

Analisis Numerik Pengaruh Desain Kanal Inlet Terhadap Performansi Aliran Vortex pada *Gravitational Water Vortex Power Plant (GWVPP)*

Ni Putu Widya Laksmi Swastika dan Gunawan Nugroho
Departemen Teknik Fisika, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
E-Mail: gunawan@ep.its.ac.id

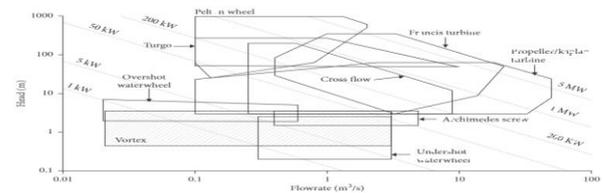
Abstrak—Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMh) berpotensi untuk dikembangkan di Indonesia. Kualitas aliran vortex dipengaruhi beberapa parameter, antara lain *kecepatan tangensial*, *vortex height*, dan *vortex strength*. Pada penelitian ini, dirancang 2 tipe kanal, yaitu tipe kanal tangensial dan tipe kanal *wrap around* pada dengan total 11 variasi sudut. Studi numerik menggunakan *Computational Fluid Dynamics (CFD)* dilakukan untuk menganalisis parameter terkait. Terdapat 4 variasi *flow rate* yang digunakan yaitu 0.002, 0.004, 0.006, dan 0.008 m³/s. Terdapat beberapa parameter yang ditinjau, yaitu *vortex height*, *air core*, kecepatan, dan *vortex strength*. Pada kanal tipe tangensial dengan *flow rate* 0.008 m³/s, didapatkan peningkatan *vortex height* pada tipe E (174°) dengan tipe F (tanpa deflektor, 180°) yaitu 1.15%. Sedangkan antara tipe A (152°) dengan tipe E, peningkatan *vortex height* sebesar 8.02%. Pada kanal *wrap around*, peningkatan *vortex height* pada tipe G (90°) dengan tipe K (180°) yaitu 11.49%. Kecepatan tangensial memengaruhi bagaimana kekuatan sirkulasi atau *vortex strength* dari suatu aliran. Semakin mendekati pusat aliran, maka nilainya semakin tinggi. Namun ketika berada di pusat basin ($r = 0$), nilai kecepatan tangensial akan bernilai mendekati 0. Berdasarkan simulasi yang telah dilakukan, didapatkan bahwa pada sudut masukan yang kecil menghasilkan kualitas aliran vortex yang lebih baik, karena terdapat peningkatan level ketinggian air. Sedangkan untuk perbandingan antar tipe kanal, didapatkan hasil bahwa kanal tipe *wrap around* menghasilkan kualitas aliran vortex karena aliran air memasuki basin secara melingkar, yang menciptakan pola aliran spiral dan mempermudah pembentukan vortex.

Kata Kunci—Basin Konikal, Kanal Wrap-Around, Kecepatan Tangensial, Sudut Kanal Masukan, *Vortex Height*.

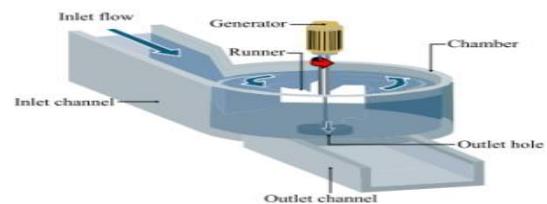
I. PENDAHULUAN

PERTUMBUHAN penduduk, peningkatan kebutuhan energi, serta menipisnya cadangan bahan bakar fosil memerlukan pembangkit listrik alternatif yang berkelanjutan (Hoes et al., 2017). Seiring dengan komitmen global dalam pengurangan emisi karbon, Pemerintah Indonesia terus mendorong peningkatan energi baru dan terbarukan dalam bauran energi primer. Target pemanfaatan Energi Baru dan Terbarukan (EBT) dalam bauran energi nasional adalah 23% pada tahun 2015 dan 31% pada tahun 2025. Pada tahun 2021, porsi bauran EBT di Indonesia baru mencapai 11,5%. Kontribusi persentase campuran tertinggi dalam bauran energi baru dan terbarukan diberikan oleh Pembangkit Listrik Tenaga Air, Pembangkit Listrik Tenaga Minihidro, dan Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro.

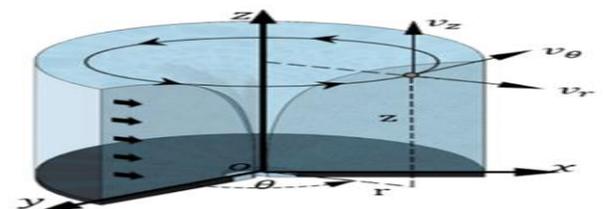
Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMh) berpotensi untuk dikembangkan di Indonesia dengan kapasitas daya yang dihasilkan tidak melebihi 100kW. Dari segi teknologi, PLTMh memiliki konstruksi yang sederhana, pengoperasiannya mudah, serta perawatan dan penyediaan



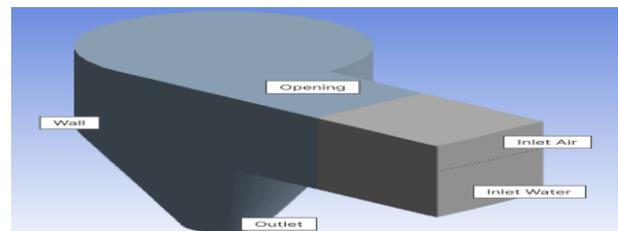
Gambar 1. Daerah operasi dari GWVPP.



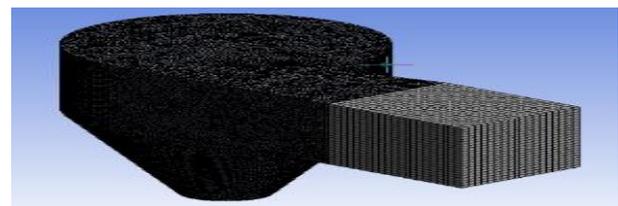
Gambar 2. Konfigurasi GWVPP.



Gambar 3. Sistem koordinat silinder pada fenomena vortex.



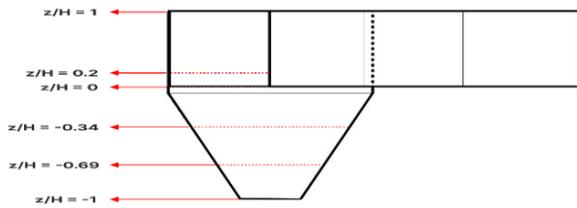
Gambar 4. *Boundary condition* pada geometri.



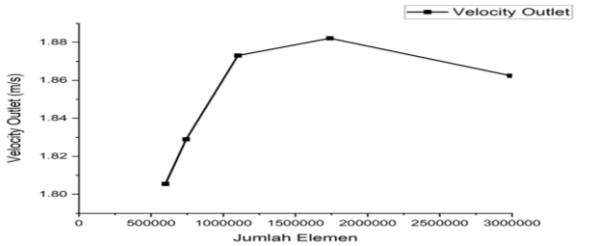
Gambar 5. hasil *meshing* pada geometri tipe D.

suku cadang tidak sulit. Secara ekonomi, biaya operasi dan perawatannya relatif murah sedangkan biaya investasinya cukup bersaing dengan pembangkit listrik lainnya. Secara sosial, PLTMh mudah diterima masyarakat luas. Implementasi PLTMh dapat dengan berbagai cara, salah satunya yaitu aliran vortex. Pemanfaatan sistem pembangkit listrik dengan menggunakan pusaran aliran vortex disebut *Gravitational Water Vortex Power Plant (GWVPP)*[1].

