

Investigasi Numerik Daya Turbin Vortex Ultra-Low Head dengan Mempertimbangkan Konfigurasi Jumlah dan Sudut Sudu

Aan Burhanudin ^{1*}, Muhamad Safi'i ¹, Bambang Hadi Kunaryo ², Ganang Setyawan ¹, Hisyam Ma'mun ¹, Althesa Androva ¹, Hanif Habiburrohman ¹, Muhammad Ridho Al Hafidz ¹, Syahrul Huda Mauludana ¹, Galang Yuliawan ¹, Ghazy Tara Tsaqif ²

¹ Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik dan Informatika, Universitas Persatuan Guru Republik Indonesia Semarang, 50232, Indonesia.

² Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik dan Informatika, Universitas Persatuan Guru Republik Indonesia Semarang, 50232, Indonesia.

INFORMASI ARTIKEL

Diterima Redaksi: 18 September 2026
Revisi Akhir: 12 Oktober 2026
Diterbitkan Online: 13 Oktober 2026

KATA KUNCI

CFD
Daya
Turbin
Vortex

KORESPONDENSI (*)

Phone: +62 813-2682-3586
E-mail: aanburhanudin@upgris.sc.id

A B S T R A K

Kebutuhan energi terbarukan skala mikro mendorong pengembangan turbin vortex gravitasi (*Gravitational Water Vortex Turbine*) sebagai solusi pemanfaatan potensi hidro pada kondisi *ultra-low head* (<1 m) yang selama ini belum dimanfaatkan secara optimal. Penelitian ini bertujuan mengkaji pengaruh jumlah sudu (4, 6, dan 8) serta sudut kemiringan sudu (0°, 5°, dan 10°) terhadap effisiensinya dengan pendekatan numerik *Computational Fluid Dynamics* (CFD) berbasis metode *finite volume*, model turbulensi *k- ω Standard*, dan pemodelan multifase *Volume of Fluid* (VOF). Hasilnya, peningkatan jumlah sudu dan sudut kemiringan sudu secara konsisten meningkatkan nilai debit dan daya keluaran turbin, dengan konfigurasi 8 blade sudut 10° menghasilkan performa tertinggi mendapatkan daya 65,6 W. Temuan ini berkontribusi pada pengetahuan ilmiah dengan membantu menyempurnakan desain turbin pusaran untuk ketinggian jatuh air yang rendah, serta menjadi rekomendasi bagi pengembangan purwarupa fisik dan studi numerik lebih lanjut yang bertujuan mengintegrasikan saluran irigasi sawah sebagai sumber energi mandiri bagi sistem irigasi cerdas otomatis.

PENDAHULUAN

Kebutuhan energi listrik terus meningkat seiring pertumbuhan penduduk dan industrialisasi, sementara ketergantungan pada bahan bakar fosil menimbulkan masalah penipisan sumber daya, pemanasan global, dan polusi udara [1], [2]. Energi air merupakan salah satu sumber energi terbarukan paling andal pada 2023, kapasitas terpasang PLTA global mencapai 1.416 GW dengan produksi 4.185 TWh [3]. Namun, kapasitas tersebut didominasi oleh pembangkit skala besar yang berdampak signifikan terhadap lingkungan, sedangkan potensi hidro skala *mikro* pada saluran irigasi, sungai kecil, dan *drainase* perkotaan ber-*head ultra-low* (<1 m) masih banyak yang belum dimanfaatkan [4], [5], padahal potensi global situs *ultra-low head* ini diperkirakan mencapai 151 GW [6].

Turbin konvensional (*Francis, Kaplan, Pelton*) dirancang untuk *head* menengah-tinggi, sehingga effisiensinya menurun drastis dan rentan terhadap kavitasi bila dipaksa bekerja pada *head* sangat rendah [5], [7]. Kondisi ini mendorong pengembangan turbin vortex gravitasi (*Gravitational Water Vortex Turbine/GWVT*), yang memanfaatkan pusaran air bebas (*free-surface vortex*) dalam *basin* untuk memutar *runner* [8], [9]. Teknologi ini menarik untuk daerah pedesaan atau terpencil karena biaya dan kompleksitas instalasi rendah, tanpa bendungan besar, dan relatif ramah ekosistem perairan [10], [11].

Berbagai penelitian telah mengoptimalkan performa GWVT dan turbin *ultra-low head* lainnya melalui variasi parameter geometris. Pada dimensi *basin*, Amin dkk [1] menemukan konfigurasi *inlet* 220 mm/*outlet* 120 mm memberi performa terbaik (debit 8,312 L/s, gaya 74,149 N). Pada parameter sudu, Ashar dkk [12] melaporkan 7 sudu (sudut tetap 15°) menghasilkan daya tertinggi 3,90 W dengan peningkatan gaya 6%, namun belum mengungkap interaksi jumlah sudut sudu karena sudut dibatasi tetap. Kora dkk [10] melaporkan efisiensi maksimum 42,9% pada rasio diameter *runner* dan *basin* 0,27. Rachmanto dkk [13] menunjukkan tinggi sudu 35% dari tinggi *basin* menghasilkan daya tertinggi 4,062 W (efisiensi 62,35%). Arifianti dkk [14], melalui pendekatan *CFD-Taguchi*, memperoleh torsi 628 N·m dan efisiensi 58,8%, meningkat 89% dari desain awal.

Pada jenis turbin *ultra-low head* lain, Shamsuddeen dkk [6] meningkatkan efisiensi *gate turbine* aksial sebesar 2,72%, sementara Subekti dkk [15] meningkatkan efisiensi turbin air 2,6% melalui model *surface vorticity*. Subekti dkk [7] mencapai efisiensi 86,8% (daya 573 W) pada optimasi geometri *airfoil runner very low head turbine* menggunakan algoritma *NSGA-II*. Zhou dkk [4] meningkatkan efisiensi turbin *dual-duct head mikro* dari 63,4% menjadi 75,05%. Suarda dkk [16] merangkum parameter desain optimum GWVT dan menguji prototipe berdaya 30 W, 180 rpm, efisiensi 49%. Secara lebih spesifik, Yuliawan dkk [17] mengkaji pengaruh jumlah *blade* (4, 6, 8) dan sudut kemiringan (0°, 5°, 10°) secara simultan melalui CFD berbasis *Volume of Fluid (VOF)* dan model turbulensi *k- ω Standard*, menemukan bahwa peningkatan jumlah dan sudut *blade* secara konsisten meningkatkan performa turbin, dari efisiensi 13, 15% (4 *blade*, 0°) menjadi 22,5% (8 *blade*, 10°) pada kecepatan aliran yang sama. Studi lain oleh Setyawan dkk. [18] turut menegaskan bahwa penambahan jumlah dan sudut *blade* secara simultan meningkatkan efisiensi turbin *vortex ultra low head* dari 13,15 % (4 *blade*, 0°) menjadi 31,91 % (8 *blade*, 12,5°) pada kecepatan aliran yang sama.

