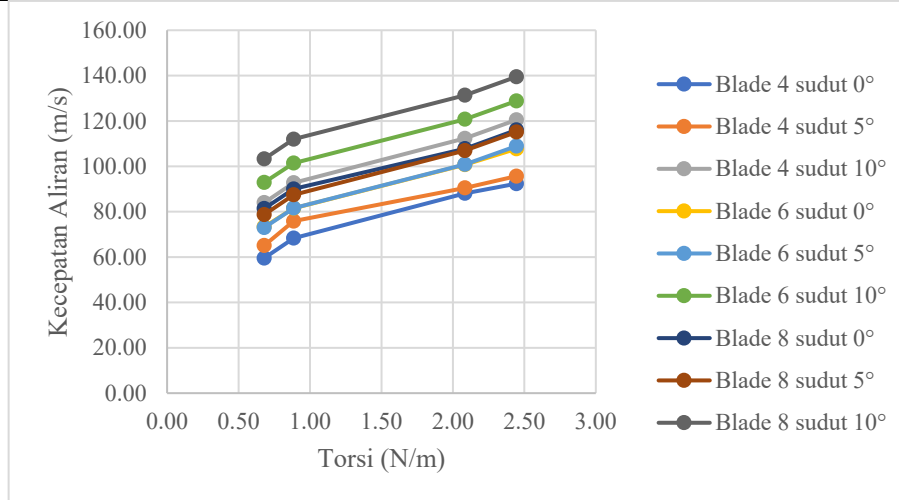




Gambar 9. Kontur Distribusi *Velocity* Pada Turbin *Vortex* Diberbagai Variasi Jumlah *Blade* dan Sudut *Blade*.

Kecepatan absolut yang bekerja pada turbin merupakan kecepatan aliran fluida yang diukur relatif terhadap kerangka acuan stasioner (*stationary frame*). Kecepatan absolut ini memberikan informasi mengenai energi kinetik yang menyebabkan turbin memperoleh nilai daya yang memadai. Pada studi numerik ini, pengambilan data kecepatan aliran pada turbin dilakukan saat turbin beroperasi dalam kondisi *steady*. Adanya kecepatan absolut pada turbin menyebabkan timbulnya gaya tangensial, yang muncul akibat daya putar (*rotational power*) pada turbin, sehingga besaran nilai gaya (*force*) dapat diketahui. Gambar 8 menunjukkan Kontur distribusi nilai *velocity* pada turbin dengan geometri *blade* variasi jumlah *blade* (4, 6, dan 8) dan sudut (0°, 5°, dan 10°).

Gambar tersebut menunjukkan bahwa kecepatan aliran pada saluran *basin* turbin cenderung tidak merata, dengan kecepatan maksimum aliran terjadi pada kisaran 0,05 hingga 0,25 kedalaman saluran. Beberapa faktor yang dapat memengaruhi kecepatan aliran pada turbin ini antara lain kemiringan sudut *blade*, kekasaran permukaan *blade*, dan jumlah *blade*. Perubahan kecepatan aliran fluida pada turbin umumnya disebabkan oleh gesekan antarpartikel fluida, gesekan antara partikel fluida dengan dinding *basin*, serta tumbukan partikel fluida dengan dinding *blade*. Karakteristik kontur *velocity streamline* sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 9 memperlihatkan bahwa aliran cenderung teratur pada saat memasuki *inlet basin*, kemudian karakteristik aliran perlahan berubah ketika mulai memasuki *basin* dekat *blade*, lalu dengan adanya gaya sentrifugal dan tangensial yang terjadi akibat putaran *blade* mengakibatkan fluida bergerak memutar mengitari *blade* sebelum keluar menuju saluran *outlet basin*. Pada fenomena yang terjadi di sekitar *blade*, karakteristik aliran fluida cenderung membentuk pusaran-pusaran (*vortex*) sebelum keluar menuju saluran *outlet basin*. Selain itu, karakteristik tersebut juga dipengaruhi oleh besaran nilai viskositas, tekanan, kepadatan (*densitas*), dan geometri sistem. Berdasarkan hal tersebut, kinerja turbin reaksi *vortex ultra-low head* dapat divalidasi dan diperoleh geometri yang paling optimal. Diharapkan hasil penelitian ini dapat memberikan kontribusi bagi perancangan turbin, serta dapat direkomendasikan untuk diaplikasikan secara praktis di lapangan.