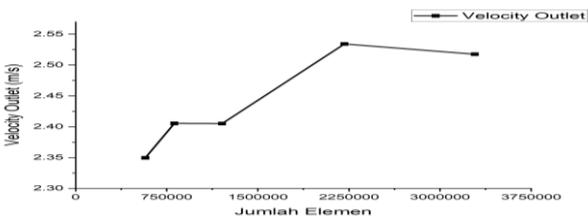
Gravitational Water Vortex Power Plant merupakan



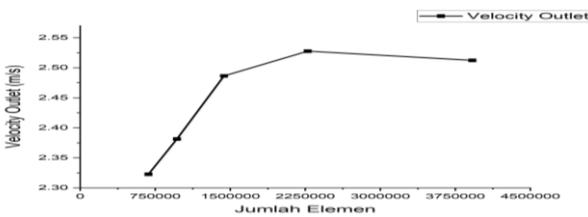
Gambar 8. Ilustrasi definisi kedalaman dengan rasio z/H .



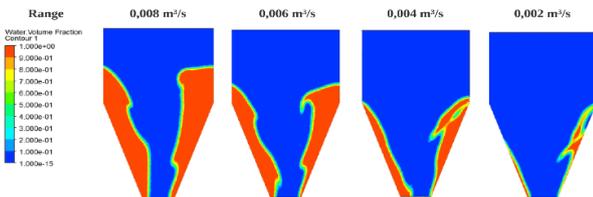
Gambar 9. Grafik GIT validasi pada geometri basin flume tank.



Gambar 10. Grafik GIT validasi pada geometri kanal tangensial.



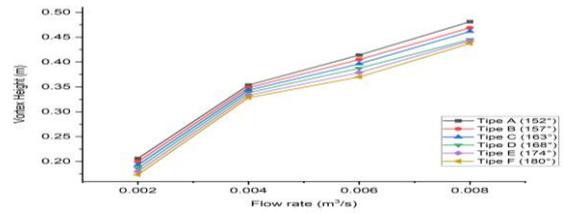
Gambar 11. Grafik GIT validasi pada geometri kanal wrap around.



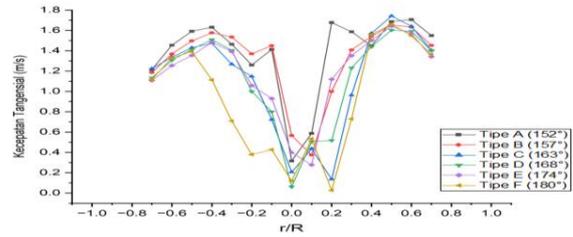
Gambar 12. Kontur *water volume fraction* sebagai *vortex height* pada variasi tipe a (sudut masukan 152°).

pembangkit listrik dengan instalasi yang mudah karena *head* yang rendah yaitu 0,8 sampai 2 meter. Pembangkit ini biasa diinstalasi pada kecepatan sungai yang rendah yaitu mulai dari 0,5 m/s. Output yang dihasilkan tidak melebihi 100kW [2]. GWVPP tidak bekerja akibat perbedaan tekanan, melainkan lebih pada pemanfaatan pusaran air atau *vortex*. Perubahan ini menguntungkan karena memungkinkan penyebaran kontaminan secara homogen dalam air, menganginkan air karena kecepatan aliran yang tinggi di permukaan air, meningkatkan tinggi penguapan sehingga air dapat menurunkan suhunya sendiri pada kenaikan suhu di musim panas dan, meningkatkan konsentrasi oksigen terlarut [3]. Komponen dari GWVPP terdiri atas kanal, basin, dan turbin. Air melewati kanal secara tangensial menuju basin kemudian pada basin akan terbentuk pusaran air. Energi kinetik pusaran air diubah menjadi energi listrik melalui turbin yang terletak di tengah pusaran air.

Aliran *vortex* merupakan pola aliran dengan arus yang



Gambar 6. Grafik *vortex height* pada setiap variasi tipe tangensial dan *flow rate*.



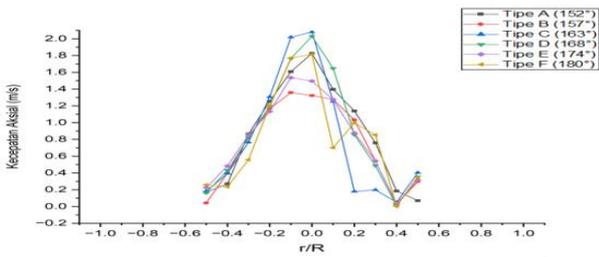
Gambar 7. Distribusi kecepatan tangensial pada *flow rate* $0.008 \text{ m}^3/\text{s}$ pada kedalaman $z/H = -0.34$.

Tabel 1. Parameter Penelitian

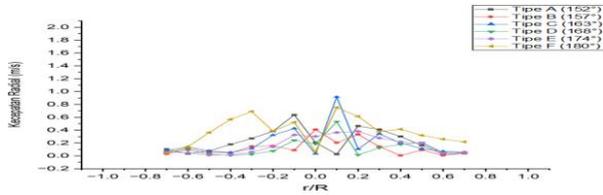
| Parameter Input | |
|---------------------------------|--|
| Variabel Kontrol | Variabel Bebas |
| Konfigurasi Basin | Jenis Inlet |
| Jenis = konikal | 1. Tangensial |
| $d_{outlet} = 0.1 \text{ m}$ | 2. <i>Wrap Around</i> |
| $d_{inlet} = 0.35 \text{ m}$ | Sudut Inlet untuk Tipe Tangensial ($^\circ$) |
| $h_{basin} = 0.59 \text{ m}$ | Tipe A = 152 |
| Konfigurasi Inlet | Tipe B = 157 |
| Lebar kanal = 0.175 m | Tipe C = 163 |
| Panjang kanal = 0.2 m | Tipe D = 168 |
| Tinggi kanal = 0.25 m | Tipe E = 174 |
| | Tipe F = 180 (Tanpa deflektor) |
| | Sudut Inlet untuk Tipe <i>Wrap Around</i> ($^\circ$) |
| | Tipe G = 90 |
| | Tipe H = 113 |
| | Tipe I = 135 |
| | Tipe J = 158 |
| | Tipe K = 180 |
| | Debit Aliran (m^3/s) |
| | 0.008; 0.006; 0.004; 0.002 |

berupa lingkaran-lingkaran konsentris dan partikel fluidanya tidak berotasi pada sumbu (*irrotational flow*) [4]. Aliran *vortex* terbentuk pada struktur hidrolis dimana sejumlah besar air dialirkan ke basin melalui kanal masuknya. Aliran masuk ini menyebabkan pusaran dimulai dengan *free surface* akibat Gaya Coriolis. *Vortex* atau pusaran ini semakin kuat sehingga menyebabkan putaran air semakin cepat dan tekanan di bagian tengah pusaran berkurang. Tekanan ini secara berangsur-angsur menurun hingga akhirnya berkurang di bawah tekanan atmosfer (*air core*) dan menghisap udara ke dalam basin dan membentuk inti udara. Jari-jari inti udara berkurang secara bertahap saat bergerak dari permukaan bebas ke basin.