Dari sisi metodologi numerik, Safi'i dkk [19] menetapkan parameter CFD optimum (*grid* 513.810 sel, model *k- ϵ Standard*, metode *coupled*) yang menghasilkan debit 8,38 L/s dan efisiensi 18,54%, menjadi acuan penting studi serupa. Relevansi kontrol pusaran juga tampak pada studi aerodinamika turbin angin dan pasang surut: De Tavernier dkk [20] menunjukkan *vortex generator (VG)* menunda *dynamic stall* pada *airfoil*; Manolesos dkk [21] melaporkan VG berprofil rendah meningkatkan koefisien daya hingga 1,05% (*tip speed ratio* $\lambda = 3$) pada turbin pasang surut; dan Moon dkk. [22] memvalidasi di lapangan bahwa VG meningkatkan daya 4,83% dan *annual energy production (AEP)* 1,87% pada turbin angin skala MW menegaskan bahwa rekayasa perilaku pusaran melalui modifikasi geometri pasif adalah strategi kunci optimalisasi transfer energi kinetik. Selain itu, Amsal dan Ayalew [23] menemukan bahwa diameter poros turbin *cross-flow* memengaruhi performa, di mana efisiensi menurun dari 96,81% (tanpa poros) menjadi 90,8% (poros 40 mm) akibat *wake* dan turbulensi, sehingga direkomendasikan rasio diameter poros 10–12% dari diameter *runner*.

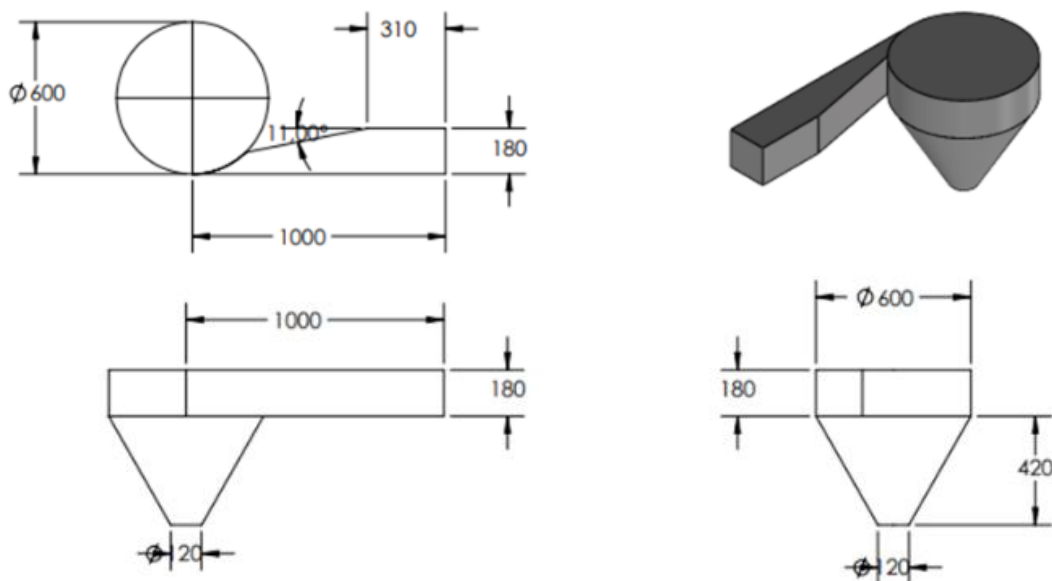
Temuan-temuan tersebut menegaskan bahwa performa turbin *vortex/ultra-low head* sangat dipengaruhi oleh parameter geometris dimensi *basin*, jumlah dan bentuk sudu, sudut sudu, rasio diameter *runner-basin*, tinggi sudu, hingga diameter poros dan optimasinya terbukti meningkatkan efisiensi dan daya. Namun, sebagian besar penelitian masih bersifat parsial, hanya berfokus pada satu atau dua parameter desain, sehingga korelasi menyeluruh antar-parameter geometris terhadap performa turbin pada *head* sangat rendah belum sepenuhnya terungkap. Berdasarkan kesenjangan tersebut, penelitian ini bertujuan mengkaji lebih lanjut pengaruh parameter desain terhadap performa turbin *vortex ultra-low head* dengan kecepatan aliran 23,13 m/s, 26,37 m/s, 33,6 m/s, dan 33,63 m/s yang di optimasi terhadap variasi jumlah *blade* sebesar 4, 6, dan 10 serta sudut kemiringan *blade* sebesar 0°, 5°, dan 10° guna mencari desain turbin mikrohidro optimal sebagai daya mandiri irigasi pintar sekaligus memajukan teknologi energi air efisien di Indonesia.

METODOLOGI

Model Geometri

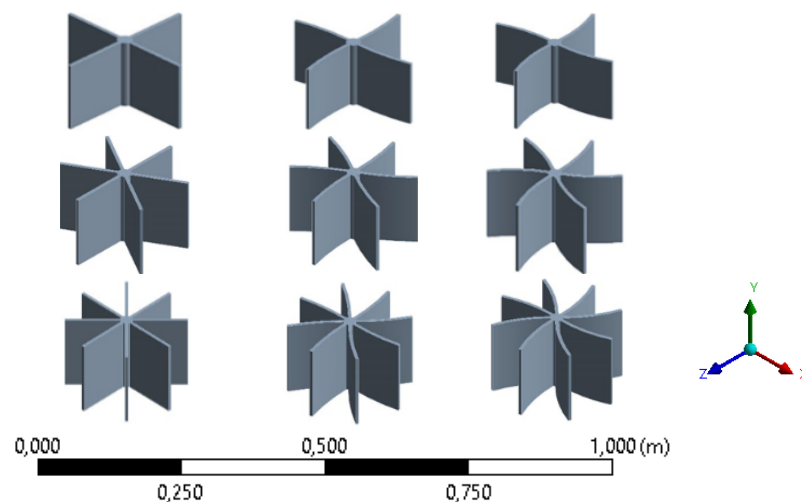
Konfigurasi geometri turbin *vortex ultra low-head* yang digunakan dalam penelitian ini disajikan pada Gambar 1, meliputi pandangan depan, samping, atas, serta model tiga dimensi (3D) secara keseluruhan. Pemodelan geometri dilakukan menggunakan perangkat lunak *Computer-Aided Design (CAD) SolidWorks*, dengan struktur turbin terdiri atas dua komponen utama, yaitu *basin* dan *blade*. Pada penelitian ini, variasi geometri saluran *basin* ditetapkan pada dimensi *inlet* 180 mm dan *outlet* 120 mm. Gambar 2 menunjukkan model 3D komponen *blade* dengan spesifikasi geometris diameter *shaft* ($R = 10$ mm), diameter putar *blade* ($R = 200$ mm), ketebalan 5 mm, dan tinggi 120 mm. Variasi desain difokuskan pada dua parameter utama, yaitu jumlah *blade* (4, 6, dan 8) serta sudut kemiringan *blade* (0°, 5°, dan 10°). Penentuan rentang variasi tersebut didasarkan pada studi terdahulu oleh M. Safi'i [19], yang membatasi jumlah *blade* hanya pada satu variasi (3 *blade*) dengan sudut kemiringan tetap. Dengan memperluas kombinasi jumlah dan sudut *blade* secara

simultan, penelitian ini diharapkan dapat mengungkap konfigurasi *runner* yang lebih optimal dibandingkan dengan penelitian-penelitian sebelumnya [1], [19]



Gambar 1. Geometri *Turbine Vortex Ultra Low Head*.

