



Analisis pengembangan hidrokinetik turbin gorlov akibat penambahan luas bidang tangkap

Try Antomo ^{a,1}, I Made Kamiana ^a, Dwi Anung Nindito ^a

^aKampus UPR Tunjung Nyaho, Jalan Yos Sudarso, Kotak Pos 2/PLUKP, Palangka Raya, 73112, Kalimantan Tengah, Indonesia.

¹E-mail: antomo.try@gmail.com

INFO ARTIKEL

Riwayat artikel:

Diajukan pada 26 September 2020

Direvisi pada 27 September 2020

Disetujui pada 27 November 2020

Tersedia daring pada 30 November 2020

Kata kunci:

Hidrokinetik, turbin gorlov, *pair*, luas bidang tangkap, turbin DNA.

Keywords:

Hydrokinetic, gorlov turbine, *pair*, frontal area, DNA turbine.

ABSTRAK

Turbin gorlov merupakan salah satu teknologi turbin hidrokinetik yang berbeda dengan turbin konvensional. Turbin gorlov dapat dipasang secara vertikal maupun horizontal dan mampu digunakan pada kondisi *low-head*, namun memiliki luas bidang tangkap yang bergantung dari dimensi lengkung bilah heliks. Hidrokinetik turbin gorlov digunakan sebagai pembangkit listrik tenaga hidro dengan memanfaatkan energi kinetik dari aliran air sungai maupun pasang surut. Turbin DNA merupakan jenis turbin baru hasil pengembangan desain turbin gorlov dengan cara menambahkan komponen *pair* yang bertujuan menambah luas bidang tangkap (A_f). Studi ini dilakukan dengan membandingkan performa yang dihasilkan turbin gorlov dan turbin DNA. Pengujian dilakukan pada saluran prismatik dengan variasi kecepatan aliran 0,188 – 0,222 m/s. Pengaruh penambahan luas bidang tangkap (A_f) dengan melakukan penambahan komponen *pair* menyebabkan penurunan performa C_p dan λ pada desain turbin DNA. Turbin gorlov menghasilkan *tip-speed ratio* (λ) 2,11 – 2,24, dan *coefficient of power* (C_p) 0,26 – 0,30. Turbin DNA menghasilkan *tip-speed ratio* (λ) dengan range 0,91 – 1,07 dan *coefficient of power* (C_p) 0,19 – 0,24. Rotasi per menit (RPM) yang dihasilkan dari turbin gorlov dan turbin DNA masing-masing adalah 31,1 – 38,1 dan 13,0 – 17,6. Torsi (τ) turbin gorlov dan turbin DNA masing-masing adalah 0,025 – 0,038 Nm dan 0,054 – 0,085 Nm. Pengaruh penambahan luas bidang tangkap dengan penambahan komponen *pair* menyebabkan rotasi per menit (RPM) turbin DNA mengalami penurunan, akan tetapi memiliki keunggulan dalam nilai torsi (τ) yang dihasilkan. Hal ini terlihat dari kecenderungan grafik torsi (τ) terhadap penambahan kecepatan aliran pada sudut rotasi $0^\circ < \theta < 90^\circ$, $120^\circ < \theta < 210^\circ$ dan $240^\circ < \theta < 330^\circ$.

ABSTRACT

The Gorlov turbine is a hydrokinetic turbine technology different from conventional water turbine. It can be mounted vertically or horizontally and also be used in low-head conditions however, it has a frontal area which depends on the curved dimensions of helical blade. Hydrokinetic turbines are used for hydroelectric power plants by converting kinetic energy from river and tidal streams. The DNA turbine is a new type of turbine developed by Gorlov turbine design with the addition of *pair* components aiming to increase the frontal area (A_f). This study compared performance of Gorlov turbine and DNA turbine. The testing was carried out on a prismatic channel with a flow velocity variation of 0.188 - 0.222 m/s. The effect of increasing frontal area (A_f) with the addition of *pair* components caused a decrease in C_p and λ performance on DNA turbine design. Gorlov turbine produced a tip-speed ratio (λ) 2.11 - 2.24 and coefficient of power (C_p) of 0.26 - 0.30. DNA turbine produced tip-speed ratio (λ) of 0.91 - 1.07 and coefficient of power (C_p) value of 0.19 - 0.24. The rotation per minute (RPM) values resulting from Gorlov turbine and DNA turbine were 31.1 - 38.1 and 13.0 - 17.6, respectively. Torque (τ) of Gorlov turbine and DNA turbine were 0.025 - 0.038 Nm and 0.054 - 0.085 Nm, respectively. The effect of increasing frontal area (A_f) with the addition of *pair* components caused the rotation per minute (RPM) of the DNA turbine to decrease. However, it had an advantage in the resulting torque value. This could be seen from the graphical trend of torque value (τ) to the increase in the flow velocity at rotation angles of $0^\circ < \theta < 90^\circ$, $120^\circ < \theta < 210^\circ$ and $240^\circ < \theta < 330^\circ$.

Tersedia pada: <http://dx.doi.org/10.36055/tjst.v16i2.9186>



1. Latar Belakang

Tenaga hidro (*hydropower*) menjadi salah satu sumber energi terbarukan (*renewable energy*) yang dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi pembangkit listrik [1]. Biaya pembangunan yang murah dan efektif membuat beberapa daerah terpencil di negara-negara maju dan berkembang menerapkan turbin hidrokinetik sebagai pembangkit listrik tenaga hidro [2]. Turbin hidrokinetik merupakan teknologi yang memanfaatkan energi kinetik dari aliran air arus sungai ataupun pasang surut dengan cara memanfaatkan luas bidang tangkap aliran dari lengkung bilah heliks turbin yang digunakan [3].

Turbin gorlov merupakan tipe turbin hidrokinetik *cross-flow* hasil pengembangan dari bentuk *straight blades* milik Darrieus [4]. Turbin gorlov memiliki bentuk bilah (*blade*) heliks yang dapat dipasang secara horizontal maupun vertikal [5]. Salah satu kelebihan turbin gorlov yaitu siklus rotasi yang lebih baik pada kondisi *low-head*. Bilah heliks yang mengelilingi badan turbin mengakibatkan bidang tangkap aliran air merata di setiap rotasi turbin gorlov [6]. Dari hasil studi [7-10] diketahui bahwa model turbin heliks memiliki rentang nilai *tip-speed ratio* dan nilai *coefficient of power* yang beragam. Hasil *blockage correction* pada GHT [7] (*gorlov helical turbine*) menghasilkan nilai maksimum $C_p = 0,28$ pada saat $\lambda = 2,1$. Studi [8] melakukan penilaian lapangan terhadap performa turbin hidrokinetik yang diuji pada kondisi laboratorium. Hasil studi [8] menghasilkan nilai puncak $C_p = 0,17$ pada saat $\lambda = 1,3$. Pengujian [9] dilakukan dengan variasi kecepatan $0,5 - 2$ m/s menghasilkan nilai optimum $C_p = 0,23$ untuk sudut puntir 120° . Hasil studi [10] menunjukkan pada sudut puntir 120° menghasilkan nilai *tip-speed ratio* (λ) antara $2,0 - 2,8$ dan nilai *coefficient of power* (C_p) $0,05 - 0,27$.