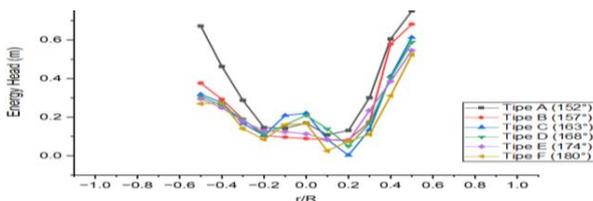
Kualitas aliran *vortex* dipengaruhi beberapa parameter, antara lain kecepatan tangensial, *vortex height*, dan *vortex strength*. Kecepatan tangensial yang memengaruhi *vortex strength* pada aliran *vortex* merupakan parameter penting dalam mendesain turbin air. Selain itu, *vortex height* yang meningkat akan meningkatkan *vortex strength* [5]. Sedangkan, untuk konfigurasi geometri basin meliputi ukuran masukan basin, diameter basin, sudut masukan, tinggi kanal, dan sudut kerucut kanal (*cone angle*) [6]. Melalui studi



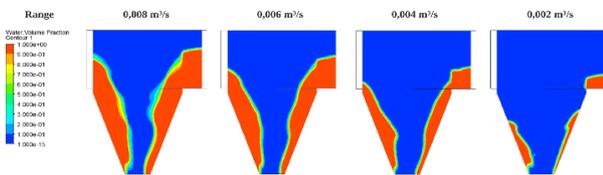
Gambar 19. Distribusi kecepatan aksial pada *flow rate* 0.008 m³/s pada kedalaman $z/H = -0.69$.



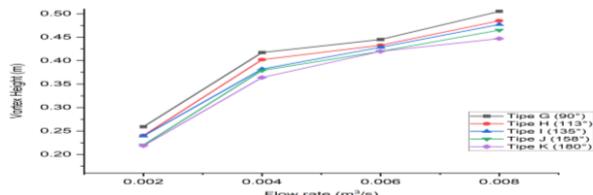
Gambar 20. Distribusi kecepatan radial pada *flow rate* 0.008 m³/s pada kedalaman $z/H = -0.34$.



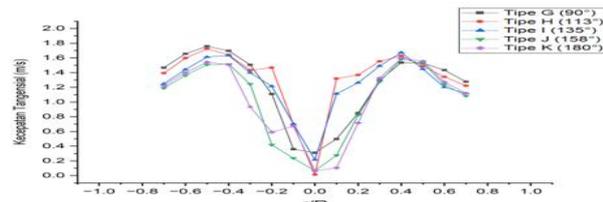
Gambar 21. Energi pada *flow rate* 0.008 m³/s pada kedalaman $z/H = -0.69$.



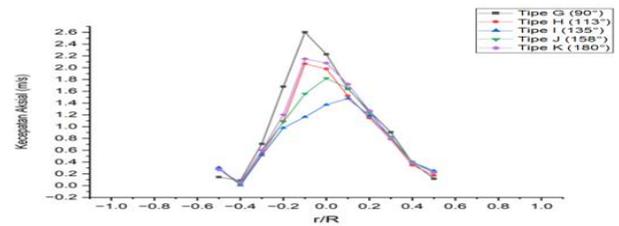
Gambar 22. Kontur *water volume fraction* sebagai *vortex height* pada variasi *wrap around* tipe g (sudut masukan 90°).



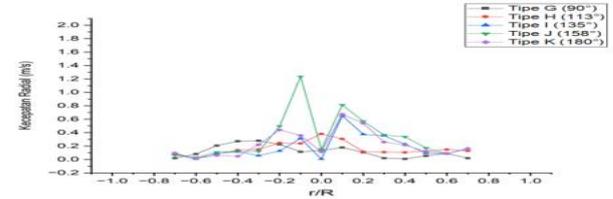
Gambar 23. Grafik *vortex height* pada setiap variasi tipe *wrap around* dan *flow rate*.



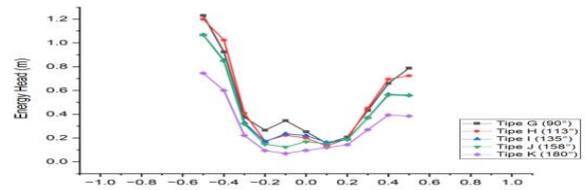
Gambar 24. Distribusi kecepatan tangensial pada kanal *wrap around*, *flow rate* 0.008 m³/s pada kedalaman $z/H = -0.34y$.



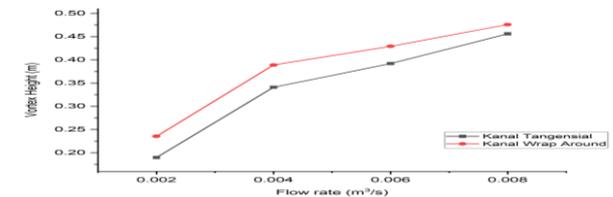
Gambar 13. Distribusi kecepatan aksial pada kanal *wrap around*, *flow rate* 0.008 m³/s pada kedalaman $z/H = -0.69$.



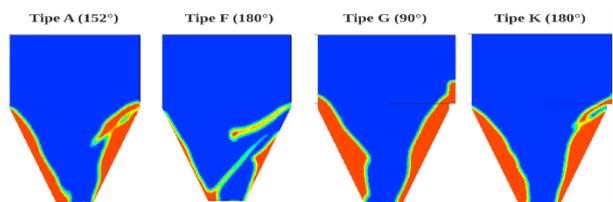
Gambar 14. Distribusi kecepatan radial pada *flow rate* 0.008 m³/s pada kedalaman $z/H = -0.34$.



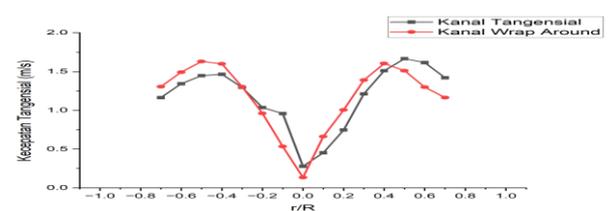
Gambar 15. Energi pada variasi kanal *wrap around*, *flow rate* 0.008 m³/s pada kedalaman $z/H = -0.69$.



Gambar 16. Grafik *vortex height* pada kanal tipe tangensial dengan tipe *wrap around*.



Gambar 17. Perbandingan Kontur *Water Volume Fraction* pada *Flow Rate* 0.004 m³/s.



Gambar 18. Perbandingan distribusi kecepatan tangensial antar kanal pada kedalaman $z/H = -0.34$.

numerik dan eksperimental terdahulu, ditemukan bahwa daya keluaran dan efisiensi maksimum basin konikal dibandingkan dengan basin silinder untuk semua kondisi *inlet* dan *outlet* yang sama dengan ekstraksi daya maksimum pada posisi *runner* 65-75% dari total ketinggian basin dari posisi teratas. Lebar saluran masuk *notch*, *cone angle*, dan tinggi saluran memiliki efek paling signifikan pada kecepatan pusaran [7].

Pada penelitian ini dilakukan variasi konfigurasi *inlet* kanal pada GWVPP yaitu jenis kanal dan sudut masukan

untuk ukuran basin yang sama. Selain itu, pengaruh penggunaan *spiral guide* juga dianalisa. Penelitian ini menganalisa performansi aliran *vortex* yang dihasilkan dengan nilai *vortex height* dan kecepatan tangensial, dimana akan memengaruhi efisiensi turbin air berdasarkan perbandingan daya yang dihasilkan. Penelitian dilakukan dengan simulasi numerik berbasis CFD (*Computational Fluid Dynamics*). Dengan adanya penelitian ini, diharapkan dapat menemukan performansi aliran *vortex* yang baik

berdasarkan parameter yang ditinjau dari variasi yang ada.

II. URAIAN PENELITIAN

A. Gravitational Water Vortex Power Plant

Gravitational Water Vortex Power Plant merupakan *green technology* yang termasuk dalam kategori pembangkit listrik tenaga mikrohidro. Kategorisasi ini disebabkan karena karena daya maksimum yang dihasilkan tidak melebihi 100kW [8]. Pembangkit listrik ini adalah dapat beroperasi pada *head* yang rendah. Adapun daerah operasi dari GWVPP ditunjukkan pada gambar. Debit aliran yang cocok digunakan pada GWVPP berkisar 0.04 - 5 m³/s.

Daya yang dihasilkan oleh GWVPP sekitar ± 50 kW. Oleh karena itu, GWVPP cocok digunakan pada kanal atau sungai yang memiliki *head* yang rendah (Gambar 1) [9].

