

Kajian Teknologi : Parameter Desain dan Pemodelan Numerik pada Turbin Vortex Berbasis Gravitasi

Hafidz Komarul Ikhsan*, Rivhan Nugroho, Dendi Gusma Wijaya, Didit Setyo Pamuji

Program Studi Teknik Mesin, Institut Teknologi Nasional Yogyakarta

*Korespondensi : hafidzkomarul@gmail.com

ABSTRAK

Gravitational Water Vortex Power Plant (GWVPP) merupakan salah satu jenis teknologi energi terbarukan menggunakan sumber energi air dan dikategorikan sebagai mini-mikrohidro dengan *head* rendah dimana struktur saluran dan cekungan digunakan untuk membuat pusaran, yang kemudian di ekstraksi melalui *runner*. Penelitian ini difokuskan pada pengaruh desain basin dan saluran, bentuk sudu, faktor eksternal, dan simulasi numerik *water turbine vortex*. Desain basin kerucut lebih efisiensi dibanding dengan basin silinder. Bentuk sudu lengkung lebih efisien dari bentuk sudu datar. Debit air yang masuk ke dalam saluran dapat mempengaruhi kecepatan aliran air. Simulasi numerik digunakan untuk mendapatkan data seperti data eksperimen langsung di lapangan menggunakan *Computational Fluid Dynamic (CFD)*. Diameter *outlet* yang kecil menghasilkan kecepatan maksimal pada basin berbentuk kerucut.

Kata kunci: GWVPP, basin, geometri sudu, CFD

ABSTRACT

Gravitational Water Vortex Power Plant (GWVPP) is a type of renewable energy technology that uses water energy sources and is categorized as a low head mini-microhydro where the structure of channels and basins is used to create eddies, which are then extracted through the runner. This research is focused on the influence of basin and channel design, blade shape, external factors, and numerical simulation of water turbine vortex. Conical basin design is more efficient than cylinder basin. Curved blade shape is more efficient than flat blade shape. The discharge of water entering the channel can affect the speed of water flow. Numerical simulations are used to obtain data such as experimental data directly in the field using *Computational Fluid Dynamic (CFD)*. The small diameter of the outlet provides maximum velocity in the conical basin.

Keywords: GWVPP, basin, blade geometry, CFD

1. PENDAHULUAN

Selama beberapa dekade ini, energi air merupakan salah satu jenis energi terbarukan termurah, paling banyak tersedia, dan paling efisien di antara sumber energi terbarukan yang lain [1]. Secara khusus, di Indonesia pemanfaatan potensi energi air masih terfokus pada skala besar dalam bentuk PLTA sebesar 19,1%, sementara potensi mini-mikrohidro bisa dikatakan belum berkembang, hanya sebesar 0,013% [2]. Perbandingan sumber energi berbasis air dari segi sumber daya, potensi, dan kapasitas terpasang bisa dirangkum pada Tabel 1

Tabel 1 Sumber daya, potensi dan pemanfaatan energi air di Indonesia [2]

No	Sumber Energi	Sumber Daya	Potensi (Sumber Daya Teridentifikasi)	Kapasitas Terpasang	Presentase Pemanfaatan
1	Hidro	75,091 MW	45,379 MW	8,671 MW	19,10%
2	Mini-Mikrohidro	-	19,835 MW	2,6 MW	0,013%

Secara konvensional, energi mekanik air dikonversi melalui rekayasa teknologi dengan cara membuat bendungan untuk menampung air yang selanjutnya dibuat memiliki perbedaan *level*/ketinggian atau tekanan [3]. Namun, teknik tersebut menyebabkan masalah lingkungan seperti perubahan aliran alami sungai, terganggunya populasi biota air yang hidup di aliran sungai tersebut serta memiliki resiko potensi bencana jika bendungan tersebut gagal [1]. Di sisi lain, untuk keperluan pemenuhan kebutuhan listrik di daerah terpencil, seringkali terkendala masalah keekonomisan pembangunan jaringan listrik baru karena masih rendahnya konsumsi listrik dan faktor pembebanan [4]. Oleh karena itu, ekstraksi energi mekanik dari aliran air berupa sungai maupun saluran irigasi dengan beda ketinggian yang sangat rendah (*very low head*) dipertimbangkan sebagai salah satu solusi untuk pembangkitan listrik karena bisa mengurangi dampak negatif pembangunan bendungan [5].

Salah satu mekanisme atau metode yang sedang dikembangkan untuk pemanfaatan energi air dengan *head* yang sangat rendah adalah dengan menggunakan *gravitational water vortex* atau dikenal juga dengan istilah *free water vortex*. Fenomena vortex atau pusaran aliran air tersebut mengakibatkan percepatan dari kecepatan rendah menjadi kecepatan tinggi sehingga meningkatkan sejumlah energi kinetik yang terkandung di dalam aliran air, yang selanjutnya diharapkan akan lebih efisien untuk dikonversi ke dalam bentuk energi lain, salah satunya energi listrik. Dalam penelitiannya menunjukkan bahwa pemasangan *free vortex turbine* menghasilkan efisiensi mekanis maksimal sebesar 35,92 %, jauh lebih tinggi dari pada kincir air konvensional yang hanya menghasilkan efisiensi mekanis maksimal 13,69% [6]. Dari penelitian yang telah dilakukan, terdapat beberapa faktor yang memengaruhi kinerja dari *free water vortex turbine* seperti desain *vortex pool* yang optimum, desain turbin yang efisien dari segi konfigurasi maupun materialnya, perubahan parameter debit aliran, dan lain-lain.