Pembuatan geometri sudu turbin juga dilakukan dengan menggunakan *software SolidWorks* dengan memanfaatkan fitur *Loft* atau *Boundary Boss/Base* dengan menghubungkan beberapa kurva profil *airfoil* di ketinggian yang berbeda (*hub* hingga *shroud*) yang dijelaskan oleh Gambar yang merupakan kombinasi variasi jumlah sudu (4, 6, dan 8) dan sudut sudu (0° , $7,5^\circ$, dan $12,5^\circ$) yang di usulkan dalam riset ini.

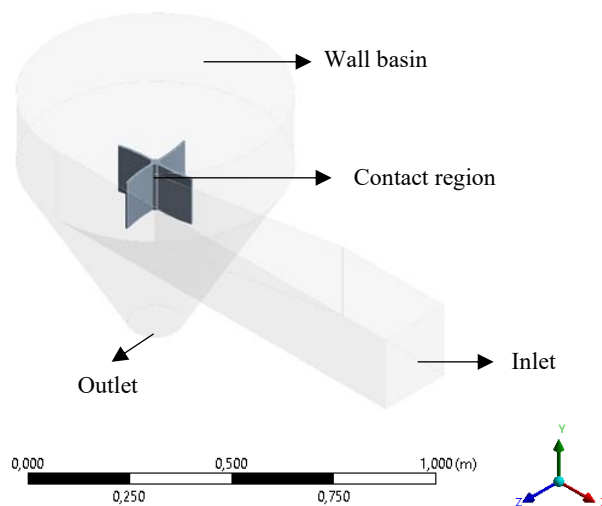


Gambar 2. Geometri *Blade*.

Studi Numerik

Domain Komputasi

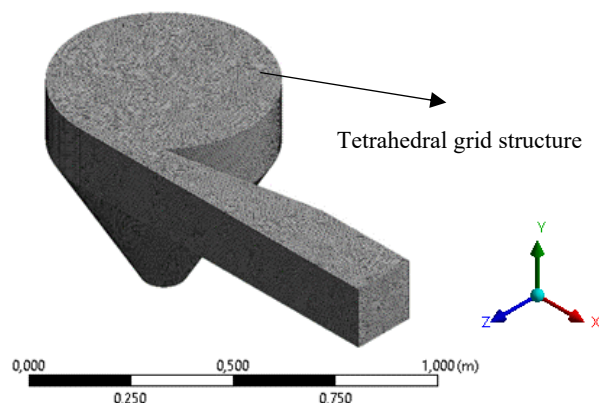
Domain komputasi pada penelitian ini didiskritisasi menggunakan pendekatan *finite volume method* untuk menyelesaikan persamaan-persamaan pengatur aliran, dengan skema *first-order upwind* diterapkan guna mendukung akurasi solusi numerik yang dihasilkan. Perancangan geometri domain komputasi dilakukan melalui pendekatan *Computational Fluid Dynamics* (CFD) dengan pemodelan multifase *Volume of Fluid* (VOF), yang mempertimbangkan interaksi dua jenis material dalam sistem, yaitu material fluida dan material *solid*, sesuai dengan karakteristik studi numerik yang ditinjau. Domain komputasi dirancang dengan panjang total 1000 mm, diameter *inlet* 180 mm, diameter *outlet* 120 mm dan dilengkapi takik saluran sepanjang 480 mm dengan sudut takik sebesar 11° . *Basin* dirancang berbentuk kerucut memakai diameter bagian atas 600 mm dan tinggi pada *basin* 600 mm, dan sudut kerucut sebesar 23° . *Runner turbine vortex* diposisikan pada jarak 12/60 bagian atas *basin*. Adapun penentuan lokasi serta konfigurasi kondisi batas (*boundary condition*) pada domain komputasi turbin *vortex ultra-low head* secara lengkap ditunjukkan pada Gambar 3.

Gambar 3. Domain Komputasi *Turbine Vortex Ultra Low Head*.

Meshing

Proses pembuatan *mesh* dilakukan dengan mempertimbangkan jenis topologi *automatic (tetrahedral)* serta pengaturan ukuran sel (*sizing cell*), dengan tahapan *meshing* dijalankan melalui pendekatan *Computational Fluid Dynamics (CFD)* menggunakan pemodelan multifase *Volume of Fluid (VOF)*. Ukuran dan jenis *mesh* yang digunakan berpengaruh signifikan terhadap tingkat akurasi dan kualitas hasil simulasi, sehingga dalam penelitian ini dipilih jenis *mesh tetrahedral* karena kemampuannya mengoptimalkan jumlah *grid* sekaligus mereduksi *computational cost* [19]. Pembuatan *mesh* dilakukan dengan ukuran *sizing cell* sebesar 1 mm pada bagian *blade* turbin dan 2 mm pada bagian *basin*, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4. Tahapan *meshing* ini bertujuan untuk membagi domain simulasi menjadi elemen-elemen berukuran kecil, sehingga perhitungan numerik dapat dilakukan secara lebih akurat dan mampu menangkap perubahan aliran pada area *inlet*, *outlet*, *basin (wall)*, maupun *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* sebesar 0,99996 (*very good*), nilai *skewness* sebesar 0,9911 (*very good*), serta nilai *wall y^+* = 1. Capaian tersebut mengindikasikan bahwa *mesh* yang digunakan memiliki kualitas sangat baik, sehingga mampu menghasilkan solusi numerik yang stabil dan representatif. Diskritisasi persamaan pengatur dilakukan menggunakan pendekatan berbasis volume kontrol (*finite volume method*) dengan skema *first-order upwind*, yang dipilih karena mampu memberikan tingkat akurasi memadai dengan waktu komputasi yang relatif lebih efisien. Domain komputasi didiskritisasi menggunakan *grid tetrahedral* yang tersusun secara terstruktur penuh, dengan resolusi 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. Struktur *Mesh Tetrahedral*.

Kualitas *mesh* dianggap baik apabila nilai *Orthogonal quality* > 0,1, *Max skewness* < 0,95, dan *Wall y^+* < 1 [19]. Penyelesaian persamaan kontinuitas dan persamaan *Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS)* dilakukan menggunakan model viskos

k- ω Standard, yang dipilih karena kemampuannya menghasilkan solusi numerik secara cepat, tepat, dan akurat, bergantung pada asumsi-asumsi yang mendasari model viskos tersebut. Persamaan pengatur (*governing equations*) untuk domain komputasi tiga dimensi (3D) pada turbin *vortex ultra-low head* dirumuskan dalam sistem koordinat *Cartesian*. Adapun persamaan kontinuitas dan RANS tersebut dinyatakan dalam notasi tensor sebagai berikut:

Persamaan kontinuitas:

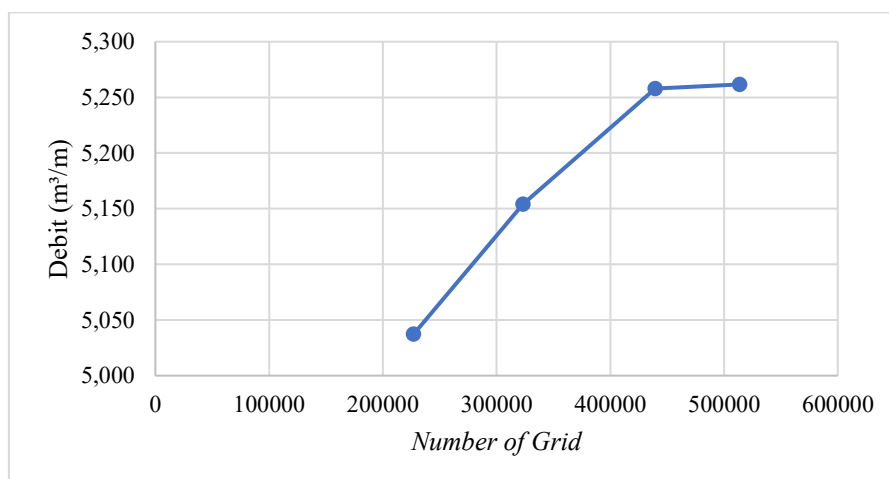
$$\frac{\partial(\alpha_k \rho_k)}{\partial t} + \nabla \alpha_k \rho_k v_k = r_k \quad (1)$$

Persamaan momentum:

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

Uji Grid

Uji independensi *grid* (*grid independence test*) dilakukan untuk memperoleh titik optimum nilai debit hasil simulasi pada turbin *vortex ultra-low head*. Pengujian ini dilakukan dengan memvariasikan jumlah *cell mesh* pada domain komputasi, yaitu sebesar 227.187, 323.366, 439.499, dan 513.810 sel, dengan seluruh pengaturan simulasi mengacu pada skema eksperimen yang telah dilaporkan pada penelitian sebelumnya [19]. Hasil pengujian disajikan dalam bentuk grafik hubungan antara jumlah *grid* dan nilai debit pada Gambar 5, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 5. Berdasarkan hasil perhitungan, diperoleh kesalahan relatif sebesar $\pm 0,9\%$ antara *grid* 227.187 dan 323.366, $\pm 0,4\%$ antara *grid* 323.366 dan 439.499, serta $\pm 0,2\%$ antara *grid* 439.499 dan 513.810. Jumlah *grid* 513.810 ditetapkan sebagai konfigurasi paling optimum, mengingat penambahan jumlah *grid* pada tahap ini hanya menghasilkan perubahan nilai debit yang sangat kecil (dari 5,25 L/s menjadi 5,26 L/s), sehingga solusi numerik dapat dikategorikan konvergen. Berdasarkan hasil tersebut, 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, dengan nilai eksperimental digunakan sebagai acuan validasi.



Gambar 1. Nilai Jumlah *Grid* terhadap Debit pada Turbin *Vortex Ultra-Low Head*.

Set Up

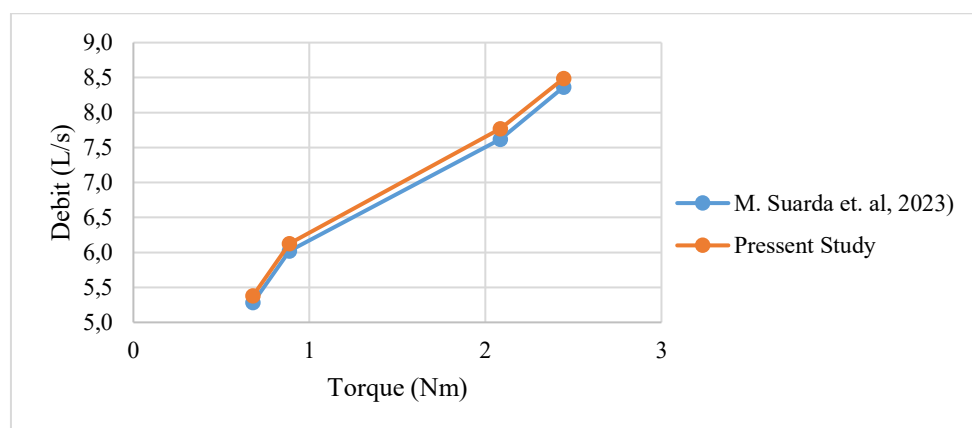
Setup simulasi disusun dengan mengacu pada skema eksperimen yang telah dilakukan oleh peneliti terdahulu [16]. Secara umum, aliran fluida berupa air dialirkan melalui saluran *inlet basin*, kemudian membentuk pusaran (*vortex*) di dalam *basin* sebelum melewati *runner* turbin menuju saluran *outlet*. Pada tahap *Design Modeler*, domain komputasi dibangun dengan mendefinisikan empat bagian utama, yaitu *inlet*, *outlet*, *wall basin*, dan *contact region* pada setiap komponen turbin reaksi *vortex ultra-low head* yang 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. Tahapan berikutnya dilakukan pada bagian *setup*. Model viskos yang digunakan adalah model turbulensi *k- ω*

Standard, dipilih karena kesesuaiannya dalam menganalisis karakteristik aliran fluida turbulen di dalam ruang turbin *vortex*.

Pada bagian material, ditambahkan *water liquid* sebagai fluida kerja yang digunakan dalam simulasi, sementara pada bagian *cell zone condition*, zona fluida ditetapkan sebagai *water liquid* dan zona material padat ditetapkan sebagai *aluminium (solid)*. Selanjutnya, pada bagian *boundary condition*, ditentukan parameter kecepatan aliran dan debit pada sisi *inlet* sesuai dengan variasi pengujian yang telah ditetapkan. Pada bagian *reference values*, nilai acuan dihitung menggunakan opsi *compute from inlet*, sehingga parameter referensi yang digunakan bersumber dari kondisi pada sisi masuk aliran. Pada bagian *methods*, skema penyelesaian yang diterapkan adalah model *Coupled*, dengan diskretisasi parameter *pressure* hingga *momentum* menggunakan metode *first-order upwind*. Setelah pengaturan metode numerik selesai, tahap berikutnya adalah proses inisialisasi (*initialization*) menggunakan *standard initialization* dengan opsi *compute from inlet*. Simulasi kemudian dijalankan melalui menu *run calculation* dengan jumlah literasi sebanyak 5000, dan proses perhitungan dilakukan hingga nilai *residual* menunjukkan kondisi konvergen, sehingga hasil simulasi dapat digunakan untuk tahap analisis selanjutnya.

Validasi

Validasi model numerik dilakukan dengan membandingkan hasil eksperimental (Ex) [16] dan numerik (*Num*) pada *mesh* optimum 513.810 elemen untuk empat variasi debit aliran, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 6. Kurva debit terhadap torsi dari kedua pendekatan menunjukkan tren dan besaran nilai yang hampir berimpit di seluruh rentang pengujian: debit eksperimental 5,28–8,36 L/s berbanding debit numerik 5,28–8,39 L/s, dengan kecepatan aliran identik pada rentang 23,13–36,63 m/s, menghasilkan kesalahan relatif di bawah 0,7% dengan nilai torsi tertinggi sebesar 8,36 Nm untuk eksperimen dan 8,46 Nm untuk studi numerik. Deviasi ini jauh berada di bawah batas toleransi 5% yang lazim diterima secara akademis untuk simulasi CFD pada sistem turbin hidrolik, sehingga model numerik yang dibangun terbukti mampu merepresentasikan fenomena fisik aktual secara akurat. Dengan demikian, konfigurasi numerik yang meliputi model turbulensi *k- ω Standard*, pemodelan multifase VOF, dan *mesh* 513.810 elemen dinyatakan tervalidasi dan digunakan sebagai acuan pada tahap simulasi selanjutnya untuk menganalisis pengaruh jumlah dan sudut *blade* terhadap performa turbin *vortex ultra-low head*, sekaligus sebagai *baseline* pembandingan terhadap konfigurasi optimum penelitian sebelumnya.