Gambar 10. Kecepatan Aliran Numerik (m/s) Pada Torsi 2,445 N/m.

Gambar 10 menunjukkan hubungan antara torsi (N/m) dan kecepatan aliran (m/s) pada turbin *vortex ultra low head* dengan variasi jumlah *blade* 4, 6, dan 8 serta sudut kemiringan *blade* 0°, 5°, dan 10°. Turbin *vortex* merupakan salah satu teknologi pembangkit listrik tenaga air alternatif yang mampu memanfaatkan aliran air dengan *head* sangat rendah (*ultra low head*) melalui pembentukan pusaran (*vortex*) pada *basin* sirkular, sehingga energi kinetik aliran dikonversi menjadi energi mekanik putaran poros turbin. Berdasarkan hasil pengujian, seluruh konfigurasi sudu menunjukkan kecenderungan yang konsisten, yaitu kecepatan aliran mengalami peningkatan seiring dengan bertambahnya torsi dalam rentang 0,65 N/m hingga 2,45 N/m, yang mengindikasikan bahwa penguatan pusaran *vortex* sejalan dengan peningkatan beban torsi yang diterima oleh poros turbin.

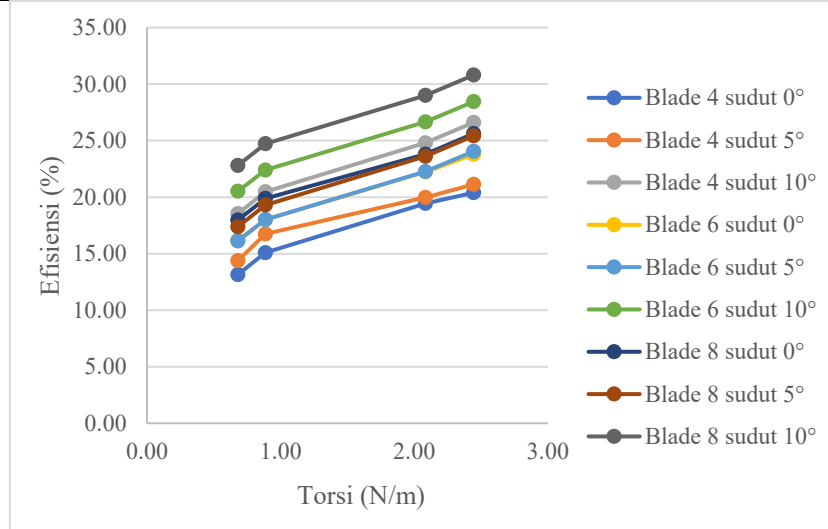
Pada kondisi torsi minimum (0,65 N/m), kecepatan aliran terendah diperoleh pada konfigurasi sudu berjumlah 4 dengan sudut kemiringan 0°, yaitu sebesar 58 m/s, sedangkan kecepatan aliran tertinggi pada torsi yang sama dicapai oleh konfigurasi sudu berjumlah 8 dengan sudut kemiringan 10°, yaitu sebesar 104 m/s. Pola serupa juga teramati pada torsi maksimum (2,45 N/m), dimana konfigurasi sudu 8 sudut 10° kembali unggul dengan kecepatan aliran mencapai 140 m/s, jauh melampaui konfigurasi sudu 4 sudut 0° yang hanya menghasilkan 92 m/s.

Peningkatan sudut kemiringan sudu memperbesar luas bidang tangkap (*blade catchment area*) terhadap arah tangensial aliran *vortex*, sehingga momentum sudu yang diserap sudu menjadi lebih besar dan menghasilkan kecepatan putar yang lebih tinggi. Disisi lain, penambahan jumlah sudu meningkatkan *solidity* rasio turbin, yang berkontribusi terhadap penguatan gaya dorong pada poros meskipun turut berpotensi meningkatkan efek turbulensi lokal antar-sudu pada torsi tinggi. Dengan demikian, konfigurasi sudu berjumlah 8 dengan sudut kemiringan 10° dapat diidentifikasi sebagai konfigurasi paling optimal dalam menghasilkan kecepatan aliran tertinggi pada turbin *vortex ultra low head*, sedangkan konfigurasi sudu 4 dengan sudut 0° secara konsisten menunjukkan performa hidrodinamik yang paling rendah diantara seluruh variasi yang diuji.