Sistem pembangkit listrik mikrohidro sudah beroperasi secara efisien dengan perbedaan ketinggian yang rendah di beberapa negara seperti Taiwan, Chili, Estonia, Portugal, Prancis, Belgia, Suriname dan Indonesia. Perusahaan yang bergerak dalam bidang mikrohidro salah satunya adalah TURBULENT di negara Belgia yang sudah mengkomersilkan produk ini secara luas seperti pada gambar 1 daya yang dihasilkan sebesar 13 kW, 15 kW, dan untuk gambar c,d sebesar 5,5 kW. Oleh karena itu tujuan dari penelitian ini untuk mengetahui bentuk basin yang efisien untuk digunakan pada turbin *vortex*, menentukan bentuk sudu dan jumlah sudu agar putarannya optimal yang kemudian di simulasikan dengan *software* ANSYS untuk mendapatkan data yang mendekati hasil di lapangan.



(a)



(b)



(c)



(d)

Gambar 1 (a) Green School Bali, Indonesia, (b) Molino California Donihue, Chile, (c) Private House Otepää, Estonia, (d) Suez Versailles, France [7]

2. METODE

Selama penyusunan *narrative review* ini, kami mencari dan mengidentifikasi beberapa literatur seperti abstrak, artikel *review*, *paper* penelitian yang terkait dengan turbin *vortex* melalui Google Scholar dan Science Direct. Kata kunci yang digunakan adalah “Gravitational Water Vortex Power Plant + CFD simulation“. Setelah mengumpulkan literatur selanjutnya mengidentifikasi literatur tersebut dan mengklasifikasi data-data sekunder yang terbagi menjadi 4 (empat) yaitu pengaruh bentuk basin dan saluran masuk, parameter desain sudu, faktor eksternal, dan simulasi numerik. Setelah mendapatkan data sekunder dan mengklasifikasikannya lalu dilakukan analisis untuk penulisan *narrative review*. Berikut metode yang dilakukan dalam penyusunan *narrative review* seperti pada diagram alir 1.