Gambar 2. Nilai Torsi (N/m) terhadap Nilai Debit (L/s).

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 [16]. 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* [16] 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:

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

HASIL DAN PEMBAHASAN

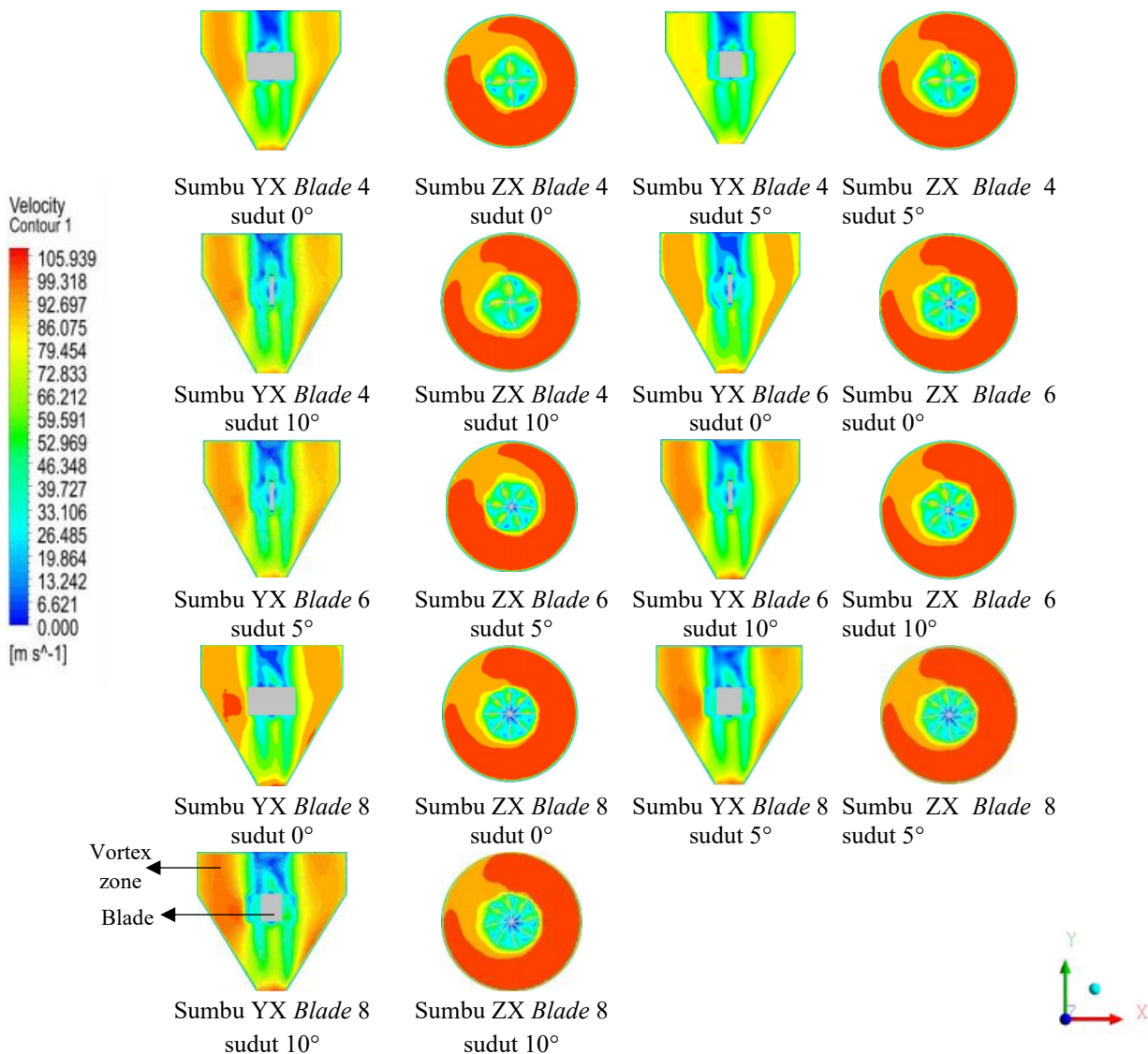
Karakteristik Aliran Fluida

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.

Karakteristik pola aliran fluida pada turbin tersebut memicu terjadinya separasi aliran (*flow separation*) serta menimbulkan perbedaan distribusi tekanan pada permukaan sudu (*blade*), yang selanjutnya berkontribusi terhadap timbulnya gaya hambat (*drag force*). Fenomena ini berdampak pada terganggunya kestabilan aliran fluida sehingga mendorong terbentuknya turbulensi. Selain itu, pusaran aliran (*vortex*) yang terbentuk akibat pengaruh momentum linear dalam bentuk gaya hidrostatik yang bekerja pada sudu berprofil ulir turut menyebabkan peningkatan gaya sentrifugal. Peningkatan gaya sentrifugal tersebut selanjutnya memberikan pengaruh positif terhadap besarnya energi yang mampu dikonversi oleh turbin.

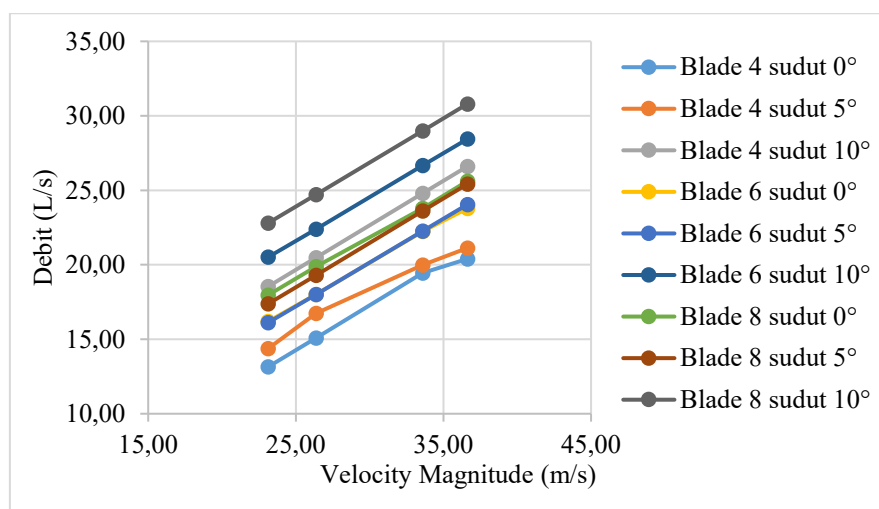
Pada Gambar 7, kecepatan aliran di dalam *basin* turbin menunjukkan kecenderungan peningkatan. Beberapa faktor teridentifikasi turut memengaruhi kecepatan arah pergerakan fluida pada turbin ini, di antaranya kemiringan sudut *basin*, tingkat kekasaran permukaan *basin*, serta dimensi dan konfigurasi geometris *basin* itu sendiri. Perubahan kecepatan arah aliran fluida umumnya dipicu oleh interaksi gesekan antarpartikel fluida, gesekan antara fluida dengan dinding *basin*, serta transfer gaya yang timbul akibat benturan (impak) fluida terhadap permukaan dinding *blade*. Aliran fluida terlihat relatif teratur ketika memasuki *basin*, namun pada saat mendekati area di sekitar *blade*, aliran tersebut mengalami transformasi menjadi gerak rotasi (*swirling flow*) sebelum akhirnya mengalir keluar melalui saluran *outlet basin*. Selain itu, karakteristik arah aliran turut dipengaruhi oleh besaran nilai viskositas, tekanan (Pa), densitas fluida, serta geometri sistem secara keseluruhan. Tingkat kompleksitas geometri *blade* berpotensi memicu terjadinya fenomena adveksi aliran