Dalam studi ini dikembangkan jenis turbin baru yang diberi nama turbin DNA, yang merupakan hasil inovasi dari pengembangan turbin gorlov. Tujuan dari studi ini ialah melihat performa yang dihasilkan akibat penambahan luas bidang tangkap (A_f) dengan menambahkan komponen *pair* yang dipasangkan di bagian atas, tengah dan bawah *blade* turbin DNA. Penambahan komponen *pair* memperbesar luas bidang tangkap turbin DNA saat siklus rotasi, sehingga energi kinetik aliran air yang melewati badan turbin dapat dikonversi secara optimal.

Daftar istilah dan singkatan

A_f	= Luas bidang tangkap (m^2)	r	= Jari-jari turbin (m)
AR	= <i>Aspect ratio</i>	RPM	= Rotasi Per Menit
C_{blade}	= Panjang <i>chord</i> bilah turbin (m)	V_{water}	= Kecepatan aliran (m/s)
C_p	= <i>Coefficient of power</i>	θ	= Sudut rotasi turbin ($^\circ$)
C_{pair}	= Panjang <i>chord</i> komponen <i>pair</i> (m)	λ	= <i>Tip-speed ratio</i>
D	= Lebar turbin (m)	π	= Nilai <i>phi</i>
H	= Tinggi turbin (m)	ρ_{water}	= Massa jenis air (kg/m^3)
N	= Jumlah bilah turbin	σ	= <i>Solidity ratio</i>
$P_{turbine}$	= Daya turbin (watt)	τ	= Torsi (Nm)
P_{water}	= Daya air (watt)	φ	= Sudut puntir turbin ($^\circ$)
H_t	= Beda tinggi antara permukaan air di tandon dengan permukaan air di saluran (m)	ω	= Kecepatan sudut (rad/s)

2. Perkembangan Turbin Hidrokinetik dalam Pemanfaatan Tenaga Hidro

2.1. Hasil Studi Teknologi Tenaga Hidro & Pengembangan Desain Turbin Hidrokinetik

Klasifikasi turbin pembangkit listrik tenaga hidro terbagi atas dua bagian yaitu fasilitas dan kapasitas. Fasilitas turbin pembangkit listrik tenaga hidro dapat diterapkan pada waduk, aliran air, tampungan pompa, saluran air dan *gravitational vortex* [2]. Kapasitas turbin dinilai berdasarkan kemampuan skala daya yang dihasilkan yaitu *large*, *small*, *mini*, *micro* dan *pico*. Hasil studi [11] menjelaskan perencanaan PLTMH (Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro) di permukiman tepi sungai dapat digunakan dalam pemenuhan kebutuhan listrik desa. Pada Tabel 1 ditunjukkan tentang pembahasan dan perkembangan teknologi tenaga hidro yang dimanfaatkan pada kondisi aliran sungai.

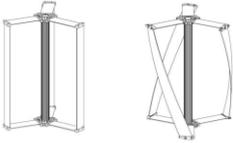
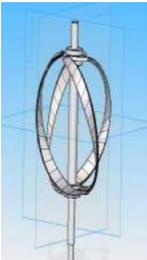
Tabel 1. Penerapan teknologi turbin hidrokinetik dan peranannya dalam pemanfaatan energi kinetik dari aliran air.

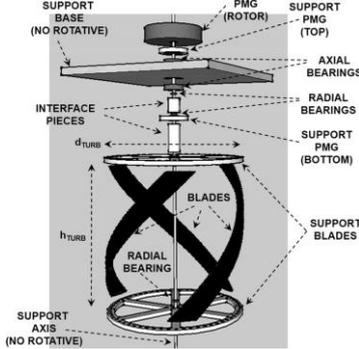
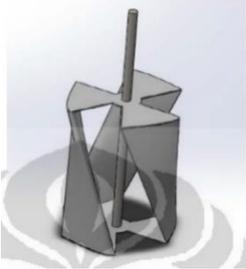
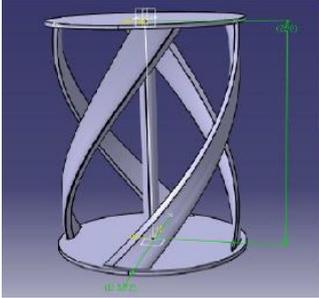
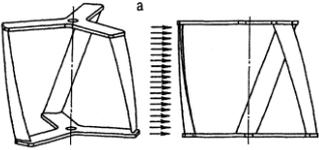
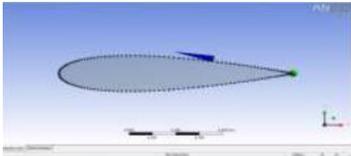
Peneliti	Fokus pengamatan	Hasil studi turbin hidrokinetik
A. H. Elbatran, <i>et al.</i> [2]	Sistem dan kinerja turbin tenaga hidro	<ul style="list-style-type: none"> Teknologi tenaga hidro dengan menggunakan aliran sungai sendiri termasuk dalam skala kecil. Tenaga hidro dalam skala kecil ini cukup efisien dan menjadikannya pilihan sebagai sebuah investasi jangka panjang, dikarenakan kemudahan dalam pembuatannya dan yang tidak terlalu luas.
A. Kumar dan R. Saini [3]	Pengembangan sistem pembangkit listrik hidrokinetik	<ul style="list-style-type: none"> Potensi tenaga hidro yang ada pada aliran air sungai maupun kanal dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi terbarukan di daerah pedesaan. Kecepatan aliran minimum untuk mengoperasikan teknologi turbin hidrokinetik adalah $1 - 2$ m/s. Untuk hasil optimum diperlukan kecepatan aliran $2 - 3,5$ m/s.
D. A. Nindito dan I. M. Kamiana [12]	Potensi tenaga air wilayah pemukiman tepi sungai	<ul style="list-style-type: none"> Turbin air tipe <i>cross-flow</i> menjadi salah satu teknologi untuk dapat diterapkan di wilayah pemukiman tepi sungai, yang mana dalam pelaksanaannya tidak memerlukan <i>head</i> yang tinggi.
E. Muljadi <i>et al.</i> [13]	Pembangkit listrik untuk generator sungai dan pasang surut	<ul style="list-style-type: none"> Diketahui bahwa perubahan peningkatan kecepatan aliran yang tiba-tiba secara signifikan tidak serta-merta menghasilkan performa turbin hidrokinetik yang terus meningkat. Akan tetapi terjadi penurunan seketika yang bersifat sementara, kemudian mulai meningkat lagi.