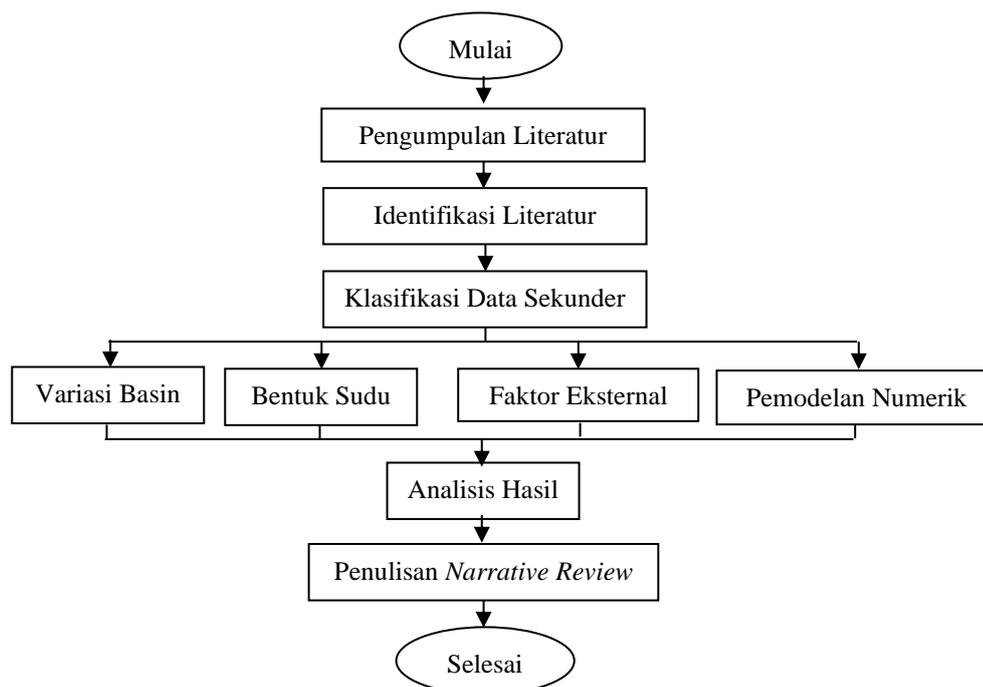


Diagram Alir 1. Metode Penelitian

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

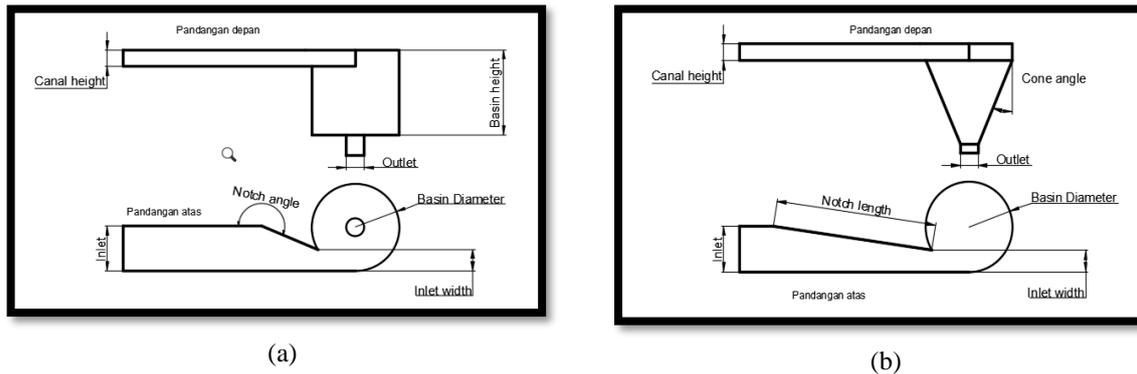
Gravitational water vortex power plant (GWVPP) merupakan salah satu jenis teknologi energi terbarukan menggunakan sumber energi air dan dikategorikan sebagai mini-mikrohidro, karena pembangkitan daya yang pernah dilaporkan tidak melebihi 100 kW [8]. Pada pembangkit ini, air awalnya dialirkan pada sebuah saluran/kanal buatan yang selanjutnya mengalir masuk secara tangensial menuju *circular* basin sehingga terbentuk pusaran aliran alami atau *free vortex*. Skematis dan penamaan parameter dari GWVPP diilustrasikan pada Gambar 2. Pembangkit ini hanya memerlukan *head* yang rendah (0,5–1 m), sehingga dalam proses konversi energinya bukan mendasarkan pada energi karena perbedaan tekanan (*pressure difference*), melainkan energi karena perubahan dinamika gaya (*dynamic force*) yang dibangkitkan dari *vortex* dikonversi menjadi energi mekanik poros turbin [9].

Teknologi GWVPP memiliki beberapa keuntungan karena beberapa karakteristik atau sifat dari *water vortex*, sebagai berikut : meningkatnya luas permukaan kontak dari air, kecepatan aliran menjadi lebih besar, polutan pada air menjadi lebih homogen karena terjadi aerasi secara alami sehingga mendukung penjernihan alami air baik dengan mikro-organisme maupun pembangkit yang dipasang, serta meningkatnya konsentrasi oksigen terlarut [10]. GWVPP bisa dibagi menjadi tiga kelompok variabel, yaitu konfigurasi basin, konfigurasi *inlet* basin dan *outlet orifice*, dan konfigurasi turbin [11].

Dari sisi konfigurasi turbin, penelitian mengenai karakteristik turbin yang sesuai melalui optimasi bentuk, profil sudu, jumlah dan ukuran masih berpeluang besar untuk dikembangkan lebih lanjut. Penemuan Christine P et al (2015) yang menyatakan bahwa efisiensi pembangkit meningkat seiring meningkatnya jumlah turbin (dari 2 menjadi 4) berkebalikan dengan temuan S. Dhakal et al [12] yang menyatakan bahwa efisiensi pembangkit justru menurun ketika jumlah sudu turbin ditambah serta ukuran turbin berpengaruh besar terhadap efisiensi pembangkit. Lebih lanjut dari sisi material turbin, Sriram et al [13] membandingkan bahwa material aluminium menghasilkan efisiensi daya yang lebih tinggi dari pada turbin yang menggunakan material besi. Penelitian ke depan bisa dikembangkan untuk mendapatkan material yang kuat namun tetap ringan untuk manufaktur turbin sehingga kinerja GWVPP bisa lebih baik lagi.

3.1. Pengaruh Desain Basin dan Saluran

Desain basin mampu mempengaruhi bentuk aliran pusaran gravitasi yang dapat digunakan untuk sumber energi alternatif atau terbarukan. Air masuk ke dalam bak melingkar secara tangensial yang menciptakan pusaran bebas dan energi diekstraksi dari pusaran bebas dengan menggunakan turbin [9]. Desain basin yang banyak digunakan yaitu basin kerucut dan basin silinder seperti pada gambar 2. Dengan diameter *inlet* dan *outlet* yang sama pada basin silinder dan basin kerucut, daya dan efisiensi maksimum didapat pada basin kerucut [10].



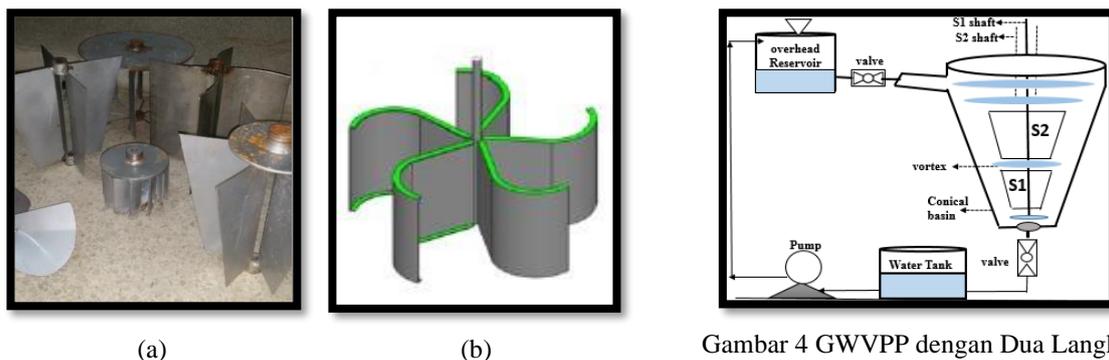
Gambar 2 Desain basin, (a) Basin silinder, (b) Basin kerucut [10]

Pada *Gravitaional Water Vortex Power Plant (GWVPP)* laju aliran masuk adalah air yang di alirkan ke saluran yang terhubung ke bak. Saluran itu berfungsi untuk mengarahkan aliran air ke dalam bak secara tangensial bias horizontal atau miring pada sudut yang di inginkan[11]. Bentuk saluran masuk(*inlet*) dan saluran keluar(*outlet*) juga mempengaruhi kecepatan aliran pusaran sehingga parameter ini harus dioptimalkan dengan penelitian ekstensif untuk mengahasilkan pusaran air yang lebih efektif[9].