Perbandingan kuantitatif menunjukkan bahwa *force* tertinggi penelitian ini, yaitu 295 N pada konfigurasi *blade* 8 sudut 10°, melampaui gaya 52,65 N yang dianalisis Ashar dkk. [8] pada konfigurasi 7 *blade* sudut tetap 15°. Hasil ini membuktikan bahwa optimasi simultan jumlah dan sudut *blade* menghasilkan gaya dorong yang lebih besar dibandingkan optimasi parsial pada studi terdahulu, sekaligus menjawab *research gap* yang diuraikan pada bagian pendahuluan. Temuan ini konsisten dengan Raja dkk.[7], yang disajikan dengan peningkatan kecepatan tangensial hingga 50%, dan Zhou dkk. [3], yang mencatat kenaikan efisiensi dari 63,38% menjadi 80,43% melalui penataan geometri sudu asimetris.

3.3 Pengaruh Sudut *Blade*

Gambar 11 menunjukkan hubungan antara torsi (N/m) dan efisiensi (%) turbin *vortex ultra-low head* untuk sembilan konfigurasi uji yang merepresentasikan kombinasi variasi jumlah *blade* 4, 6, dan 8 dengan sudut kemiringan *blade* 0°, 5°, dan 10°. Pada rentang torsi 0,65–2,45 N/m, seluruh konfigurasi menunjukkan tren peningkatan efisiensi yang konsisten seiring bertambahnya torsi, yang mengindikasikan bahwa penguatan interaksi antara pusaran *vortex* dan sudu turbin turut meningkatkan proporsi energi kinetik aliran yang berhasil dikonversi menjadi energi mekanik poros.



Gambar 11. Nilai Torsi (N/m) Terhadap Efisiensi Numerik (%).

Diantara ketiga variasi sudut yang diuji, sudut kemiringan terbukti menjadi parameter geometris yang paling dominan memengaruhi tingkat efisiensi pada setiap kondisi torsi. Pada torsi minimum (0,65 N/m), konfigurasi bersudut 0° (*blade* 4) menghasilkan efisiensi terendah sebesar 13%, sementara konfigurasi bersudut 10° (*blade* 8) mencapai efisiensi tertinggi sebesar 22,5%. Kecenderungan serupa berlanjut hingga torsi maksimum (2,45 N/m), dimana sudut 10° tetap unggul dengan efisiensi 31% dibandingkan sudut 0° yang hanya mencapai 20,5%. Selisih efisiensi sebesar 9 – 10 poin persentase yang konsisten di sepanjang rentang torsi ini menegaskan bahwa pengaruh sudut kemiringan sudu bersifat sistematis, bukan sekadar fluktuasi acak akibat kondisi pembebanan tertentu.

Secara mekanistik, perbedaan performa ini dapat dijelaskan melalui perubahan sudut serang (*angle of attack*) antara arah aliran *vortex* dan permukaan sudu. Pada sudut 0°, permukaan sudu berorientasi tegak lurus terhadap sumbu aliran sehingga hanya mampu menyerap komponen gaya aksial dari pusaran fluida, sementara komponen tangensial yang justru menjadi sumber utama torsi poros pada turbin bertipe *vortex* tidak dimanfaatkan secara optimal. Sebaliknya, semakin besar sudut kemiringan sudu, semakin besar pula proyeksi permukaan sudu terhadap arah rotasi *vortex*, sehingga gaya tangensial yang tertangkap oleh sudu meningkat dan torsi yang dihasilkan pada kecepatan putar tertentu menjadi lebih besar. Karena efisiensi turbin pada dasarnya merupakan rasio antara daya mekanik poros terhadap daya hidrolik aliran yang tersedia, peningkatan torsi akibat optimalisasi sudut ini berkontribusi langsung terhadap kenaikan efisiensi konversi energi secara keseluruhan.