di sekitar permukaannya, sehingga separasi aliran dapat berkembang secara optimal pada area tersebut. Zona *vortex* pada aliran turbin (khususnya pada *Gravitational Water Vortex Turbine* / GWVT atau turbin air pusaran gravitasi) adalah area atau pusat dari gerakan air yang berputar berbentuk corong (*free-surface air-core vortex*) di dalam bak penampung (basin).



Gambar 7. Kontur Distribusi *Velocity* Pada Turbin *Vortex*

Gambar 8 menyajikan hasil simulasi numerik yang menunjukkan hubungan antara *velocity magnitude* terhadap debit numerik (*discharge*) pada turbin *vortex ultra-low head* dengan variasi jumlah *blade* (4, 6, dan 8) serta variasi sudut kemiringan sudu (0°, 5°, dan 10°), yang secara konsisten memperlihatkan pola linier positif, yakni peningkatan kecepatan aliran senantiasa diikuti oleh peningkatan debit pada seluruh konfigurasi yang diuji. Pada pengujian ini konfigurasi *blade* 8 dengan sudut 10° terbukti menghasilkan performa debit tertinggi yaitu 22,81–30,80 L/s, sementara konfigurasi *blade* 4 dengan sudut 0° menghasilkan debit terendah pada kisaran 13,15–20,40 L/s, sehingga dapat dipastikan bahwa penambahan jumlah *blade* dan pembesaran sudut kemiringan sudu berperan langsung dalam memperluas bidang tangkap (*capture area*) terhadap momentum fluida sehingga energi kinetik aliran terkonversi lebih optimal menjadi energi mekanik pada poros turbin, yang dengan demikian menegaskan bahwa jumlah *blade* dan sudut kemiringan sudu merupakan parameter desain determinan dalam meningkatkan efektivitas dan kapasitas debit turbin *vortex ultra-low head*. Tahapan yang dilalui dalam penelitian, pembangunan konsep, atau penyelesaian kasus, dituliskan pada bagian metodologi.



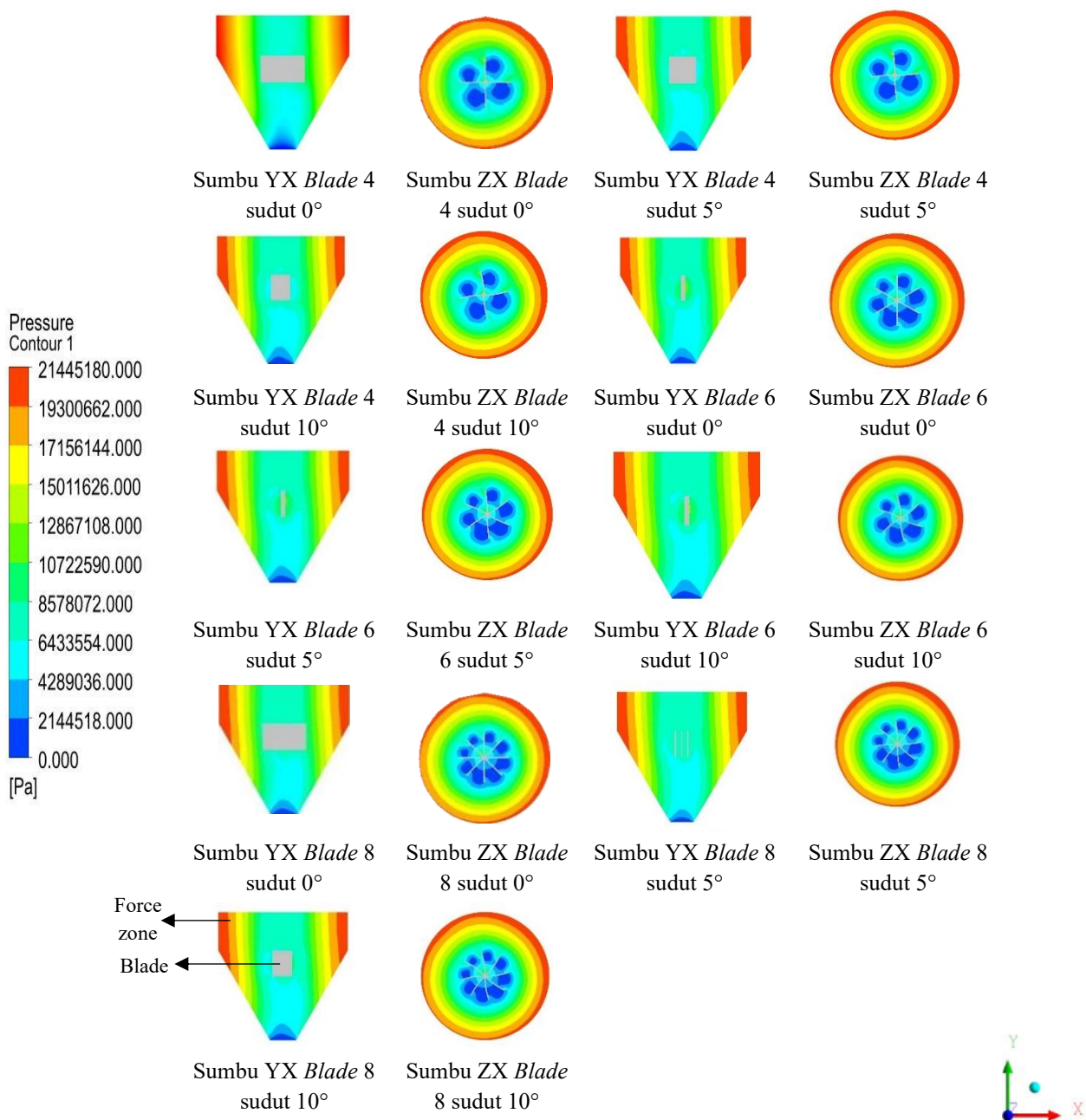
Gambar 8. *Velocity Magnitude* (m/s) terhadap Debit (L/s).