Pada pembangkit ini, air melewati lubang masuk (*inlet*) yang kemudian mengalir secara tangensial ke cekungan bundar. Air kemudian akan membentuk pusaran yang kuat, yang keluar dari saluran keluar (*outlet*) di bagian tengah bawah dari basin [10]. Karena persyaratan *head* air yang sangat rendah, pembangkit tidak bekerja pada perbedaan tekanan tetapi pada kekuatan dinamis yang dihasilkan oleh pusaran [11].

Komponen GWVPP terdiri dari kanal *inlet*, kanal, basin, turbin, dan kanal *outlet* (Gambar 2). Secara umum, prinsip dari GWVPP adalah air melewati *inlet* secara tangensial ke basin. Air akan membentuk *vortex* yang kuat dan akan keluar melalui *outlet* ditengah bawah basin. Akibat dari kebutuhan *head* yang rendah, GWVPP tidak bekerja berdasarkan perbedaan tekanan, namun dari gaya dinamis yang dihasilkan oleh pusaran (*vortex*). Turbulensi aliran *vortex* ini dimanfaatkan *runner* untuk meneruskan energi kinetik air ke energi transformer.

B. Aliran Vortex

Vortex merupakan aliran fluida yang berputar sehingga membentuk pusaran terhadap titik pusat sumbu imajiner, aliran ini disebabkan oleh adanya perbedaan kecepatan pada lapisan fluida yang saling berdekatan. Aliran *vortex* didefinisikan sebagai jenis aliran dengan gerakan alirannya melingkari suatu poros. Dalam pusaran air, air berputar di sekitar inti kosong (pusat pusaran) dengan radius yang semakin menurun. Pusaran air tersebut memiliki pola aliran berupa garis arus yang memiliki lingkaran konsentris. Contoh dari aliran *vortex* yaitu adalah asap cincin, *whirlpool* yang sering terlihat di badan perahu, angin topan, dan tornado [12].

Perputaran aliran *vortex* disebabkan oleh adanya perbedaan kecepatan antara lapisan fluida yang berdekatan dan membentuk pusaran akibat bentuk geometri ruang serta kecepatan tangensial dan aksial dimulai karena gaya Coriolis dan gaya gravitasi. Kecepatan fluida yang tinggi akan memberikan momentum yang besar pada turbin untuk mulai berputar sehingga hal ini akan berdampak pada performa dari turbin. Pusaran yang sangat tinggi terbentuk di wilayah inti sekitar sumbu dan hampir nol ketika di wilayah ujung dari pusaran, sementara tekanan yang terjadi akan semakin turun saat mendekati wilayah ujung dari pusaran. Aliran *vortex* pada juga memiliki kecepatan dan tekanan yang tinggi di daerah sekitar sumbu yang mengarah ke *outlet*. Oleh karena itu aliran *vortex* tersebut termasuk ke dalam aliran

irrotational karena pola aliran yang terjadi memiliki *stremline* dalam lingkaran yang konsentris (berpusat).

Berdasarkan proses pembentukannya, aliran *vortex* dapat dibagi menjadi 2, antara lain *free vortex* (*vortex* bebas) dan *forced vortex* (*vortex* paksa). *Free vortex* atau *vortex* bebas merupakan aliran *vortex* yang terbentuk dikarenakan peristiwa natural, tidak dipengaruhi oleh gaya eksternal. Kecepatan tangensial dari partikel fluida berputar pada jarak tertentu dari pusat *vortex*. Semakin mendekati sumbu putaran, maka kecepatan tangensial aliran akan semakin meningkat.

C. Performansi Aliran pada Free Vortex

Pada *free vortex*, dapat dilihat performansi aliran dinilai melalui beberapa parameter, antara lain *vortex height*, *air core*, kecepatan tangensial, dan *vortex strength* [2]. Pada aliran *vortex*, profil kecepatan dapat dibagi menjadi kecepatan tangensial, kecepatan aksial, dan kecepatan radial. Ilustrasi sistem koordinatnya dapat dilihat pada Gambar 3 [13].

Kecepatan tangensial (*tangential velocity*) adalah komponen kecepatan yang sejajar dengan lingkaran pusaran *vortex*. Ini menggambarkan kecepatan partikel fluida yang mengelilingi pusaran *vortex* pada lintasan melingkar. Kecepatan tangensial mencapai maksimum di lingkaran pusaran *vortex* yang terluar dan berkurang saat jarak dari pusat pusaran meningkat. Kecepatan tangensial dalam aliran *free vortex* dinyatakan sebagai fungsi radius (jari-jari) dari pusaran dan dapat dihitung menggunakan hukum kekekalan momen angular. Kemudian terdapat kecepatan aksial (*axial velocity*) yang merupakan komponen kecepatan yang sejajar dengan sumbu pusaran *vortex*. Ini menggambarkan kecepatan partikel fluida dalam arah sumbu pusaran, baik menuju atau menjauh dari pusaran. Pada aliran *free vortex*, kecepatan aksial konstan pada setiap titik dalam aliran karena tidak ada adanya gaya eksternal dalam arah aksial. Sedangkan kecepatan radial (*radial velocity*) merupakan komponen kecepatan yang berarah keluar atau masuk ke pusaran *vortex*. Ini menggambarkan pergerakan partikel fluida dalam arah radial, menjauh dari atau mendekati pusat pusaran. Kecepatan radial pada aliran *free vortex* adalah nol, karena tidak ada perubahan jarak partikel dari pusat pusaran. Dalam aliran *free vortex*, komponen kecepatan ini saling berhubungan dan mempengaruhi sifat dan karakteristik aliran. Kecepatan tangensial menentukan profil kecepatan melingkar, sementara kecepatan aksial dan kecepatan radial mempengaruhi distribusi dan perubahan jarak partikel dari pusat pusaran.

Vortex height merupakan ketinggian *vortex* yang mengelilingi seluruh basin. Ketinggian *vortex height* akan terus naik sampai fluida mengelilingi seluruh basin. Kenaikan *vortex height* tidak akan mencapai *steady* bila *mass flow* fluida masuk sama dengan *mass flow* fluida keluar.

Vortex strength mengacu pada intensitas atau kekuatan dari pusaran (*vortex*) dalam aliran fluida. Ini menggambarkan seberapa kuat atau besar suatu pusaran dalam aliran dan sering terkait dengan sirkulasi. Kekuatan *vortex* dapat dihitung sebagai integral sirkulasi sepanjang kontur tertutup yang mengelilingi pusaran. Ini menggambarkan jumlah putaran atau perputaran fluida yang terkandung dalam suatu pusaran dan memberikan indikasi tentang kekuatan pusaran tersebut. *Vortex strength* berhubungan dengan vortisitas.

Pada suatu *free vortex*, *vortex strength* dipengaruhi oleh debit aliran, bentuk *inlet* kanal, geometri basin, dan kedalaman bagian yang terendam dari GWVPP. Persamaan dari *vortex strength* pada suatu bidang adalah sebagai berikut.

$$\Gamma = v_{\theta} 2\pi r \quad (1)$$

Vortex strength berpengaruh terhadap pembentukan *air core*. Terjadinya *air core vortex* sering menyebabkan pengurangan kinerja dan ketidakstabilan operasi GWVPP [10]. *Air core vortex* juga menginduksi *entrainment* udara dan rotasi yang kuat dalam aliran kanal, yang dapat menyebabkan pembebanan yang tidak stabil pada turbin atau *runner* pompa dan meningkatkan getaran. Untuk mencegah pembentukan *air core* pada *vortex*, terdapat batas operasi minimum yang disebut *critical submerged area*. *Vortex strength* ini semakin berkurang ketika mendekati *critical submerged area*. Setiap gangguan pada aliran *vortex* dapat meningkatkan gesekan sehingga dapat mengurangi *vortex strength*.