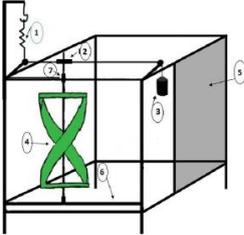
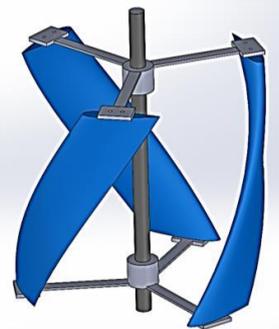
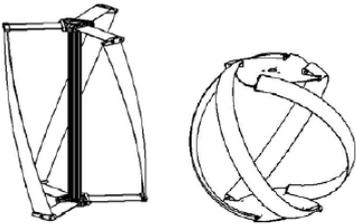
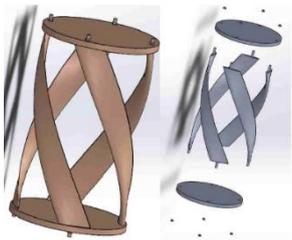
Peneliti	Fokus pengamatan	Hasil studi turbin hidrokinetik
Erinofardi <i>et al.</i> [1]	Fasilitas mikrohidro di Indonesia	<ul style="list-style-type: none"> Teknologi mikro hidro telah digunakan di beberapa wilayah, akan tetapi untuk skala yang besar masih belum tereksplotasi. Indonesia telah mengembangkan pemanfaat pada sumber energi terbarukan seperti tenaga hidro, hal ini dilakukan sebagai upaya mengurangi ketergantungan akan bahan bakar fosil.
J. Khan [14]	Model dan sistem desain turbin arus sungai	<ul style="list-style-type: none"> Penambahan jumlah <i>blade</i> menghasilkan peningkatan terhadap <i>ripple frequency</i> dan torsi rata-rata. Turbin menghasilkan performa yang baik di <i>tip-speed ratio</i> 1,15 dengan efisiensi 0,1 – 0,4.
J. McGlynn [15]	Sektor energi hidrokinetik sungai	<ul style="list-style-type: none"> Beberapa hal yang menjadi kelebihan dari RHK (<i>River Hydrokinetic</i>) memiliki potensial kapasitas yang dihasilkan hingga 95%, minim akan pencemaran sehingga dapat dipergunakan untuk keberlangsungan jangka panjang, dan dapat memenuhi kebutuhan energi listrik bagi masyarakat lokal.
K. Sornes [16]	Turbin arus sungai skala kecil	<ul style="list-style-type: none"> Turbin air dalam skala kecil telah banyak diterapkan seperti yang dilakukan masyarakat di daerah sungai amazon. Turbin hidrokinetik hingga saat ini merupakan teknologi yang masih dalam tahap pengembangan. Pemanfaatan teknologi tenaga hidro ini memiliki banyak kelebihan dari segi ramah lingkungannya dan minim akan polusi. Akan tetapi tetap memperhatikan aspek lainnya, seperti pengaruh perubahan biota air atau perubahan karakteristik aliran/sedimen yang akan dihasilkan.
M. I. Yuce dan A. Muratoglu [17]	Sistem konversi hidrokinetik	<ul style="list-style-type: none"> Sistem konversi energi aliran air diketahui daya keluaran turbin berbanding lurus dengan kecepatan aliran. Peningkatan kecepatan aliran menghasilkan daya keluaran yang lebih tinggi.
T. Engineering [18]	Pengembangan dalam peningkatan efisiensi turbin	<ul style="list-style-type: none"> Turbin heliks menjadi salah satu teknologi pemanfaatan daya dari aliran air yang efisien, biaya pembangunan murah dan ramah lingkungan. Studi laboratorium dan lapangan dibutuhkan dalam pengoptimalan daya.

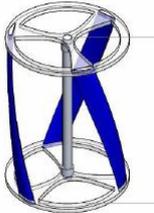
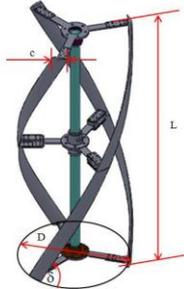
Parameter optimum untuk berbagai tipe turbin hidrokinetik belum memiliki standar acuan. Perbedaan karakteristik lokasi turbin yang berbeda-beda mengharuskan penyesuaian terhadap turbin hidrokinetik tersebut [3]. Secara umum parameter utama yang mempengaruhi performa suatu turbin hidrokinetik antara lain *aspect ratio*, *solidity ratio*, bentuk bilah turbin, sudut puntir dan jumlah bilah turbin [19]. Variasi kecepatan aliran juga memiliki peranan penting dalam melihat performa yang dihasilkan turbin hidrokinetik seperti yang diuji pada studi [8]. Pada Tabel 2 menunjukkan hasil studi yang telah dilakukan pada model turbin heliks. Studi yang dilakukan sangat beragam seperti variasi bilah turbin [20], variasi sudut puntir [9], pengujian secara lapangan [21], maupun pengamatan secara numerik menggunakan bantuan *software* [22].

Tabel 2. Hasil studi pengembangan turbin heliks.