Meskipun demikian, pengaruh sudut kemiringan tidak dapat dipisahkan sepenuhnya dari faktor *solidity ratio*, yakni rasio luas total sudu terhadap luas penampang aliran. Sudut kemiringan yang besar akan memberikan hasil optimal apabila diimbangi dengan jumlah sudu yang memadai, sebagaimana ditunjukkan oleh keunggulan konsisten konfigurasi *blade* 8 sudut 10° dibandingkan kombinasi lainnya. Namun, potensi efek *blocking* tetap perlu diwaspadai pada kombinasi sudut besar dan jumlah sudu berlebihan, karena kerapatan sudu yang terlalu tinggi dapat menghambat kontinuitas aliran *vortex* dan justru membatasi peningkatan efisiensi lebih lanjut. dapat disimpulkan bahwa geometri sudut kemiringan sudu merupakan variabel desain yang paling signifikan dalam menentukan efisiensi turbin *vortex ultra-low head*, dimana sudut 10° secara konsisten menghasilkan performa terbaik pada seluruh rentang torsi yang diuji, sementara sudut 0° secara sistematis menghasilkan efisiensi terendah. Temuan ini memperkuat argumen bahwa optimasi sudut serang sudu terhadap arah pusaran *vortex* merupakan strategi desain kunci untuk memaksimalkan konversi energi pada turbin *head* sangat rendah.

Untuk menjamin keandalan hasil simulasi CFD, analisis ketidakpastian numerik dievaluasi mengacu pada metode *Grid Convergence Index* (GCI) berdasarkan *Roache*. Hasil pengujian independensi *grid* pada empat tingkat kerapatan sel (227.187 hingga 513.810 sel) menunjukkan bahwa nilai ketidakpastian numerik untuk parameter debit dan torsi berada pada rentang $\pm 0,2\%$ hingga $\pm 0,9\%$. Selain itu, sensitivitas model viskos *k- ω Standard* dievaluasi terhadap variasi kondisi batas *inlet* (fluktuasi kecepatan $\pm 5\%$). Deviasi hasil torsi yang diperoleh berada di bawah 1,2%, mengonfirmasi bahwa model numerik ini sangat stabil dan memiliki tingkat sensitivitas yang rendah terhadap fluktuasi minor pada kondisi batas.

Efisiensi tertinggi penelitian ini, yaitu 31% pada torsi maksimum, masih berada di bawah 42,9% yang dilaporkan Kora dkk. [9] dan di bawah batas atas rentang 29 – 85% pada tinjauan Maika dkk. [2]. Hasil ini membuktikan bahwa jumlah dan sudut *blade* bukan satu-satunya faktor penentu efisiensi turbin *vortex* melainkan optimasi geometri *basin* tetap diperlukan untuk mencapai efisiensi yang lebih tinggi. Kontribusi ilmiah utama penelitian ini adalah menetapkan

konfigurasi *runner* optimal, yaitu 8 *blade* dengan sudut 10° , sebagai *baseline* bagi optimasi geometri *basin* pada penelitian selanjutnya.

Penelitian ini memiliki tiga keterbatasan. Pertama, simulasi hanya dijalankan pada kondisi *steady-state* sehingga fenomena transien, seperti fluktuasi *vortex* dan efek *start-up*, belum tertangkap. Kedua, model turbulensi *k- ω Standard* hanya tervalidasi pada rentang debit dan torsi yang diuji. Ketiga, geometri *basin* dipertahankan konstan sehingga interaksi antara jumlah dan sudut *blade* dengan parameter *basin*, seperti rasio *runner-to-basin*, sudut *notch*, dan bentuk *basin*, belum dieksplorasi secara simultan. Ketiga keterbatasan ini menjadi arah pengembangan pada penelitian selanjutnya