3.2. Parameter Desain Sudu

Desain sudu mempengaruhi kecepatan putaran, bentuk sudu lengkung lebih efisien dari bentuk sudu datar[14]. Desain sudu melengkung paling sesuai untuk GWVPP dengan efisiensi sebesar 70,9 % [15]. Jumlah sudu dan dan pelat penyekat yang dipasang pada sudu turbin air mempengaruhi efisiensi turbin. Turbin air dengan 5 bilah ditemukan paling sesuai untuk digunakan dan juga menghasilkan torsi tertinggi karena jarak antar bilah efektif untuk menerima aliran air pada bilah seperti pada gambar 3 [16].

Sedangkan penelitian dari Nauman Hanif Khan [17] turbin air dengan 2 bilah lebih efisien karena dapat memanfaatkan banyak tenaga dan sudu yang berat bisa membuat putaran menjadi rendah. Posisi terbaik penempatan sudu adalah di bawah dan nilai efisiensi lebih besar untuk sudu dengan jumlah sudu yang lebih kecil[15]. Sedangkan untuk turbin yang menggunakan *two stage* penelitian Taqi Ahmad Cheema et al [18] mengatakan bahwa GWVT 2 tahap dengan basin kerucut memberikan performa yang lebih baik dari GWVT 1 tahap dengan basin yang sama dapat dilihat pada gambar 4. Material yang di gunakan pada sudu lebih baik menggunakan material aluminium karena menghasilkan efisiensi daya yang lebih tinggi dari pada turbin yang menggunakan material besi. Efisiensi turbin dengan material besi 33,56% dan alumunium 34,79%[13].



Gambar 3 Bentuk Sudu, (a) Sudu Datar [17] (b) Sudu Lengkung [16]

Gambar 4 GWVPP dengan Dua Langkah [18]

3.3. Pengaruh Faktor Eksternal

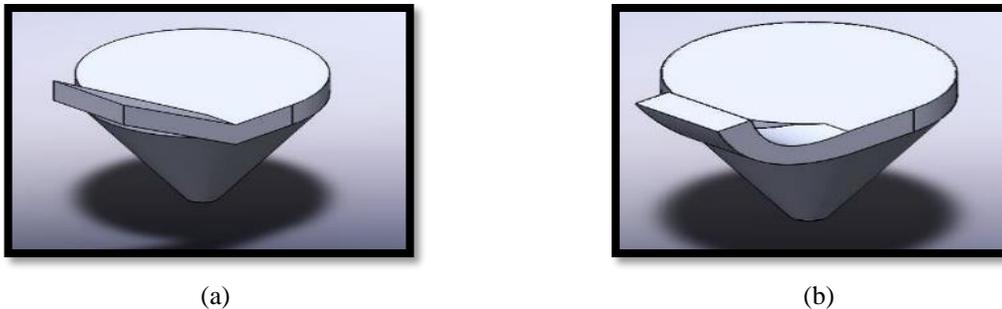
Volume air per satuan waktu disebut debit [19]. Aliran air pada sungai bervariasi dari waktu ke waktu karena perbedaan tingkat curah hujan. Debit atau aliran air dapat diukur melalui perangkat yang berbeda [20]. Kecepatan air juga bisa mempengaruhi daya *output* dari turbin. Hal ini bisa disebabkan oleh beberapa faktor, seperti debit air yang masuk ke dalam saluran, lebar *intake* pada saluran masuk dan juga ketinggian kanal atau bendungan [21]. Tidak semua sungai memiliki arus deras dan beda ketinggian yang signifikan, oleh karena itu GWVPP bisa diterapkan pada tipe sungai seperti itu. Eksperimen yang dilakukan dari debit 5,6 m³/jam hingga 8,8 m³/jam, didapat efisiensi GWVPP meningkat secara polinomial [22]

3.4. Simulasi Numerik Water Turbine Vortex

ANSYS Fluent menggunakan pendekatan hybrid finite-element/finite-volume untuk membedakan persamaan Navier-Stokes. Aliran di ruang pusran adalah sistem multifase yang sepenuhnya terpisah yang terdiri dari air dan udara. Untuk aliran permukaan bebas, ini didasarkan pada metode Volume Cairan (VOF). Fluent ANSYS menggunakan skema implisit dalam menyelesaikan persamaan fraksi volume. Dikarenakan kompleksitas model numerik pada program CFD, khususnya untuk simulasi transient yang dikombinasikan dengan sistem multiphase [23]. Dengan menggunakan permodelan numerik ada beberapa kelebihan, diantaranya dapat menghemat waktu dan biaya dibandingkan melakukan eksperimen langsung di lapangan, meskipun permodelan numerik tidak dapat menampilkan situasi kompleks yang sebenarnya di lapangan tetapi kemungkinan akan mendapat data akurat dan presisi [24]. Umumnya pada simulasi numerik digunakan yaitu *Computational Fluid Dynamic* (CFD).