Peneliti	Fokus pengamatan	Hasil desain turbin dalam penelitian	Pembahasan hasil studi pengembangan turbin heliks
A. Johnston dan M. Wosnik [5]	Karakteristik performa turbin		<ul style="list-style-type: none"> Pengamatan terhadap <i>tip-speed ratio</i> dapat memprediksi karakteristik beban <i>unsteady</i>, performa optimal dan daya yang dihasilkan turbin. <i>Tip-speed ratio critical</i> terjadi saat hubungan torsi dan sudut putar menghasilkan grafik nilai torsi yang negatif di sudut $0^\circ < \theta < 180^\circ$ dan $180^\circ < \theta < 360^\circ$.
A. N. Gorban', A. M. Gorlov, dan V. M. Silantyev [23]	Batas efisiensi turbin		<ul style="list-style-type: none"> Untuk mencapai hasil maksimum, turbin hidrokinetik harus berada pada kondisi dimana tahanan yang terjadi relatif kecil, sehingga sebagian besar aliran air ($\geq 61\%$) dapat melalui badan turbin agar di konversi. Pengamatan secara tiga-dimensi terhadap turbin air dengan bilah heliks menunjukkan bahwa mampu menghasilkan efisiensi performa hingga 35%.
C. Rakesh, A. T. V. Joseph, A. H. A. Krishna, Advaith M, dan N. Charan [24]	Studi teoritis dan performa hasil pengujian		<ul style="list-style-type: none"> Hasil analisis dari skala model ini menunjukkan bahwa pada kondisi kecepatan aliran 2 – 3 m/s mampu menghasilkan nilai <i>RPM</i> hingga 100. Hasil pengamatan vektor kecepatan diketahui bahwa aliran dalam saluran sebelum mengenai turbin spiral adalah aliran laminar kemudian berubah menjadi turbulen setelah melewati turbin. Hal ini membuat kecepatan aliran di bagian hilir menjadi berkurang.

Peneliti	Fokus pengamatan	Hasil desain turbin dalam penelitian	Pembahasan hasil studi pengembangan turbin heliks
<p>E. Alvarez, M. Rico-Secades, E. L. Corominas, N. Huerta-Medina, dan J. Soler Guitart [25]</p>	<p>Pengujian model turbin hidrokinetik skala mikro</p>		<ul style="list-style-type: none"> • Pengujian model turbin dilakukan dengan meningkatkan kecepatan aliran hingga 3 m/s dalam kurun waktu 100 detik. • Pada grafik daya (<i>power</i>) yang dihasilkan terjadi peningkatan daya yang dihasilkan turbin seiring dengan bertambahnya kecepatan aliran. Akan tetapi pada detik ke 40 dengan nilai kecepatan aliran yang masih berada di 2,5 m/s, grafik daya yang dihasilkan mencapai di titik optimum.
<p>F. Hatomi [22]</p>	<p>Analisis penerapan turbin di kondisi arus laut</p>		<ul style="list-style-type: none"> • Pengujian dilakukan pada variasi kecepatan antara 1 – 1,7 m/s. Hasil perbandingan kinerja antara turbin gorlov dan turbin darrieus menunjukkan bahwa turbin gorlov menghasilkan nilai torsi yang lebih besar.
<p>H. Joshi, A. Dwivedi, A. Anand, dan P. P. Patil [4]</p>	<p>Desain dan analisis turbin dengan bilah heliks</p>		<ul style="list-style-type: none"> • Pengujian dilakukan dengan menggunakan CFD (<i>Computational Fluid Dynamics</i>). Jumlah bilah yang digunakan 4 buah, dilaksanakan pada satu variasi kecepatan aliran yang tetap di 1,5 m/s. • Hasil studi menunjukkan bahwa gaya <i>lift</i> mempengaruhi rotasi turbin gorlov. Pola grafik yang diperlihatkan menunjukkan peningkatan pada posisi awal sudut serang kemudian stabil pada kondisi tersebut. Gaya <i>drag</i> juga berpengaruh pada turbin ini akan tetapi berbeda di tiap sudutnya.
<p>G. G. Portnov dan I. Z. Palley [6]</p>	<p>Analisis bentuk puntir dan lengkung pada desain Turbin Gorlov</p>		<ul style="list-style-type: none"> • Turbin Gorlov memiliki kestabilan yang lebih baik dalam melakukan rotasi dan torsi dikarenakan bentuk bilangannya yang heliks melingkupi keseluruhan bidang tangkap saat turbin sedang berotasi. • Beberapa faktor yang mempengaruhi desain yaitu: dimensi, profil bilah, jumlah bilah, posisi penempatan sumbunya, hingga bahan yang digunakan.
<p>R. M. Lopulalan, S. Sarwito, dan E. S. Koehardono [20]</p>	<p>Pembangkit listrik tenaga arus laut</p>		<ul style="list-style-type: none"> • Pengujian dilakukan dengan memvariasikan jumlah bilah yang digunakan serta ukuran panjang <i>chord</i>. • Dari hasil simulasi ke semua variasi turbin diperoleh grafik performa dengan kecenderungan yang sama. • Peningkatan kecepatan aliran berbanding lurus dengan daya keluaran dan juga torsi yang dihasilkan
<p>M. T. Faturrahman, D. A. Irfanto dan B. Bimantoro [26]</p>	<p>Inovasi kapal pembangkit listrik yang terintegrasi dengan Turbin Gorlov</p>		<ul style="list-style-type: none"> • Melakukan inovasi turbin gorlov sebagai pembangkit listrik tenaga air yang dapat diaplikasikan pada kapal kontainer. • Simulasi terhadap desain turbin gorlov dengan berbagai ukuran dilakukan pada kecepatan arus 4 m/s. Hasil yang diperoleh turbin dengan jari-jari 7 m menghasilkan torsi 297.199 Nm, rotasi per menit 9,55 dan efisiensi 0,54.

Peneliti	Fokus pengamatan	Hasil desain turbin dalam penelitian	Pembahasan hasil studi pengembangan turbin heliks
Niharman dan Sipahutar [27]	Pengaruh variasi sudut pengarah bilah turbin		<ul style="list-style-type: none"> • Pengujian turbin hidrokinetik dilakukan dengan memvariasikan sudut pengarah turbin 0°, 30°, 45° dan 60°. • Pengujian yang dilakukan pada kecepatan aliran 0,85 m/s menghasilkan nilai rotasi per menit 110. • Hasil performa optimum yang diperoleh dari sudut pengarah 60° mampu menghasilkan efisiensi turbin hingga 28,5%.
P. K. Talukdar, et al. [19]	Pengujian turbin hidrokinetik di kondisi <i>zero head</i>		<ul style="list-style-type: none"> • Hasil pengujian yang dilakukan di saluran terbuka dengan kecepatan aliran 0,6 – 3,0 m/s. menunjukkan bahwa putaran yang dihasilkan turbin lebih lambat. Nilai performa <i>coefficient of power</i> (C_p) yang dihasilkan menunjukkan peningkatan yaitu sebesar 0,14 pada <i>tip-speed ratio</i> 1,01 untuk kecepatan aliran 0,8 m/s.
P. Bachant dan M. Wosnik [7]	Perbandingan kinerja model bilah heliks dengan bilah spiral		<ul style="list-style-type: none"> • Hasil pengujian pada kecepatan aliran 1,5 m/s menunjukkan bahwa model bilah heliks mempunyai performa yang lebih baik dari segi kemampuan rotasi dan juga konversi energi kinetik dari aliran air. • Hasil <i>blockage correction</i> pada GHT [28] (<i>gorlov helical turbine</i>) menghasilkan nilai maksimum $C_p = 0,28$ pada saat $\lambda = 2,1$. Pada pengembangan penelitian selanjutnya, Bachant dan Wosnik [28] menambahkan estimasi terhadap <i>exergy efficiency</i>. Nilai ini menunjukkan kemampuan kerja dari turbin berupa potensi daya yang dihasilkan.
P. Gunai, A. Bhonge, dan K. Joshi [29]	Studi numerik CFHT (<i>Cross flow hydrokinetic turbine</i>)		<ul style="list-style-type: none"> • Simulasi dilakukan dengan CFD (<i>computational fluid dynamics</i>) pada kecepatan <i>steady</i> 1,5 m/s. Pengamatan terhadap perbandingan model menghasilkan hasil yang seragam pada variasi tekanan, gaya <i>drag</i> dan gaya <i>lift</i>.
P. Gunai, S. Gumaste, S. Gathe, dan A. K. Das [30]	Desain, analisis dan pengembangan CFHT (<i>Cross flow hydrokinetic turbine</i>)		<ul style="list-style-type: none"> • Hasil pengembangan model turbin hidrokinetik <i>cross flow</i> dari desain dasar menghasilkan nilai torsi 175,33 Nm dan laju rotasi per menit 70,66.