Energy head adalah istilah yang digunakan dalam ilmu fluida dan hidrolika untuk menggambarkan jumlah energi yang dimiliki oleh fluida dalam suatu sistem. *Energy head* mengacu pada tinggi teoretis yang setara dengan energi kinetik dan energi potensial fluida pada suatu titik dalam aliran. Secara matematis, *energy head* (E) dapat didefinisikan sebagai jumlah energi kinetik spesifik (KE) dan energi potensial spesifik (PE) fluida pada suatu titik dalam aliran, diukur relatif terhadap referensi tertentu:

$$E = KE + PE \quad (2)$$

Dibuat skema ideal untuk masalah *general flow* sebagaimana diterapkan pada basin *vortex* sub-kritikal. Berdasarkan Binnie dan Hookings (1948) dan Ackers dan Crump (1960), didapatkan persamaan untuk *Energy Head* pada debit (Q) sebagai fungsi dari kedalaman aliran (h) dalam pusanan dengan *air core* penuh yaitu sebagai berikut.

$$E = \frac{\Gamma^2}{2g\pi^2 a_c^2} + \frac{v_z^2}{2g} \quad (3)$$

D. Computational Fluid Dynamics

Computational Fluid Dynamics (CFD) merupakan suatu pendekatan untuk menganalisa fenomena aliran. CFD menggunakan algoritma numerikal berbasis computer untuk menyelesaikan dan mencari solusi pada fenomena aliran fluida. CFD sering digunakan untuk analisa aerodinamika, perpindahan panas, kenyamanan termal suatu ruangan, dan lain sebagainya. Metode CFD ini digunakan dengan cara memecahkan persamaan Navier-Stokes secara numerik. Adapun persamaan Navier-Stokes dalam penentuan kontinuitas pada koordinat silinder dirumuskan sebagai berikut

$$\frac{\partial V_r}{\partial r} + \frac{\partial V_z}{\partial z} + \frac{V_r}{r} = 0 \quad (4)$$

$$V_r \frac{\partial V_{\theta}}{\partial r} + V_z \frac{\partial V_{\theta}}{\partial z} + \frac{V_r V_{\theta}}{r} = V \left(\frac{\partial^2 V_{\theta}}{\partial r^2} + \frac{\partial V_{\theta}}{r \partial r} - \frac{V_{\theta}}{r^2} + \frac{\partial^2 V_{\theta}}{\partial z^2} \right) \quad (5)$$

$$V_r \frac{\partial V_r}{\partial r} + V_z \frac{\partial V_r}{\partial z} - \frac{V_{\theta}^2}{r} + \frac{\partial \rho}{r \partial z} = V \left(\frac{\partial^2 V_r}{\partial r^2} + \frac{\partial V_r}{r \partial r} - \frac{V_r}{r^2} + \frac{\partial^2 V_r}{\partial z^2} \right) \quad (6)$$

$$V_r \frac{\partial V_z}{\partial r} + V_z \frac{\partial V_z}{\partial z} - \frac{\partial \rho}{\rho \partial z} = g + V \left(\frac{\partial^2 V_z}{\partial r^2} + \frac{\partial V_z}{r \partial r} - \frac{V_r}{r^2} + \frac{\partial^2 V_r}{\partial z^2} \right) \quad (7)$$

Diasumsikan bentuk persamaan di atas didasari pada aliran *vortex* yang terbentuk memiliki bentuk *air core* yang simetris, *steady*, dan aliran air *incompressible*. Terdapat beberapa komponen pada persamaan tersebut, yaitu V_{θ} merupakan kecepatan tangensial, V_r merepresentasikan kecepatan radial, V_z sebagai kecepatan aksial, ρ adalah densitas fluida, g merupakan percepatan gravitasi bumi, dan ν sebagai *kinematic viscosity* (rasio perbandingan antara dynamic viscosity dan densitas fluida).

Simulasi numerik dengan menggunakan metode *Computational Fluid Dynamics* (CFD) merupakan salah satu cara untuk memprediksi karakteristik suatu aliran fluida yang terjadi pada model. Metode ini banyak digunakan karena sifatnya yang relatif murah dan cepat untuk mendapatkan hasil dibandingkan dengan melakukan pengujian langsung. Kebenaran hasil sebuah simulasi komputasi sangat tergantung pada inputan yang diberikan serta cara memproses data inputan tersebut. Untuk model geometri yang kompleks, CFD menyediakan hasil yang cepat dengan beberapa model yang berbeda sehingga dapat mensimulasikan aliran fluida tanpa eksperimen secara langsung. Selain itu, CFD dapat melihat karakteristik aliran fluida seperti kontur, *streamline*, dan lain sebagainya. Namun, penggunaan CFD dalam melakukan simulasi aliran fluida tidaklah selalu valid. Hasil membuktikan bahwa terdapat sekitar 20-40% hasil simulasi berbeda dengan data eksperimental. Oleh karena itu, perlu adanya validasi data eksperimental serta penentuan *setup* pada simulasi agar hasil simulasi pada CFD mendekati nilai eksperimental [14].

Terdapat 3 tahapan proses utama pada studi numerik menggunakan CFD, yaitu tahap *pre-processing*, *solving*, dan *post-processing*. Tahap *pre-processing* merupakan tahapan pembuatan model komputer diskrit, yaitu definisi geometri dan *meshing*. Menetapkan *setup* and *boundary* aliran yang akan diterapkan ke dalam simulasi serta melakukan pembuatan *meshing*. *Meshing* merupakan pengukuran geometri secara dikritisasi. *Meshing* perlu dibuat sedetail sesuai dengan geometri dan *setup* yang dilakukan. Tahap *solving* merupakan tahapan proses penghitungan data masukan dilakukan dengan persamaan-persamaan yang dilibatkan secara iteratif. Perhitungan dilakukan sampai hasilnya mengarah pada kesalahan terkecil atau mencapai nilai konvergen. Perhitungan dilakukan secara menyeluruh pada kontrol volume dengan proses integrasi persamaan diskrit. Terakhir tahap *post-processing* yaitu hasil perhitungan yang diperoleh diinterpretasikan menjadi gambar, grafik bahkan animasi dengan pola warna tertentu.

III. METODE PENELITIAN

A. Parameter Penelitian dan Desain Geometri

Tahap ini bertujuan untuk mendefinisikan permasalahan yang ada dalam mendesain dan merancang *inlet* kanal. Identifikasi masalah dari penelitian ini berkaitan mengenai parameter untuk desain dari turbin vorteks *open flume*. Rasio optimal antara diameter *inlet* dengan diameter *outlet* basin yang memiliki nilai antara 0,14 hingga 0,18 (Mulligan &

Hull, 2010). Selain itu diperlukan pemilihan mengenai jenis dari basin yang akan digunakan. Pada penelitian ini dilakukan identifikasi masalah untuk menentukan parameter input dan output yang merupakan variabel yang akan diteliti dalam penelitian ini sehingga dapat diketahui parameter desain, operasi, dan performansi GWVT. Tabel 1 memperlihatkan parameter input dan output untuk rancangan penelitian.

B. Proses Simulasi dengan Computational Fluid Dynamics

Proses simulasi dengan computational fluid dynamics meliputi:

1) Pre-Processing

Geometri yang telah dibuat diimpor ke *software* CFD dan ditranslasi sehingga pusat geometri berada pada koordinat (0,0,0). Kemudian, setiap *face* atau sisi diberikan penamaan sesuai jenis *boundary condition*-nya untuk memudahkan proses *setup*, yaitu sebagai *inlet air* sebagai masukan udara, *inlet water* sebagai masukan air, *opening* sebagai bagian terbuka kanal dan basin, *outlet* sebagai tempat keluar puasan *vortex*, dan *wall* sebagai dinding atau sisi luar basin dan kanal (Gambar 4). Selanjutnya dilakukan proses *meshing*. Metode *meshing* yang digunakan adalah *MultiZone* di bagian kanal dengan *sizing* 1 cm dan di bagian basin menggunakan metode *Tetrahedrons*, *patch conforming method*, dengan *sizing* 0.6 cm. *Patch conforming method* mengacu pada pendekatan di mana elemen tetrahedron disusun untuk mengikuti permukaan atau *patch* geometri yang spesifik pada struktur (Gambar 5).