3.4.1. Computational Fluid Dynamic

Dinamika fluida komputasi atau *Computational Fluid Dynamic* digunakan untuk menyelesaikan dan menganalisis masalah aliran fluida, perpindahan panas dan fenomena lainnya dengan cara memecahkan persamaan Navier-stokes secara numerik. Fokus pada bahasan ini adalah menggabungkan beberapa literatur terdahulu yang menggunakan simulasi numerik CFD terkait GWVPP. Havalдар et al [25] melakukan simulasi geometri *inlet*, ada dua geometri *inlet* disimulasikan yaitu *straight inlet* dan *Brachistochrone curve inlet*.

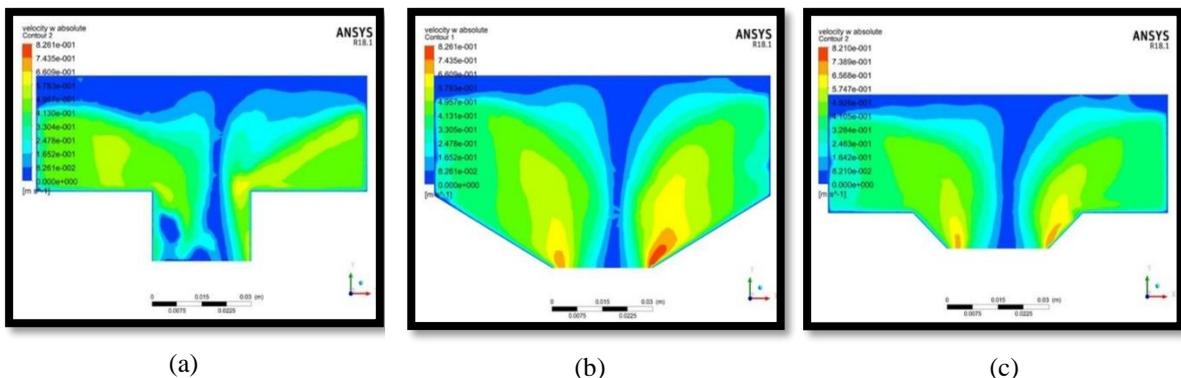


Gambar 5 Bentuk Saluran Masuk, (a) *Straight Inlet*, (b) *Brachistochrone Curve Inlet*

Dari hasil simulasi didapat *Brachistochrone curve inlet* menghasilkan kecepatan rata-rata aliran air sebesar 0,616272 m/s lebih baik dibandingkan *straight inlet* dengan kecepatan rata-rata 0,58919 m/s. Penelitian yang dilakukan oleh warjito et al [26] membahas tentang pengaruh geometri cekungan, ada tiga tipe basin yang digunakan untuk penelitian yang dirangkum pada tabel 2. Tipe B dapat mencapai kecepatan tertinggi dan merata. Kecepatan tinggi dibutuhkan karena jika kecepatan semakin tinggi maka tekanan akan turun secara bertahap. Kecepatan semakin tinggi secara bertahap hingga mencapai puncaknya saat mencapai outlet. Hal ini akan membuat perbedaan tekanan dan menimbulkan efek hisap yang membentuk formasi pusran air yang kuat seperti pada gambar 6.

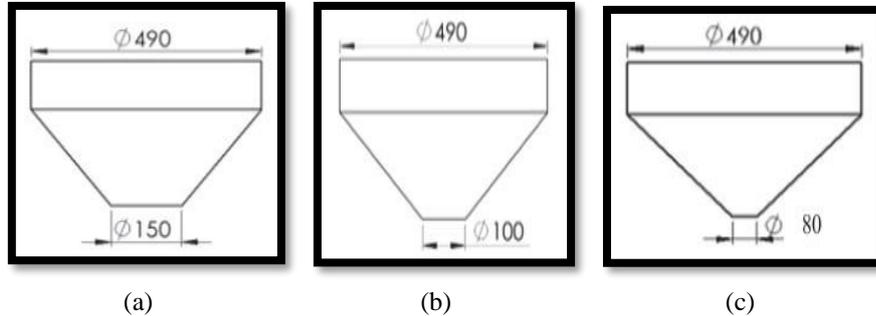
Tabel 2 Rangkuman geometri basin

No	Tipe	Variasi Bentuk Basin	Head (mm)	Kemiringan (°)
1	A	Basin silinder	20	-
2	B	Basin Kerucut	20	60
3	C	Basin Kerucut	50	60



Gambar 6 Simulasi CFD pada basin kerucut, (a) Tipe A, (b) Tipe B, (c) Tipe C [26]

Pamuji et al [23] juga melakukan simulasi pada basin berbentuk kerucut dengan diameter *inlet* 490 mm sedangkan diameter *outlet* dibedakan jadi 3 variasi, yang pertama 150 mm kedua 100 mm dan ketiga 80 mm seperti pada gambar 7. Kecepatan maksimal pada basin berbentuk kerucut lebih besar untuk diameter *outlet* yang kecil pada *head* dan debit yang sama. Karena penurunan luas aliran di cekungan kerucut, kecepatan meningkat sehingga mempertahankan laju aliran konstan.