Peneliti	Fokus pengamatan	Hasil desain turbin dalam penelitian	Pembahasan hasil studi pengembangan turbin heliks
R. J. Cavagnaro dan B. Polagye [8]	Pengujian turbin hidrokinetik di kondisi lapangan		<ul style="list-style-type: none"> Pengujian dilaksanakan pada variasi kecepatan 1,0 – 2,1 m/s. Hasil studi [20] menghasilkan nilai puncak $C_p = 0,17$ pada saat $\lambda = 1,3$ Pengaruh nilai <i>solidity</i> rotor yang tinggi menghasilkan nilai puncak C_p yang rendah.
S. Phommachanh, P. Sutikno dan O. Shinnosuke [9]	Pengujian turbin hidrokinetik pada kondisi <i>extremely low head</i>		<ul style="list-style-type: none"> Pengujian dilakukan pada kondisi <i>low head</i> kurang dari 2m. Dilaksanakan pada kecepatan aliran 0,5 – 2,0 m/s untuk pengujian eksperimental. Hasil eksperimental dengan sudut puntir (φ) 120° menghasilkan nilai $C_p = 0,23$.
S. Pongduang, C. Kayankannavee dan Y. Tiaple [10]	Investigasi eksperimental terhadap variasi sudut puntir		<ul style="list-style-type: none"> Pengujian dilaksanakan dengan melakukan variasi terhadap sudut puntir 120°, 135° dan 150°. Dari hasil studi yang dilakukan pada saluran prismatik diperoleh bahwa turbin hidrokinetik dengan sudut puntir menggunakan bilah 135° mampu menghasilkan grafik performa yang lebih baik, dengan nilai optimum 19% s/d 26% pada rentang <i>tip-speed ratio</i> sekitar 2,5.

2.2. Parameter Perhitungan Kinerja Turbin Hidrokinetik

Nilai *aspect ratio* (AR) menyatakan perbandingan antara tinggi turbin (H) dengan lebar turbin (D). Sedangkan *solidity ratio* (σ) merupakan perbandingan antara panjang *chord* bilah turbin (C_{blade}) dan jumlah bilah turbin (N) dengan lebar turbin (D) [21].

$$AR = \frac{H}{D} \quad (1)$$

$$\sigma = \frac{N \cdot C_{blade}}{\pi \cdot D} \quad (2)$$

Daya air P_{water} (*water power*) berasal dari daya energi kinetik tiap detik yang merupakan hasil perhitungan laju massa aliran dan kecepatan. Laju massa aliran air adalah hasil kali massa jenis air (ρ_{water}) dengan luas bidang tangkap (A_f) dan kecepatan aliran (V_{water}) [9].

$$\frac{dm}{dt} = \rho_{water} \cdot A_f \cdot V_{water} \quad (3)$$

$$P_{water} = \frac{1}{2} \cdot \frac{dm}{dt} \cdot V_{water}^2 = \frac{1}{2} \cdot \rho_{water} \cdot A_f \cdot V_{water}^3 \quad (4)$$

Daya turbin $P_{turbine}$ adalah daya poros turbin (*shaft power*) yang dihasilkan dari perhitungan kecepatan sudut (ω) dan torsi (τ) yang dihasilkan turbin [21].

$$P_{turbine} = \frac{2 \cdot \pi \cdot RPM \cdot \tau}{60} = \omega \cdot \tau \quad (5)$$

Kecepatan rotasional dari suatu turbin dinyatakan dengan nilai *tip-speed ratio* (λ). Nilai ini menyatakan kecepatan rotasi relatif dari ujung bilah turbin (*tip of blade*) terhadap kecepatan aliran (V_{water}) yang sebenarnya [21].

$$\lambda = \frac{\omega \cdot r}{V_{water}} \quad (6)$$

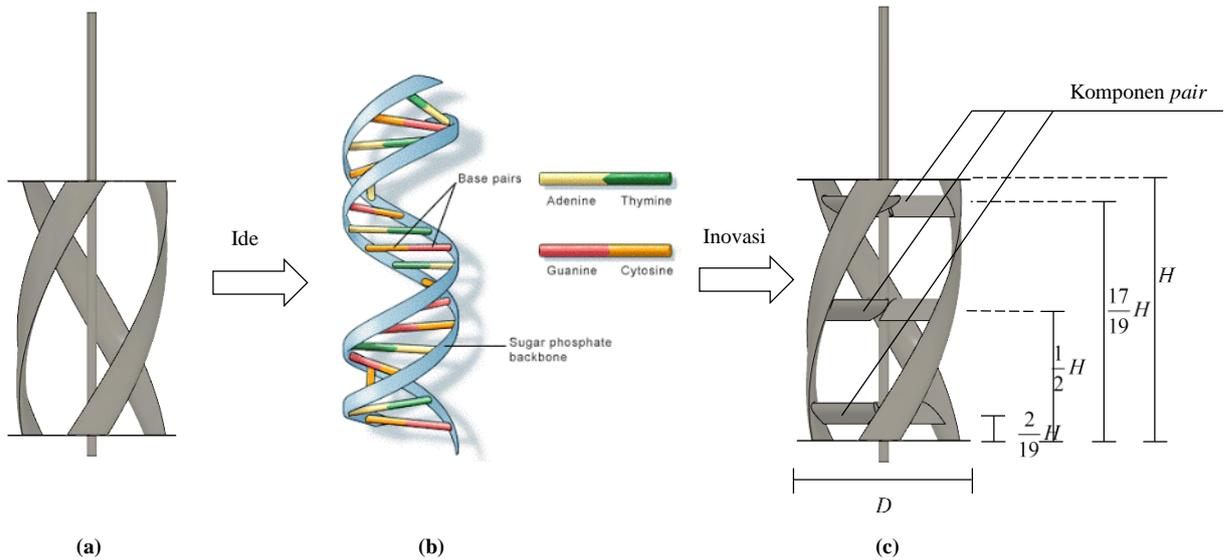
Nilai *coefficient of power* (C_p) merupakan rasio perbandingan antara daya turbin ($P_{turbine}$) dan daya air (P_{water}) [10].