Pengaruh Jumlah dan Sudut Blade

Proses optimisasi turbin vortex *ultra-low head* dilaksanakan melalui pendekatan numerik dengan memvariasikan jumlah *blade* serta sudut kemiringannya guna memperoleh konfigurasi paling optimum. Kedua parameter variasi tersebut memiliki keterkaitan yang erat terhadap hasil pengolahan data dalam simulasi numerik yang dilakukan. Variasi yang diajukan dalam penelitian ini meliputi jumlah *blade* (4, 6, dan 8) serta sudut tumbukan sebesar 0°, 5°, dan 10°. Pengambilan data serta visualisasi *contour* pada studi numerik ini dilakukan pada kondisi turbin beroperasi secara tunak (*steady state*), dengan tujuan agar distribusi kontur yang dihasilkan dapat terdistribusi secara merata. Variasi jumlah dan sudut *blade* tersebut juga terbukti memberikan pengaruh yang signifikan terhadap parameter kecepatan, debit, serta tekanan (Pa), dengan kecenderungan pengaruh yang semakin meningkat seiring bertambahnya jumlah *blade* dan besarnya sudut kemiringan. Penambahan jumlah *blade* terbukti mampu meningkatkan performa turbin, mengingat pemanfaatan aliran radial dan aksial dapat dioptimalkan untuk menghasilkan transfer momentum pada *runner*, sehingga kinerja turbin dapat meningkat meskipun beroperasi pada kondisi dan mekanisme kerja yang identik.

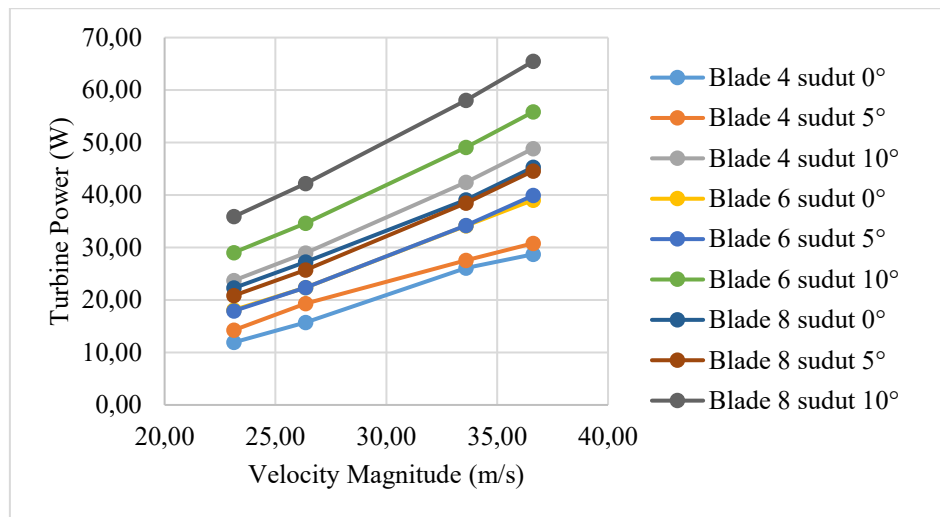
Performa turbin dipengaruhi oleh sejumlah variabel, di antaranya tekanan vakum, konfigurasi susunan *blade*, serta kondisi fluida air yang mengalir masuk maupun keluar dari turbin. Selain parameter kecepatan (*velocity*), studi numerik ini juga menunjukkan bahwa variasi jumlah dan sudut *blade* memberikan pengaruh terhadap peningkatan tekanan pada turbin. Tekanan fluida teramati mengalami akumulasi di sekitar dinding *basin*, kemudian mengalami penurunan secara bertahap seiring mendekati area *blade*. Fenomena penurunan tekanan tersebut disebabkan oleh terjadinya separasi aliran yang memicu timbulnya adveksi di sekitar permukaan *blade*. Distribusi tekanan pada kondisi tunak (*steady state*) tersebut ditampilkan pada Gambar 9. Berdasarkan hasil simulasi numerik, besaran tekanan yang dihasilkan berada pada rentang 498.055 Pa hingga 1.276.145 Pa. Hasil studi turut menunjukkan bahwa konfigurasi 8 *blade* dengan sudut 10° menghasilkan nilai tekanan tertinggi dibandingkan dengan variasi lainnya. Kondisi tekanan yang optimal ini diharapkan dapat berkontribusi secara langsung terhadap peningkatan daya keluaran (*output power*) turbin.

Gambar 10 menyajikan hasil simulasi numerik yang menunjukkan hubungan antara *velocity magnitude* terhadap daya keluaran turbin (*turbine power*) pada turbin reaksi vortex *ultra-low head*, dengan variasi jumlah *blade* (4, 6, dan 8) serta variasi sudut kemiringan sudu (0°, 5°, dan 10°). Hasil simulasi secara konsisten memperlihatkan hubungan linier positif antara kecepatan aliran fluida dan daya yang dihasilkan turbin, di mana peningkatan *velocity magnitude* senantiasa diikuti oleh peningkatan daya keluaran pada seluruh konfigurasi yang diuji. Konfigurasi *blade* 8 dengan sudut 10° terbukti menghasilkan performa tertinggi, dengan daya berkisar antara 35,6 W hingga 65,6 W, sedangkan konfigurasi *blade* 4 dengan sudut 0° menghasilkan daya terendah, yakni pada rentang 12,1 W hingga 28,6 W pada rentang kecepatan yang sama. Perbedaan signifikan ini menegaskan bahwa penambahan jumlah *blade* serta pembesaran sudut kemiringan sudu memberikan pengaruh nyata terhadap peningkatan kapasitas daya yang mampu dibangkitkan oleh turbin.

Gambar 9. Kontur Distribusi *Pressure* pada Turbin *Vortex Ultra-Low Head*.

Fenomena tersebut dapat dijelaskan secara tegas melalui prinsip bahwa penambahan jumlah *blade* dan pembesaran sudut kemiringan sudu secara langsung memperluas bidang tangkap (*capture area*) terhadap momentum fluida yang mengalir, sehingga energi kinetik aliran terkonversi secara lebih optimal menjadi energi mekanik pada poros turbin, yang pada akhirnya termanifestasi sebagai peningkatan daya keluaran (*power output*). Dengan demikian, dapat dipastikan bahwa jumlah *blade* dan sudut kemiringan sudu merupakan parameter desain yang determinan dalam menentukan efektivitas kinerja turbin vortex *ultra-low head*, dan konfigurasi 8 *blade* dengan sudut 10° dapat dinyatakan sebagai desain paling optimum untuk memaksimalkan daya yang dibangkitkan pada berbagai kondisi kecepatan aliran.

Gaya (*force*) pada aliran fluida di turbin terutama dihasilkan oleh gaya dorong (*drag force*), gaya angkat (*lift force*), dan gaya gravitasi (*gravitational force*) yang bekerja pada sudu-sudu (*blades*) turbin untuk mengubah energi fluida menjadi energi mekanik. Zona reaksi (*lift-driven zone*) terjadi dimana sudu turbin dirancang dengan profil aerodinamis (*airfoil*). Ketika fluida mengalir di sekitarnya, tercipta perbedaan tekanan antara sisi atas dan bawah sudu. Perbedaan tekanan ini memicu gaya angkat (*lift force*) yang memutar roda turbin. Contohnya adalah Turbin Kaplan atau turbin angin tipe Darrieus.