2) Processing

Pada tahap ini dilakukan *setting boundary condition* dan inisiasi nilai-nilai dari variabel yang digunakan dalam simulasi. Pada penelitian ini tidak terlepas dari fenomena *free surface* dimana terjadi interaksi antara air dan udara yang berbatasan sehingga fenomena *vortex* dapat terbentuk di GWVPP. Kondisi batas yang digunakan terdiri dari *inlet* pada area masuknya air, *opening* pada area atas basin, *outlet* pada area bawah tempat keluarnya air dari basin, *wall* sebagai dinding basin. Model turbulensi yang digunakan pada simulasi adalah model $k-\omega$ SST, dimana model ini cocok untuk melakukan analisa fenomena *vortex* serta aliran turbulen pada *incompressible water flow* yang terjadi pada GWVPP. Penggunaan model turbulensi ini juga diperkuat dengan validasi *setup*. Jumlah iterasi maksimal yang digunakan adalah 300 dengan residual target mencapai 10^{-4} . Detail *setup* yang digunakan yaitu sebagai berikut

3) Post-Processing

Pada langkah ini diambil dan diinterpretasi data hasil simulasi CFD. Data yang diambil meliputi data kualitatif, yaitu *streamline*, *isosurface*, kontur *water volume fraction*, kontur kecepatan, dan kontur tekanan, serta data kuantitatif, yaitu *velocity outlet*, *vortex height*, *tangential-radial-kecepatan aksial*, dan *air core diameter*. Untuk memudahkan analisis, didefinisikan kedalaman dalam rasio z/H seperti pada Gambar 6.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Grid Independence Test (GIT) dan Validasi Simulasi

Grid Independent Test (GIT) merupakan proses dalam simulasi numerik untuk memastikan keakuratan hasil

simulasi. Pada GIT yang telah dilakukan, divariasikan jumlah elemen sebanyak 6 kali, yaitu dengan mengatur nilai *body sizing* pada basin, yaitu 9 mm, 8 mm, 7 mm, 6 mm, 5 mm, dan 4 mm. Ini dilakukan pada 3 geometri, yaitu geometri basin pada *flume tank*, geometri GWVPP kanal bentuk tangensial dengan sudut 152° , dan geometri GWVPP kanal *wrap around* dengan sudut 90° .

Berdasarkan grafik GIT validasi pada geometri basin *flume tank*, nilai *velocity outlet* terus naik sampai ke elemen 1,738,945 mencapai 1.88 m/s. Kemudian, nilai *velocity outlet* turun hingga mencapai 1.86 ketika jumlah elemen 2,991,484. Selisih nilai *velocity outlet* dari elemen 1,738,945 ke 2,991,484 sebesar 1.36%. Sehingga, jumlah elemen yang digunakan untuk validasi adalah 1,738,945 atau *body sizing* 6 mm. Adapun hasil GIT validasi pada geometri basin *flume tank* yaitu pada Gambar 7.

Kemudian dilakukan validasi nilai simulasi dengan eksperimen untuk memastikan bahwa hasil simulasi numerik dapat mereproduksi fenomena fisik yang terjadi dalam eksperimen dengan akurasi yang memadai. Parameter yang diamati adalah *vortex height*. Kemudian didapatkan bahwa model turbulensi *Shear Stress Transport (k- ω SST)* dengan *interface compression level* memberikan hasil *vortex height* dengan nilai *error* yang paling kecil dengan nilai eksperimental, yaitu sebesar 0,6%.

Kemudian, dengan menggunakan nilai *setup* yang paling mendekati eksperimental, dilakukan GIT pada geometri penelitian. Didapatkan hasil pada Gambar 8 dan Gambar 9.

Berdasarkan grafik, nilai *velocity outlet* terus meningkat dari jumlah elemen 574,023 sampai 2,212,654. Pada jumlah elemen 3,286,286, terdapat penurunan *velocity outlet* dengan *error* sebesar -0.66%. Kemudian pada grafik pada Gambar 9, nilai *velocity outlet* terus meningkat dari jumlah elemen 682,674 sampai 2,274,924. Pada jumlah elemen 3,920,706, terdapat penurunan *velocity outlet* dengan *error* sebesar -0.61%. Berdasarkan hasil GIT, maka ukuran untuk *body sizing* yang digunakan untuk simulasi penelitian adalah 6 mm

B. Analisis Pengaruh Sudut pada Kanal Inlet Tangensial

Vortex height dan *air core* dapat diamati dari kontur dan *isosurface water volume fraction*. Nilai dari *vortex height* diambil berdasarkan ketinggian *vortex* pada arah aksial yang merupakan jarak antara titik tertinggi dari terbentuknya *vortex* di basin dari aliran kanal dan terendah pusaran. Pada Gambar 10, dapat dilihat variasi *flow rate* memberikan pengaruh yang signifikan pada penambahan tinggi *vortex height*. *Vortex height* yang semakin bertambah seiring bertambahnya *flow rate* karena semakin besar level air yang masuk ke dalam basin sehingga akan cepat terbentuk *vortex* dengan ketinggian yang besar. Pada *flow rate* $0.008 \text{ m}^3/\text{s}$ dan $0.006 \text{ m}^3/\text{s}$, aliran *vortex* yang terbentuk tergolong kuat dan distribusi fraksi airnya cukup jelas. Sedangkan pada *flow rate* $0.004 \text{ m}^3/\text{s}$ dan $0.002 \text{ m}^3/\text{s}$, aliran *vortex* yang terbentuk cukup lemah. Ini disebabkan karena kecepatan aliran yang masuk ke basin tidak cukup besar untuk membentuk aliran *vortex* yang stabil. Sudut masukan berpengaruh pada lebar kanal masukan. Sehingga pada sudut yang lebih kecil, sirkulasi yang terbentuk lebih terarah akibat penyempitan aliran masukan dari deflektor (Gambar 10 dan Gambar 11).

Kecepatan tangensial meningkat ketika semakin dalam pada puncaknya. Kecepatan tangensial bertambah ketika

radius bertambah. Ketika mendekati dinding basin, kecepatan tangensial turun. Ini disebabkan karena adanya gesekan dari dinding. Kecepatan yang paling tinggi pada permukaan basin terdapat di tipe A yaitu 1.643 m/s pada r/R 0.6. Persentase peningkatan kecepatan tangensial antar tipe dengan mengambil nilai *average* setiap variasi sudut pada kedalaman $z/H = -0.34$ yaitu 6.88%. Sedangkan untuk persentase peningkatan kecepatan tangensial antar peningkatan *flow rate* di kedalaman tersebut yaitu 3.12% (Gambar 12).

Kecepatan aksial menggambarkan kecepatan partikel fluida dalam arah sumbu pusaran, baik menuju atau menjauh dari pusaran. Nilainya semakin tinggi ketika mendekati *outlet* pada basin. Pada puncak di $r/R = 0$, kecepatan aksial tertinggi yaitu pada tipe C dan tipe D sebesar 2.080 m/s dan 2.030 m/s (Gambar 13).

Kecepatan radial merupakan komponen kecepatan yang berarah keluar atau masuk ke pusaran *vortex*. Pada pusat basin ($r = 0$), nilai dari kecepatan radial akan semakin mendekati 0. Secara keseluruhan, penurunan nilai kecepatan radial saat pusaran mendekati pusat basin atau radius mendekati 0 adalah hasil dari konservasi massa dan momentum, serta interaksi dengan lingkungan sekitarnya (Gambar 14).