$$C_p = \frac{P_{turbine}}{P_{water}} = \frac{\omega \cdot \tau}{\frac{1}{2} \cdot \rho_{water} \cdot A_f \cdot V_{water}^3} \quad (7)$$

3. Metode Pengembangan Desain & Pengujian Perbandingan Kinerja pada Turbin DNA

3.1. Inovasi Penambahan Luas Bidang Tangkap Menggunakan Komponen Pair pada Desain Turbin DNA

Kelebihan turbin gorlov adalah turbin ini dapat dipasang secara vertikal maupun horizontal menyesuaikan dari kontur saluran, sehingga dapat menerima aliran air dari berbagai arah. Turbin gorlov mengurangi perbedaan nilai *lift* dan torsi saat siklus rotasi turbin [5]. Hasil studi [23] menunjukkan bahwa performa yang dihasilkan dari turbin heliks mencapai efisiensi hingga 35%. Hasil studi [8] menyebutkan penentuan *solidity ratio* (σ) mempengaruhi performa nilai puncak C_p .

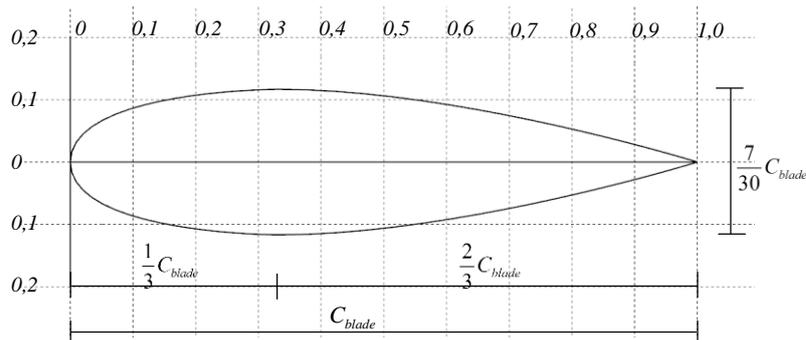


Gambar 1. (a) Desain turbin gorlov, (b) Struktur DNA (*deoxyribonucleic acid*) [31] & (c) Posisi penempatan komponen *pair* pada turbin DNA.

Turbin DNA merupakan turbin hidrokinetik dari hasil pengembangan desain turbin gorlov. Ide dan gagasan pembuatan desain turbin DNA berasal dari karakteristik bentuk bilah turbin heliks (*helical blade*) yang menyerupai struktur DNA (*deoxyribonucleic acid*) yang ditunjukkan pada Gambar 1. Sisi bilah turbin menuju poros ditambahkan sebuah komponen *pair* pada bagian atas, tengah dan bawah dengan ukuran seperti ditunjukkan pada Gambar 1c. Persamaan (4) menunjukkan bahwa potensi daya aliran yang dapat dikonversi turbin salah satunya dipengaruhi luas bidang tangkap (A_f). Penambahan komponen *pair* bertujuan meningkatkan luas bidang tangkap (A_f) turbin DNA terhadap energi kinetik yang dihasilkan dari aliran air (*water power*). Kedua turbin hidrokinetik yang diujikan memiliki parameter yang sama pada bagian dimensi maupun bentuk profil bilah turbin yang digunakan. Tabel 3 menunjukkan hasil parameter dan dimensi yang digunakan dalam desain turbin hidrokinetik pada studi ini.

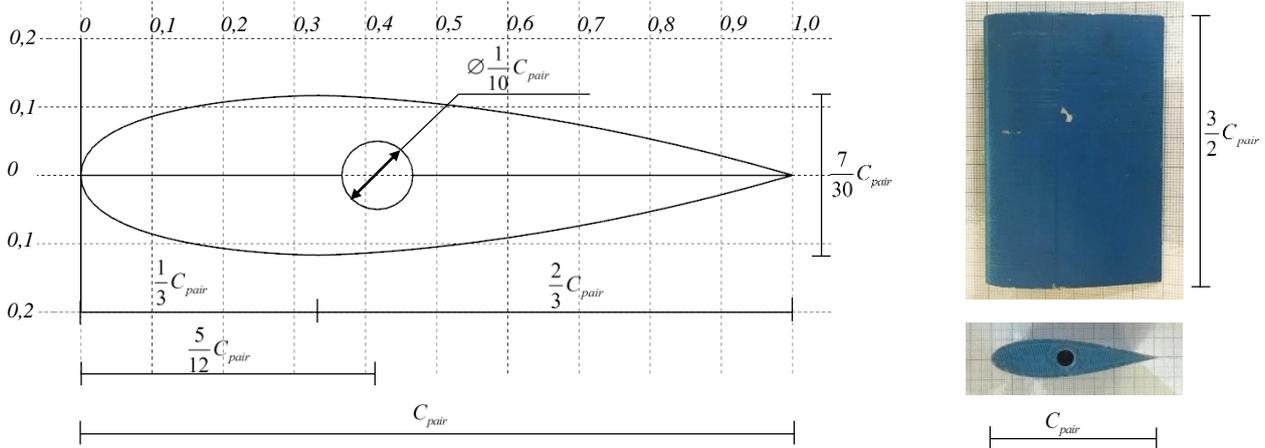
Tabel 3. Parameter desain turbin gorlov dan turbin DNA.

Parameter	Dimensi	
	Turbin Gorlov	Turbin DNA
H	0,38 m	0,38 m
D	0,25 m	0,25 m
A_f	0,095 m ²	0,118 m ²
AR	1,52	1,52
σ	0,23	0,23
φ	120°	120°
N	3	3



Gambar 2. Penampang geometri hidrofoil bilah turbin.