Gambar 10. *Velocity Magnitude (m/s) Terhadap Turbine Power (W).*

KESIMPULAN

Penelitian ini bertujuan mengkaji pengaruh jumlah *blade* (4, 6, dan 8) serta sudut kemiringan sudu (0° , 5° , dan 10°) terhadap effisiensinya dengan pendekatan numerik *Computational Fluid Dynamics* (CFD) berbasis metode *finite volume*, model turbulensi *k- ω Standard*, dan pemodelan multifase *Volume of Fluid* (VOF) telah dilakukan. Hasilnya, peningkatan jumlah *blade* dan sudut kemiringan sudu secara konsisten meningkatkan nilai debit dan daya keluaran turbin, dengan konfigurasi 8 *blade* sudut 10° menghasilkan performa tertinggi mendapatkan daya 65,6 W. Temuan ini berkontribusi pada pengetahuan ilmiah dengan membantu menyempurnakan desain turbin pusaran untuk ketinggian jatuh air yang rendah, serta menjadi rekomendasi bagi pengembangan purwarupa fisik dan studi numerik lebih lanjut yang bertujuan mengintegrasikan saluran irigasi sawah sebagai sumber energi mandiri bagi sistem irigasi cerdas otomatis. Rancang bangun dan pengujian eksperimen perlu dilakukan untuk membuktikan dan memvalidasi bukti empiris apakah temuan parameter dalam studi numerik sudah optimal dilakukan.

UCAPAN TERIMA KASIH

LPPM Universitas Persatuan Guru Republik Indonesia Semarang.

Jl. Sidodadi Timur No. 24 / Jl. Lontar No. 1, Kelurahan Karangtempel, Kecamatan Semarang Timur, Kota Semarang, Jawa Tengah (50125).

Laboratorium Terpadu Fakultas Teknik dan Informatika Universitas Persatuan Guru Republik Indonesia Semarang.

Jl. Gajah Raya No.40, Sambirejo, Gayamsari, Semarang, Jawa Tengah 50166.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. Shohibun Amin *et al.*, "ANALISIS VARIASI BASIN TURBIN REAKSI VORTEX ULTRA LOW-HEAD SUDU AKSIAL MENGGUNAKAN METODE CFD," *Momentum*, vol. 20, no. 2, pp. 195–205, 2024, doi: 10.36499/jim.v20i1.12100.
- [2] L. Fitriana, H. Saputro, A. Purwanto, D. S. Huda, and R. Muslim, "MATHEMATICS MODELLING AND EXPERIMENTAL STUDY THE EFFECT OF VORTEX WATER TURBINE BLADE DESIGN OF TURBINE EFFICIENCY," *Jurnal Rekayasa Mesin*, vol. 16, no. 1, pp. 401–414, Apr. 2025, doi: 10.21776/jrm.v16i1.1899.
- [3] N. Maika, M. Khatamifar, and W. Lin, "Numerical Study on the Performance of a Gravitational Water Vortex Hydro-Turbine System with a Cylindrical Basin," *Energies (Basel)*, vol. 19, no. 5, Mar. 2026, doi: 10.3390/en19051334.
- [4] 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, Feb. 2026, doi: 10.3390/en19040968.
- [5] 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, Jun. 2026, doi: 10.1016/j.egyr.2026.109070.
- [6] 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, Jul. 2023, doi: 10.1016/j.energy.2023.127371.

- [7] R. A. Subekti *et al.*, "Optimization of airfoil geometry using the NSGA-II method to improve the performance and efficiency of a very low head turbine," *Clean Energy*, vol. 10, no. 3, pp. 127–142, Jun. 2026, doi: 10.1093/ce/zkag024.
- [8] N. Maika, W. Lin, and M. Khatamifar, "A Review of Gravitational Water Vortex Hydro Turbine Systems for Hydropower Generation," Jul. 01, 2023, *Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*. doi: 10.3390/en16145394.
- [9] 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, 2023, doi: 10.1093/ijlct/ctac124.
- [10] 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, Dec. 2022, doi: 10.1007/s40095-022-00495-4.
- [11] A. S. Saleem *et al.*, "Parametric study of single-stage gravitational water vortex turbine with cylindrical basin," *Energy*, vol. 200, Jun. 2020, doi: 10.1016/j.energy.2020.117464.
- [12] F. Ashar and M. Furkon Hakim, "PERFORMANCE OF VORTEX TURBINES IN ULTRA-LOW-HEAD HYDROELECTRIC POWER PLANTS: A NUMERICAL STUDY," *Clean Energy and Smart Technology*, vol. 04, p. 1, 2025, doi: 10.58641/cest.v4i1.171.
- [13] T. Rachmanto, Mirmanto, and R. Lelio, "PENGARUH VARIASI TINGGI SUDU TURBIN DARI TINGGI BASIN TERHADAP DAYA DAN EFISIENSI TURBIN VORTEX," *Energy, Materials and Product Design*, vol. 3, no. 1, pp. 184–192, May 2024, doi: 10.29303/empd.v3i1.2275.
- [14] L. Sa'diyah Yuniar Arifianti *et al.*, "Enhancing the efficiency of a gravitational water vortex turbine through blade length and exit angle optimization," in *EPJ Web of Conferences*, EDP Sciences, Dec. 2025. doi: 10.1051/epjconf/202534401012.
- [15] 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: 10.11591/ijpeds.v13.i2.pp1140-1149.
- [16] M. Suarda, P. Rika, A. Wahyuni, N. Ketut, and R. Dewi, "Kajian Parameter Optimal Desain Turbin Vortex Pada Head Sangat Rendah," 2023.
- [17] G. Yulawan, M. Safi'i, and H. Ma'mun, "Sains dan Ilmu Terapan (media online) <https://utilityprojectsolution.org/ejournal/index.php/JuKSIT> Penerbit: Cv. Utility Project Solutio Optimasi Jumlah dan Sudut Blade Terhadap Perfoma Turbin Vortex Ultra Low-Head Berbasis Cfd", [Online]. Available: <https://utilityprojectsolution.org/ejournal/index.php/JuKSIT>
- [18] G. Setyawan, M. Safi, H. Ma, and E. Penulis Korespondensi, "(media online) <https://utilityprojectsolution.org/ejournal/index.php/JuKSIT> Penerbit: Cv. Utility Project Solutio Investigasi Numerik Efek Jumlah dan Sudut Blade terhadap Performa Turbine Vortex Ultra Low Head," *Jurnal Kolaborasi Sains dan Ilmu Terapan*, vol. 5, pp. 166–179, 2026, [Online]. Available: <https://utilityprojectsolution.org/ejournal/index.php/JuKSIT>
- [19] 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.
- [20] 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, Jul. 2021, doi: 10.1016/j.renene.2021.03.019.
- [21] 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, Mar. 2023, doi: 10.1016/j.renene.2023.02.009.
- [22] 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, Aug. 2023, doi: 10.1016/j.renene.2023.04.104.
- [23] 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." [Online]. Available: <https://ssrn.com/abstract=6731668>.