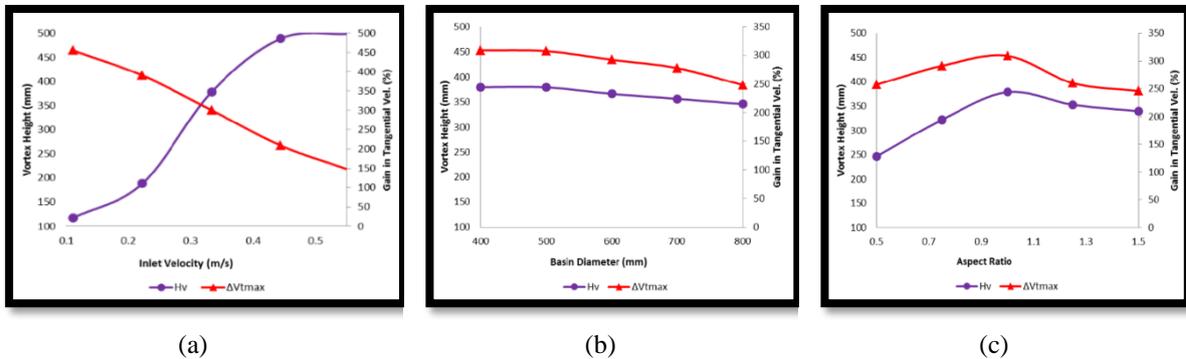
Gambar 7 Variasi basin kerucut, (a) D_{in}/D_{out} 3.26, (b) D_{in}/D_{out} 4.9, (c) D_{in}/D_{out} 6.12 [23]

Tabel 3 Output kinerja turbin dari basin kerucut [23]

No	Variasi Basin Kerucut	Torsi (N.m) pada 122 rpm	Daya (W)
1	D_{in}/D_{out} 3.26	0.126	1.609
2	D_{in}/D_{out} 4.9	0.139	1.775
3	D_{in}/D_{out} 6.12	0.168	2.145

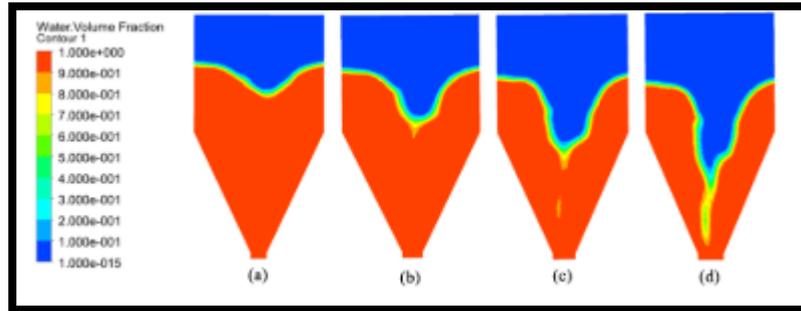
Variasi dengan diameter *outlet* minimum memiliki kecepatan maksimal karena didukung oleh fraksi volume air dan vektor kecepatan relatif, hal ini menyebabkan berkurangnya luas udara dan menciptakan sirkulasi pusaran air yang lebih besar di bagian tengah turbin.

J. Chatta et al [27] melakukan simulasi untuk mengetahui pengaruh dari kecepatan aliran menuju *inlet*, rasio pada basin, dan *outlet* diameter pada basin seperti pada gambar 8.



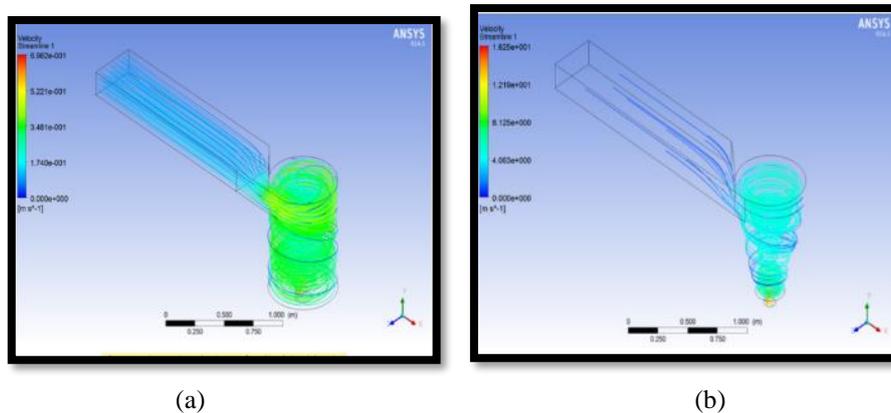
Gambar 8 Grafik Hasil Simulasi, (a) kecepatan aliran menuju inlet, (b) Rasio pada basin, (c) Outlet diameter pada basin [27]

Meningkatnya laju aliran atau laju aliran massa masuk ke basin menyebabkan meningkatnya ketinggian air dan kecepatan tangensial, tetapi kecepatan meningkat ketika inti pusaran sudah terbentuk. H. Dura et al [28] melakukan simulasi tentang *outlet* basin, variasi rasio cekungan basin dengan diameter *outlet* 50 mm, 60 mm, 70 mm, dan 80 mm seperti pada gambar 9. Semakin besar diameter *outlet* maka daerah udara semakin luas. Kecepatan air bisa rendah jika diameter *outlet* semakin kecil. Efisien maksimum 7,93 % dengan *output* daya 2,373 Watt pada 68 rpm.