4. KESIMPULAN

hasil Penelitian ini menunjukkan bahwa sudut kemiringan *blade* merupakan parameter geometris paling dominan dalam menentukan efisiensi turbin *vortex ultra-low head*, dengan pengaruh jumlah *blade* yang bersifat memperkuat. Dari sembilan konfigurasi yang diuji, konfigurasi *blade* 8 dengan sudut kemiringan 10° terbukti paling optimal ditinjau dari nilai efisiensi, secara konsisten unggul diseluruh rentang torsi 0,65 – 2,45 N/m: efisiensi 22,5% pada torsi minimum dan 31% pada torsi maksimum. Sebaliknya, konfigurasi *blade* 4 sudut 0° secara sistematis menghasilkan efisiensi terendah 13% dan 21,28% pada torsi minimum dan maksimum, dengan selisih 9 – 10 poin persentase yang konsisten terhadap konfigurasi terbaik. Konfigurasi *blade* 8 sudut 10° juga menghasilkan kecepatan aliran tertinggi (hingga 140 m/s) dan gaya dorong (*force*) terbesar (hingga 295 N), yang secara mekanistik konsisten dengan perannya dalam memaksimalkan komponen tangensial pusaran *vortex* yang diserap sudu. hasil ini membuktikan bahwa peningkatan jumlah *blade* yang dikombinasikan dengan sudut kemiringan yang tepat mampu meningkatkan penangkapan komponen *tangensial* aliran *vortex*, sehingga transfer energi dari fluida ke *runner* menjadi lebih efektif. kontribusi ilmiah utama penelitian ini terletak pada analisis pengaruh gabungan jumlah dan sudut *blade* secara simultan terhadap distribusi aliran, gaya, torsi, dan efisiensi, sehingga memberikan pemahaman yang lebih komprehensif dibandingkan penelitian sebelumnya yang umumnya hanya memvariasikan salah satu parameter. Secara praktis, konfigurasi 8 *blade* dengan sudut 10° dapat dijadikan sebagai acuan desain awal (*preliminary design guideline*) dalam pengembangan *runner* turbin *vortex* untuk sistem pembangkit listrik *mikrohidro* pada kondisi *head* sangat rendah, sekaligus menjadi *baseline* untuk penelitian lanjutan melalui optimasi geometri *basin*, simulasi kondisi transien, dan validasi eksperimental.

REFERENCES

- [1] M. Shohibun Amin, K. Suharno, H. Santosa Budiono, and Safi'i Muhamad, "ANALISIS VARIASI BASIN TURBIN REAKSI VORTEX ULTRA LOW-HEAD SUDU AKSIAL MENGGUNAKAN METODE CFD," *Momentum*, vol. 20, no. 2, pp. 195–205, Oct. 2024, doi: <http://dx.doi.org/10.36499/jim.v20i1.12100>.
- [2] N. Maika, W. Lin, and M. Khatamifar, "A Review of Gravitational Water Vortex Hydro Turbine Systems for Hydropower Generation," Jul. 15, 2023, *Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*. doi: <https://doi.org/10.3390/en16145394>.
- [3] X. Zhou, Z. Liu, S. Zou, B. Yang, and Z. Yu, "Performance Optimization and Vortex Analysis of a Micro-Head Dual-Duct Hydraulic Turbine," *Energies (Basel)*, vol. 19, no. 4, pp. 2–19, Feb. 2026, doi: <https://doi.org/10.3390/en19040968>.
- [4] M. M. Shamsuddeen, S. B. Ma, N. H. Park, K. M. Kim, and J. H. Kim, "Design analysis and optimization of a hydraulic gate turbine for power production from ultra-low head sites," *Energy*, vol. 275, pp. 0360–5442, Jul. 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.127371>.
- [5] M. M. Shamsuddeen, D. A. Nguyen, and J.-H. Kim, "Parametric Study of a Fixed-blade Runner in an Ultra-low-head Gate Turbine," *New & Renewable Energy*, vol. 20, no. 1, pp. 116–125, Mar. 2024, doi: <https://doi.org/10.7849/ksnre.2024.2015>.
- [6] A. Merfo Amsal and M. M. Ayalew, "Analytical analysis and CFD Modeling of the Effect of Turbine Shaft Diameter in Small-Scale Cross-Flow Hydro Turbine," Debre Markos University, May 2026. doi: <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.6731668>.
- [7] V. Raja *et al.*, "Multi-parametric investigations on gravitational vortex hydropower system (GVHPS) using computational hydrodynamic analysis: a verified computational procedure-based investigation," *International Journal of Low-Carbon Technologies*, vol. 18, pp. 13–30, Jan. 2023, doi: <https://doi.org/10.1093/ijlct/ctac124>.
- [8] F. Ashar, M. Furkon Hakim, and Sunaryo, "PERFORMANCE OF VORTEX TURBINES IN ULTRA-LOW-HEAD HYDROELECTRIC POWER PLANTS: A NUMERICAL STUDY," *Clean Energy and Smart Technology*, vol. 04, no. 01, pp. 29–38, Oct. 2025, doi: <https://doi.org/10.58641/cest.v4i1.171>.