Perhitungan energi ini ditujukan untuk memperkirakan energi yang dihasilkan untuk memutar *runner*. Posisi *runner* yang menghasilkan efisiensi kerja paling tinggi berkisar pada ketinggian 65-75% total tinggi basin dari atas. Sehingga dilakukan sampling nilai energi pada kedalaman $z/H = -0.69$ (kedalaman 0.256 m permukaan basin). Nilai energi yang semakin besar seiring bertambahnya kedalaman ini Nilai energi paling tinggi yaitu pada Tipe A dengan sudut masukan terkecil. *Flow rate* juga berpengaruh terhadap nilai energi, karena akan menentukan nilai kecepatan tangensial dan aksial, yang berpengaruh juga terhadap perhitungan energi (Gambar 15).

C. Analisis Pengaruh Sudut pada Kanal Inlet Wrap Around

Pada *flow rate* 0,008 m³/s, Tipe G (sudut masukan 90°) menghasilkan *vortex height* paling tinggi, yaitu 0.504 m. Pada *flow rate* 0.008, 0.006 dan 0.004 m³/s, aliran yang terbentuk tergolong *vortex* kuat dan distribusi fraksi air cukup jelas. Pada *flow rate* 0.002 m³/s, aliran *vortex* yang terbentuk cukup lemah. Semakin tinggi *flow rate*, semakin tinggi juga *vortex height* yang terbentuk. Semakin besar massa air yang masuk ke dalam basin, semakin cepat terbentuknya *vortex* dengan ketinggian yang besar (Gambar 16).

Kecepatan tangensial yang paling tinggi adalah pada tipe G yaitu 1.759 m/s pada r/R -0.5 (Gambar 17). Persentase peningkatan kecepatan tangensial antar tipe dengan mengambil nilai *average* pada kedalaman $z/H = -0.34$ yaitu 3.3% (Gambar 18).

Pada kedalaman $z/H = 0.2$ dan 0, distribusi kecepatan aksial tampak cukup acak dan rendah. Hal ini karena pada kedalaman tersebut masih terlalu tinggi di atas permukaan basin, sehingga belum terbentuk kecepatan aksial yang signifikan. Pada kedalaman $z/H = -0.69$, Pada puncak di $r/R = 0$, kecepatan aksial tertinggi yaitu pada tipe G dan tipe H sebesar 2.602 m/s dan 2.066 m/s (Gambar 19).

Pada pusat basin ($r = 0$), nilai dari kecepatan radial akan semakin mendekati 0. Nilai kecepatan radial memengaruhi pembentukan *air core* (Gambar 20).

Nilai energi paling tinggi yaitu pada Tipe G dengan sudut masukan terkecil. Peningkatan nilai energi antar tipe yaitu 12.94% (Gambar 21).

D. Diskusi analisis Pengaruh Jenis Kanal

Gravitational Water Vortex Power Plant (GWVPP) bekerja dengan memanfaatkan energi potensial gravitasi dan energi kinetik air yang mengalir ke dalam sebuah tangki melalui saluran masukan (*inlet* kanal) untuk menghasilkan energi listrik. Kualitas aliran *vortex* akan menentukan performa kerja pembangkitan listrik. Kekuatan sirkulasi dalam basin dipengaruhi atas geometri kanal masukannya [15]. Sudut masukan kanal memengaruhi lebar masukan aliran. Lebar kanal masukan yang tepat dapat membantu menciptakan aliran yang lebih stabil dan mengurangi turbulensi pada aliran air yang memasuki basin.

Flow rate pada aliran kanal memengaruhi performansi aliran *vortex*, meliputi *vortex height*, *air core*, kecepatan aliran, dan *vortex strength*. Performansi paling baik yaitu pada *flow rate* 0.008 m³/s. Kenaikan nilai *vortex height* dari 0.002 m³/s ke 0.004 m³/s sebesar 42.0%, dari 0.04 m³/s ke 0.006 m³/s sebesar 11.3%, 0.006 m³/s ke 0.008 m³/s sebesar 12.1% (Gambar 22).

Pada kanal tipe tangensial dengan *flow rate* 0.008 m³/s, didapatkan peningkatan *vortex height* pada tipe E (sudut masukan 174°) dengan tipe F (tanpa deflektor, sudut masukan 180°) yaitu 1.15%. Sedangkan antara tipe A (sudut masukan 152°) dengan tipe E, peningkatan *vortex height* sebesar 8.02%. Pada kanal *wrap around*, peningkatan *vortex height* pada tipe G (sudut masukan 90°) dengan tipe K (sudut masukan 180°) yaitu 11.49%. Sedangkan apabila dibandingkan antara sudut masukan terendah pada variasi antar jenis kanal, yaitu tipe A dan tipe G, didapatkan peningkatan *vortex height* sebesar 4.75% dengan menggunakan kanal *wrap around*.

Dalam aliran *vortex*, *air core* dapat dikategorikan menjadi *air core* kuat (*strong air core*) dan *air core* lemah (*weak air core*), tergantung pada stabilitas dan karakteristiknya. Pada kanal tipe *wrap-around* membuat aliran dari kanal memasuki basin dengan cara melilit, sehingga menciptakan pola aliran spiral secara langsung. Sehingga pada *flow rate* 0.004 m³/s, aliran *vortex* yang terbentuk masih stabil. Pada kanal *inlet* tipe tangensial, aliran cenderung memiliki gesekan lebih tinggi dengan dinding sehingga kecepatan tangensialnya tidak sebesar tipe *wrap around* (Gambar 23).

Kecepatan tangensial memengaruhi bagaimana kekuatan sirkulasi atau *vortex strength* dari suatu aliran. Semakin mendekati pusat aliran, maka nilainya semakin tinggi. Namun ketika berada di pusat basin ($r = 0$) nilai kecepatan tangensial akan bernilai mendekati 0. Sedangkan kenaikan kecepatan tangensial berdasarkan rata-ratanya yaitu 0.002 m³/s ke 0.004 m³/s sebesar 16.4%, dari 0.04 m³/s ke 0.006 m³/s sebesar 4.2%, 0.006 m³/s ke 0.008 m³/s sebesar 3.6%. Untuk kedalaman $z/H = -0.34$, rata-rata nilai kecepatan tangensial antar kanal tidak memiliki perbedaan yang terlalu signifikan, namun distribusi pada tipe *wrap around* lebih merata. Sehingga sirkulasi aliran lebih konstan (Gambar 24).

Kecepatan radial dan aksial menjaga energi dan memastikan kontinuitas aliran Q di seluruh sistem. Daggett dan Keulegan (1974) menemukan bahwa dalam kasus *free-surface vortex* yang mengalir melalui kanal biasanya

memiliki kecepatan radial yang kuat yang terkurung dalam lapisan yang dekat dengan bagian bawah dan di permukaan bebas, sedangkan kecepatan aksial terkonsentrasi di sekitar atau mendekati *outlet*.

Bentuk *inlet* kanal juga memberi pengaruh terhadap performa aliran air yang akan masuk. Kedua bentuk kanal masukan, baik yang lurus (tangensial) maupun yang berbentuk spiral (*wrap around*), memiliki kelebihan dan kekurangan masing-masing, tergantung pada kondisi dan karakteristik air yang digunakan dan desain keseluruhan sistem GWVPP.