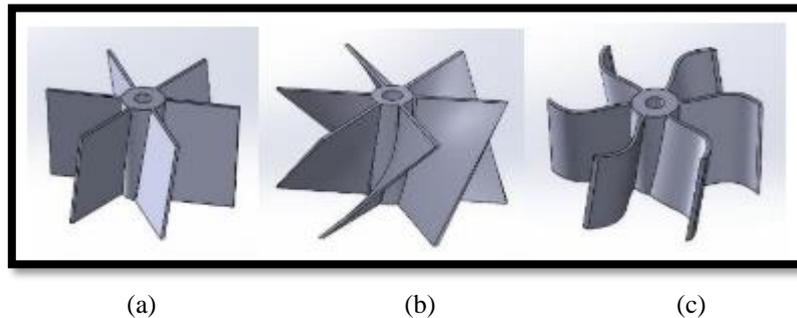
Gambar 9 Variasi fraksi volume air [27]

Dhakal et al [10] melakukan simulasi CFD untuk membandingkan geometri basin silinder dan kerucut serta pengoptimalan posisi dari *runner* seperti pada gambar 10.

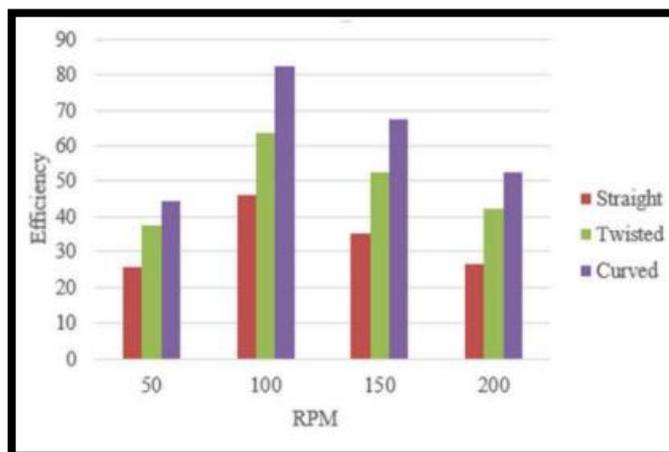


Gambar 10 Simulasi CFD, (a) Kontur kecepatan pada basin, (b) Simulasi aliran pada basin [10]

Dari hasil simulasi didapat bahwa kecepatan maksimum untuk kondisi inlet yang sama lebih besar di conical basin. Dhakal R. et al [29] menggunakan CFD untuk melakukan perbandingan bentuk *runner* diantaranya yaitu *runner* dengan *straight*, *twisted* dan *curved blade* seperti pada gambar 11.

Gambar 11 Runner, (a) *Runner Straight* (b), *Runner Twisted* (c), *Runner Curved Blade* [29]

Dapat di lihat pada gambar 12 bahwa dalam 4 kali simulasi dengan beda kecepatan putaran di dapat bahwa *runner curve blade* mempunyai efisiensi yang paling tinggi diantara *runner* yang lain dengan efisiensi paling tinggi 81 % pada 100 rpm.



Gambar 12 Kalkulasi efisiensi pada 3 turbin [29]

4. KESIMPULAN

Gravitational water vortex power plant (GWVPP) dapat menghasilkan energi listrik dengan beda ketinggian air yang rendah. Sehingga pembangkit listrik ini dapat digunakan di daerah yang aliran sungainya tidak memiliki beda ketinggian yang signifikan. Karena cadangan bahan bakar fosil menurun, GWVPP dapat digunakan sebagai alternatif pembangkit listrik yang ramah lingkungan dan hemat biaya.

Penelitian sebelumnya juga menunjukkan bahwa cekungan yang bentuk kerucut kinerjanya lebih baik dari pada cekungan yang bentuk silinder. Bentuk sudu lengkung lebih efisien dari bentuk sudu datar. Selain itu, laju aliran masuk memiliki pengaruh yang signifikan tentang efisiensi, ini meningkat dengan peningkatan laju aliran dan sebaliknya. Singkatnya, penelitian menunjukkan bahwa ada kesenjangan penelitian yang signifikan dalam pengembangan GWVPP. Rekomendasi penelitian dalam tulisan ini merupakan upaya percepatan pengembangan GWVPP dan penerapan langsung dilapangan.

5. UCAPAN TERIMAKASIH

Peneliti mengucapkan terimakasih yang sebesar-besarnya kepada Direktorat Pembelajaran dan Kemahasiswaan Direktorat Jenderal Pendidikan Tinggi Kementerian Pendidikan dan Kebudayaan atas pendanaan pada penelitian ini dengan nomor SK.....