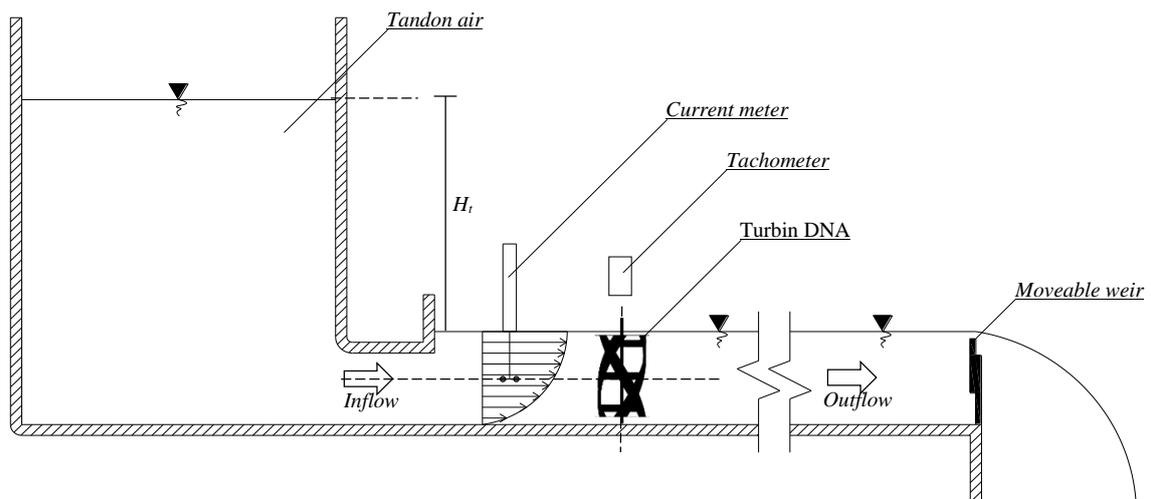
Bentuk bilah turbin (Gambar 2) yang digunakan dalam studi ini memiliki bentuk profil hidrofoil. Pemilihan geometri dari hidrofoil ini memiliki peranan penting dalam karakteristik pola aliran (hidrodinamika) dimana terjadi gaya *drag* dan gaya *lift* yang mempengaruhi kemampuan gerak rotasi turbin [20].



Gambar 3. Penampang geometri hidrofoil komponen *pair* pada turbin DNA.

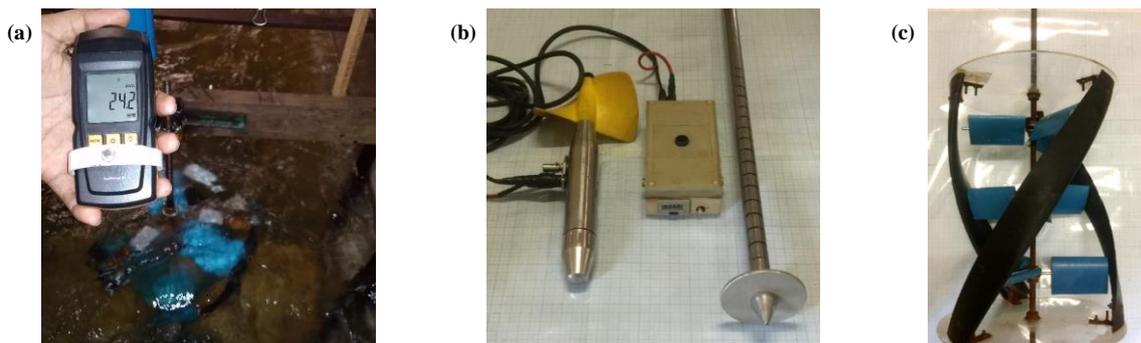
Bagian memanjang komponen *pair* (Gambar 3) dibuat lubang yang berfungsi untuk menghubungkan *pair* ke badan turbin DNA. Bagian ini juga berfungsi sebagai fondasi untuk menjaga kestabilan komponen *pair*.

3.2. Mekanisme Pengujian Perbandingan Kinerja Turbin Hidrokinetik pada Saluran Prismatik (Flume)



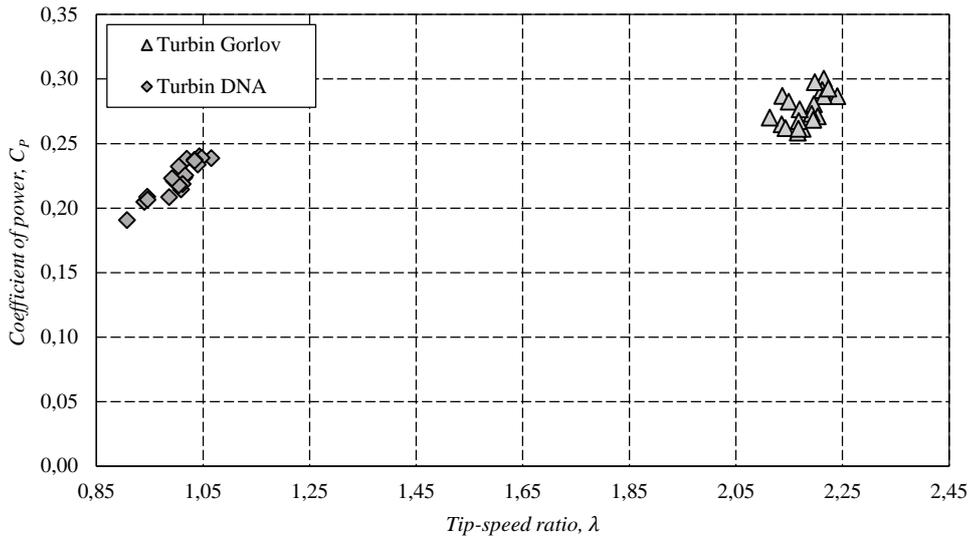
Gambar 4. Skema uji eksperimental turbin hidrokinetik pada saluran prismatik (*flume*).

Gambar 4 menunjukkan skema dalam pelaksanaan pengujian turbin hidrokinetik pada studi saat ini. Pengujian terhadap turbin DNA dilakukan di saluran prismatik (*flume*). Perbedaan beda tinggi (H_t) antara permukaan air di tandon dengan permukaan air di saluran menghasilkan variasi kecepatan aliran (V_{water}) akibat tekanan air yang dihasilkan. Nilai kecepatan aliran (V_{water}) yang mengalir menuju turbin DNA diperoleh dengan menggunakan alat *current meter* (Gambar 5b). Aliran air yang melalui badan turbin mengakibatkan turbin berotasi. Laju rotasi per menit (RPM) turbin DNA diperoleh menggunakan alat *tachometer* (Gambar 5a). *Moveable weir* berfungsi mempertahankan ketinggian air saluran yang digunakan pada saat pengujian. Tahapan yang sama digunakan pada pengujian turbin gorlov.