- [9] A. T. Kora, V. R. Ancha, and G. S. Tibba, "Numerical analysis of the effect of runner-to-basin diameter ratio on the performance of gravitational water vortex turbine in a scroll basin," *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, vol. 13, no. 4, pp. 1317–1333, May 2022, doi: <https://doi.org/10.1007/s40095-022-00495-4>.
- [10] R. A. Subekti, B. Prawara, A. Susatyo, A. Fudholi, S. K. Wijaya, and A. Sudarmaji, "Design and performance of very low head water turbines using a surface vorticity model algorithm," *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*, vol. 13, no. 2, pp. 1140–1149, Jun. 2022, doi: <https://doi.org/10.11591/ijpeds.v13.i2.pp1140-1149>.
- [11] T. R. Subedi, S. R. Shakya, and S. Bhattarai, "Innovative use of toroidal geometry in low-head hydropower applications: CFD analysis for turbine design and performance evaluation," *Energy Reports*, vol. 15, pp. 2352–4847, Jun. 2026, doi: <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2026.109070>.
- [12] D. De Tavernier, C. Ferreira, A. Viré, B. LeBlanc, and S. Bernardy, "Controlling dynamic stall using vortex generators on a wind turbine airfoil," *Renew. Energy*, vol. 172, pp. 1194–1211, Mar. 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.03.019>.
- [13] M. Manolesos, L. Chng, N. Kaufmann, P. Ouro, D. Ntouras, and G. Papadakis, "Using vortex generators for flow separation control on tidal turbine profiles and blades," *Renew. Energy*, vol. 205, pp. 1025–1039, Feb. 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.02.009>.
- [14] H. Moon, J. Jeong, S. Park, K. Ha, and J. H. Jeong, "Numerical and experimental validation of vortex generator effect on power performance improvement in MW-class wind turbine blade," *Renew. Energy*, vol. 212, pp. 443–454, Apr. 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.04.104>.
- [15] K. Brown, D. Houck, D. Maniaci, C. Westergaard, and C. Kelley, "Accelerated Wind-Turbine Wake Recovery Through Actuation of the Tip-Vortex Instability," *AIAA Journal*, vol. 60, no. 5, pp. 3298–3310, Feb. 2022, doi: <https://doi.org/10.2514/1.J060772>.
- [16] M. Safi, N. Sinaga, and S. Amin, "INVESTIGASI MODEL NUMERIK TURBIN REAKSI VORTEX ULTRA-LOW HEAD DENGAN MEMVARIASIKAN JUMLAH GRID DAN METODE PEMECAHAN SOLUSI," *JURNAL DEVICE*, vol. 14, no. 2, pp. 225–235, Nov. 2024.
- [17] Suarda Made, Sucipta Made, Wahyuni Anindya Rika Putu Ni, and Dewi Restia Ketut Ni, "Kajian Parameter Optimal Desain Turbin Vortex Pada Head Sangat Rendah," Bali, indonesia, Nov. 2023.
- [18] D. L. Zariatin and T. Susilo, "Analisis Water Turbin Vortex Terhadap Output Putaran Serta Daya Yang Dihasilkan Pada Pembangkit Listrik Tenaga Pico Hydro," jakarta, Jul. 2021.