DAFTAR PUSTAKA

- [1] J. Hanafi and A. Riman, "Life cycle assessment of a mini hydro power plant in Indonesia: A case study in Karai River," *Procedia CIRP*, vol. 29, pp. 444–449, 2015, doi: 10.1016/j.procir.2015.02.160.
- [2] D. Darmawan, *濟無 No Title No Title*, vol. 53, no. 9, 2019.
- [3] C. P. Jawahar and P. A. Michael, "A review on turbines for micro hydro power plant," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 72, no. October 2015, pp. 882–887, 2017, doi: 10.1016/j.rser.2017.01.133.
- [4] Erinofiardi *et al.*, "A Review on Micro Hydropower in Indonesia," *Energy Procedia*, vol. 110, no. December 2016, pp. 316–321, 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2017.03.146.
- [5] P. K. Talukdar, V. Kulkarni, and U. K. Saha, "Field-testing of model helical-bladed hydrokinetic turbines for small-scale power generation," *Renew. Energy*, vol. 127, pp. 158–167, 2018, doi: 10.1016/j.renene.2018.04.052.
- [6] P. Sritram and R. Suntivarakorn, "Comparative Study of Small Hydropower Turbine Efficiency at Low Head Water," *Energy Procedia*, vol. 138, pp. 646–650, 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2017.10.181.
- [7] Turbulent.be, "Turbulent," <https://www.turbulent.be/projects>, 2018. <https://www.turbulent.be/projects> (accessed Sep. 09, 2020).
- [8] O. B. Yaakob, Y. M. Ahmed, A. H. Elbatran, and H. M. Shabara, "A review on micro hydro gravitational vortex power and turbine systems," *J. Teknol. (Sciences Eng.)*, vol. 69, no. 7, pp. 1–7, 2014, doi: 10.11113/jt.v69.3259.
- [9] S. Wanchat and R. Suntivarakorn, "Preliminary design of a vortex pool for electrical generation," *Adv. Sci. Lett.*, vol. 13, no. June, pp. 173–177, 2012, doi: 10.1166/asl.2012.3855.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] S. Dhakal, S. Nakarmi, P. Pun, A. B. Thapa, and T. R. Bajracharya, “Development and Testing of Runner and Conical Basin for Gravitational Water Vortex Power Plant,” *J. Inst. Eng.*, vol. 10, no. 1, pp. 140–148, 2014, doi: 10.3126/jie.v10i1.10895.
- [13] P. Sritram, W. Treedet, and R. Suntivarakorn, “Effect of turbine materials on power generation efficiency from free water vortex hydro power plant,” *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 103, no. 1, 2015, doi: 10.1088/1757-899X/103/1/012018.
- [14] K. T. Z. E. Cheng, “Gravitational water vortex turbine with two types of runner blades,” no. November, 2015.
- [15] A. Gautam, A. Sapkota, S. Neupane, J. Dhakal, A. B. Timilsina, and S. Shakya, “Study on Effect of Adding Booster Runner in Conical Basin : Gravitational Water Vortex Power Plant : A Numerical and Experimental Approach,” no. August 2017, pp. 107–113, 2016.
- [16] P. Sritram and R. Suntivarakorn, “The effects of blade number and turbine baffle plates on the efficiency of free-vortex water turbines,” *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 257, no. 1, 2019, doi: 10.1088/1755-1315/257/1/012040.
- [17] A. Cristea, “blade optimization of gravitational water vortex turbine,” *Rev. Bras. Ergon.*, vol. 9, no. 2, p. 10, 2016, doi: 10.5151/cidi2017-060.
- [18] T. A. Cheema, R. Ullah, and A. S. Saleem, “Performance analysis of a two-stage gravitational water vortex turbine,” *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 291, no. 1, 2019, doi: 10.1088/1755-1315/291/1/012039.
- [19] M. I. Nafi, “Rancang Bangun Gravitational Water Vortex Power Plant (GWVPP) Berbasis Basin Silinder,” vol. 5, no. 1, pp. 27–34, 2020.
- [20] A. Ali, F. S. Baig, and A. H. Memon, “Designing Hydel Power Generation Capacity using a Mini/Micro Hydro Power Plant at Left Bank Outfall Drain Drainage System, near Goth Ahori, Jhuddo, Sindh,” *Mehran Univ. Res. J. Eng. Technol.*, vol. 39, no. 3, pp. 554–563, 2020, doi: 10.22581/muet1982.2003.11.
- [21] R. Dhakal, R. K. Chaulagain, T. Bajracharya, and S. Shrestha, “Economic feasibility study of gravitational water vortex power plant for the rural electrification of low head region of nepal and its comparative study with other low head power plant,” vol. 1, no. 1, pp. 127–135, 2015.
- [22] 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.
- [23] D. S. Pamuji, N. Effendi, and D. Sugati, “Numerical study on the performance and flow field of varied conical basin for efficient gravitational water vortex power plant,” *AIP Conf. Proc.*, vol. 2187, no. December, 2019, doi: 10.1063/1.5138256.
- [24] M. Nachtane, M. Tarfaoui, I. Goda, and M. Rouway, “A review on the technologies, design considerations and numerical models of tidal current turbines,” *Renew. Energy*, vol. 157, pp. 1274–1288, 2020, doi: 10.1016/j.renene.2020.04.155.
- [25] S. Havaladar, “Analyzing Geometries for Inlet Flow Channels to Gravitational Water Vortex Chamber,” no. August, 2020, doi: 10.35291/2454-9150.2020.0149.
- [26] Warjito, Budiarmo, C. R. Christopher, and D. Adanta, “The effect of basin geometry on gravitational vortex hydropower,” *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 788, no. 1, 2020, doi: 10.1088/1757-899X/788/1/012081.
- [27] J. A. Chattha, T. A. Cheema, and N. H. Khan, “Numerical investigation of basin geometries for vortex generation in a gravitational water vortex power plant,” *2017 8th Int. Renew. Energy Congr. IREC 2017*, no. Irec, 2017, doi: 10.1109/IREC.2017.7926028.
- [28] H. B. Dura, “Design and Analysis of Gravitational Water Vortex Basin and Runner Design and Analysis of Gravitational Water Vortex Basin and Runner,” no. December 2019, pp. 157–164, 2020.
- [29] R. Dhakal *et al.*, “Computational and experimental investigation of runner for gravitational water vortex power plant,” *2017 6th Int. Conf. Renew. Energy Res. Appl. ICRERA 2017*, vol. 2017-Janua, pp. 365–373, 2017, doi: 10.1109/ICRERA.2017.8191087.
- [30] Y. Nishi and T. Inagaki, “Performance and Flow Field of a Gravitational Vortex Type Water Turbine,” *Int. J. Rotating Mach.*, vol. 2017, 2017, doi: 10.1155/2017/2610508.