Berdasarkan parameter yang telah ditinjau, didapatkan bahwa pembentukan aliran air pada tipe kanal wrap-around berbeda dengan tipe kanal tangensial. Pada kanal *wrap around*, air memasuki cekungan dengan cara melilit, sehingga menciptakan pola aliran spiral [16]. Pola aliran spiral menghasilkan pusaran simetris dan lebih tinggi dibandingkan dengan geometri kanal *inlet* lainnya. Saluran masuk wrap-around dapat meningkatkan generasi *vortex*. Dikaitkan dengan teori di balik aliran air dalam kanal wrap-around didasarkan pada prinsip-prinsip mekanika fluida dan desain saluran masuk. Sedangkan pada kanal tangensial, air memasuki basin secara tangensial, yang memfasilitasi pembentukan pusaran. Kecepatan tangensial air di cekungan pusaran tergantung pada desain saluran masuk, dan saluran saluran masuk tangensial dapat memberikan kecepatan tangensial yang lebih tinggi.

Berdasarkan simulasi yang telah dilakukan, didapatkan bahwa tipe A dan tipe G menghasilkan aliran *vortex* yang paling optimal ditinjau dari aspek yang telah dibahas di atas. Jika kanal masukan terlalu sempit, aliran air akan terhambat dan mengalami turbulensi yang dapat memengaruhi kualitas *vortex* yang terbentuk di dalam basin. Sedangkan jika kanal masukan terlalu lebar, aliran air akan terlalu lambat dan tidak memiliki kecepatan yang cukup untuk membentuk *vortex* yang stabil dan menggerakkan turbin.

V. KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, maka dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut: (1) *Flow rate* pada aliran kanal memengaruhi performansi aliran *vortex*, meliputi *vortex height*, *air core*, kecepatan aliran, dan *vortex strength*. Performansi paling baik yaitu pada *flow rate* 0.008 m³/s dengan kenaikan nilai *vortex height* pada peningkatan *flow rate* per 0.002, dari 0.002 m³/s ke 0.008 m³/s berturut-turut yaitu 42.0%, 11.3%, dan 12.1%. Sedangkan untuk kenaikan kecepatan tangensial berdasarkan rata-ratanya dari 0.002 m³/s ke 0.008 m³/s yaitu 16.4%, 4.2%, dan 3.6%. (2) Besar sudut masukan pada kanal *inlet* memengaruhi pembentukan aliran *vortex*. Semakin kecil sudut masukan, maka level ketinggian air yang masuk semakin tinggi akibat adanya penyempitan luas area masukan. Sehingga pembentukan aliran *vortex* akan semakin terarah dan menghasilkan *air core* yang lebih stabil. (3) Jenis kanal *inlet* yang digunakan memiliki peran penting dalam pembentukan aliran *vortex*. Kanal tipe *wrap-around* membuat aliran dari kanal memasuki basin dengan cara melilit, sehingga menciptakan pola aliran spiral secara

langsung. Sehingga pada *flow rate* 0.004 m³/s, aliran *vortex* yang terbentuk masih stabil. Pada kanal *inlet* tipe tangensial, aliran cenderung memiliki gesekan lebih tinggi dengan dinding sehingga kecepatan tangensialnya tidak sebesar tipe *wrap around*. Pemilihan bentuk kanal masukan harus dilakukan sesuai dengan karakteristik aliran air dan desain keseluruhan sistem GWVPP untuk memastikan kinerja yang optimal.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. H. Basri, B. O. Pratama, M. Faisol, A. Z. Abidin, and M. A. Billah, "Redesign Gravitation Water Vortex Power Plant (GWVPP): Study kasus Desa Duren," *TRILOGI J. Ilmu Teknol. Kesehatan, dan Hum.*, vol. 2, no. 1, pp. 1–5, 2021, doi: 10.33650/trilogi.v2i1.1905.
- [2] V. J. Alzamora Guzmán, J. A. Glasscock, and F. Whitehouse, "Design and construction of an off-grid gravitational vortex hydropower plant: A case study in rural Peru," *Sustain. Energy Technol. Assessments*, vol. 35, no. November 2018, pp. 131–138, 2019, doi: 10.1016/j.seta.2019.06.004.
- [3] M. M. Rahman, J. H. Tan, M. T. Fadzli, and A. R. Wan Khairul Muzammil, "A Review on the Development of Gravitational Water Vortex Power Plant as Alternative Renewable Energy Resources," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 217, no. 1, 2017, doi: 10.1088/1757-899X/217/1/012007.
- [4] R. Ullah, T. A. Cheema, A. S. Saleem, S. M. Ahmad, J. A. Chattha, and C. W. Park, "Performance analysis of multi-stage gravitational water vortex turbine," *Energy Convers. Manag.*, vol. 198, no. July, p. 111788, 2019, doi: 10.1016/j.enconman.2019.111788.
- [5] L. Velásquez García, A. Rubio-Clemente, and E. Chica, "Numerical analysis of the inlet channel and basin geometries for vortex generation in a gravitational water vortex power plant," *Renew. Energy Power Qual. J.*, vol. 18, no. 18, pp. 161–166, 2020, doi: 10.24084/repqj18.259.
- [6] S. Dhakal *et al.*, "Comparison of cylindrical and conical basins with optimum position of runner: Gravitational water vortex power plant," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 48, pp. 662–669, 2015, doi: 10.1016/j.rser.2015.04.030.
- [7] M. M. Rahman, T. J. Hong, and F. M. Tamiri, "Effects of Inlet Flow Rate and Penstock's Geometry on the Performance of Gravitational Water Vortex Power Plant," *Proc. Int. Conf. Ind. Eng. Oper. Manag.*, vol. 2018-March, pp. 2968–2976, 2018.
- [8] T. Haryani, W. Wardoyo, and A. Hidayat, "Perencanaan pembangkit listrik tenaga mikrohidro di saluran irigasi Mataram," *J. Hidroteknik*, vol. 1, no. 2, p. 75, 2015, doi: 10.12962/jh.v1i2.1672.
- [9] T. R. Bajracharya *et al.*, "Effects of geometrical parameters in gravitational water vortex turbines with conical basin," *J. Renew. Energy*, vol. 2020, no. Figure 1, pp. 1–16, 2020, doi: 10.1155/2020/5373784.
- [10] S. Wanchat, R. Suntivarakorn, S. Wanchat, K. Tonmit, and P. Kayanyiem, "A parametric study of a gravitation vortex power plant," *Adv. Mater. Res.*, vol. 805–806, pp. 811–817, 2013.
- [11] A. R. Sánchez, J. A. S. Del Rio, A. J. G. Muñoz, and J. A. P. Montoya, "Numerical and experimental evaluation of concave and convex designs for gravitational water vortex turbine," *J. Adv. Res. Fluid Mech. Therm. Sci.*, vol. 64, no. 1, pp. 160–172, 2019.
- [12] I. Sadreghighi, *Vortex & Vorticity*, 2nd ed. United States of America: CFD Open Series, 2023.
- [13] D. S. Edirisinghe, H. S. Yang, S. D. G. S. P. Gunawardane, and Y. H. Lee, "Enhancing the performance of gravitational water vortex turbine by flow simulation analysis," *Renew. Energy*, vol. 194, pp. 163–180, 2022, doi: 10.1016/j.renene.2022.05.053.
- [14] S. Thabet and T. Thabit, "Computational fluid dynamics: Science of the Future," *Int. J. Res. Eng.*, vol. 5, pp. 430–433, Jan. 2018, doi: 10.21276/ijre.2018.5.6.2.
- [15] S. Mulligan, J. Casserly, and R. Sherlock, "Experimental and numerical modelling of free-surface turbulent flows in full air-core water vortices BT-advances in hydroinformatics: SIMHYDRO 2014," P. Gourbesville, J. A. Cunge, and G. Caignaert, Eds. Singapore: Springer Singapore, 2016, pp. 549–569. doi: 10.1007/978-981-287-615-7_37.
- [16] L. Velásquez, A. Posada, and E. Chica, "Advances in the development of gravitational water vortex hydraulic turbines," *J. Eng. Sci. Technol. Rev.*, vol. 14, no. 3, pp. 1–14, 2021, doi: 10.25103/jestr.143.01.