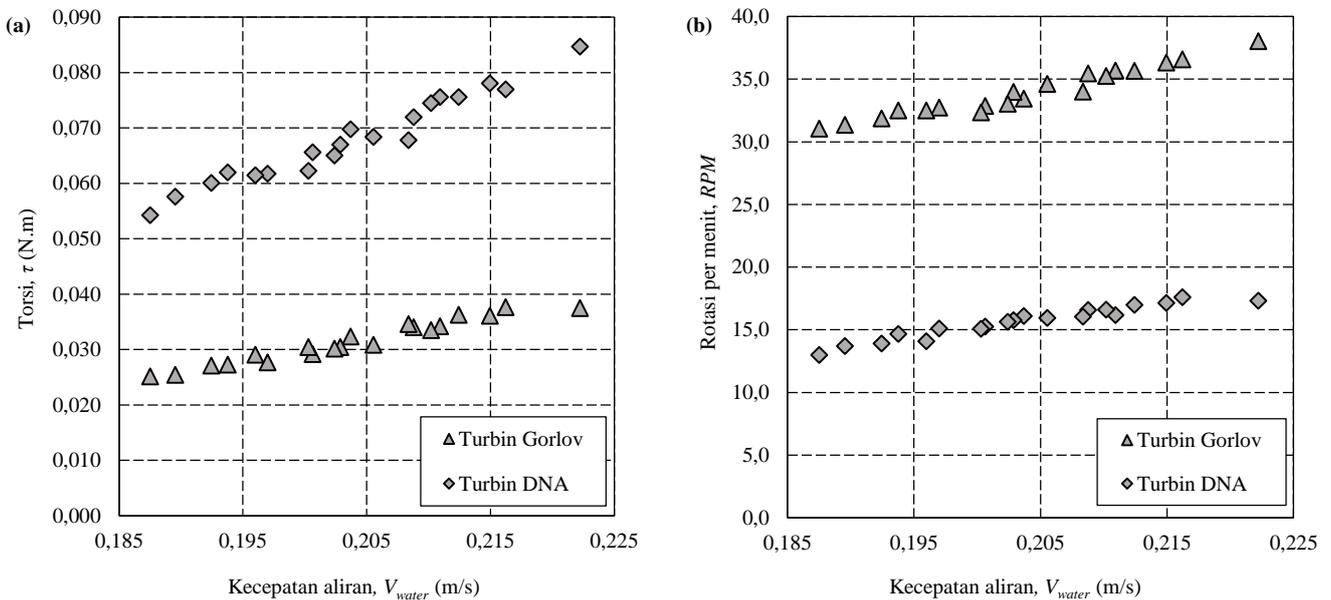
Gambar 5. (a) Pengambilan nilai RPM dengan *tachometer*, (b) Alat pengukur kecepatan aliran, dan (c) Hasil desain turbin DNA.

4. Hasil Perbandingan Kinerja Turbin DNA dan Pengaruh Penambahan Komponen Pair



Gambar 6. Hasil performa turbin yang ditunjukkan oleh hubungan antara *coefficient of power* (C_p) dengan *tip-speed ratio* (λ).

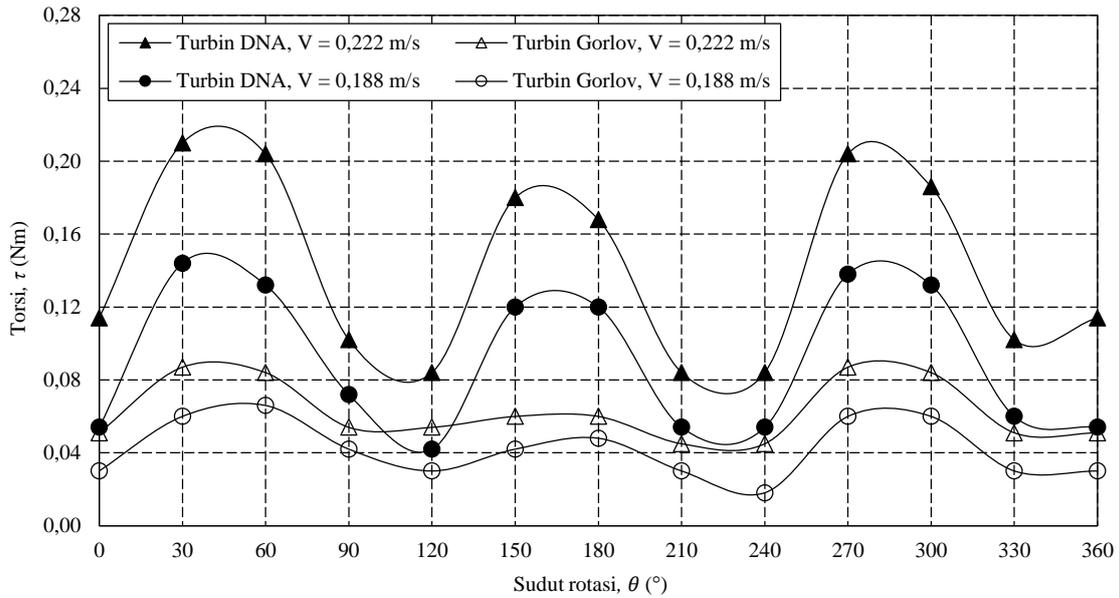
Gambar 6 menunjukkan hasil performa pengujian turbin gorlov dan turbin DNA pada variasi kecepatan (V_{water}) 0,188 – 0,222 m/s. Nilai *tip-speed ratio* diperoleh dengan menggunakan persamaan (6), sedangkan nilai *coefficient of power* diperoleh menggunakan persamaan (7). Turbin gorlov menghasilkan nilai *tip-speed ratio* (λ) 2,11 – 2,24, dan nilai *coefficient of power* (C_p) 0,26 – 0,30. Turbin DNA menghasilkan *tip-speed ratio* (λ) dengan range 0,91 – 1,07 dan nilai *coefficient of power* (C_p) 0,19 – 0,24. Berdasarkan Gambar 6, diketahui bahwa performa *coefficient of power* (C_p) turbin DNA lebih kecil dari turbin gorlov. Turbin gorlov memiliki kemampuan dalam mengonversi daya aliran lebih baik daripada turbin DNA. Nilai *tip-speed ratio* (λ) turbin DNA lebih kecil dari turbin gorlov. Hal ini menunjukkan turbin DNA memiliki kemampuan laju rotasi yang lebih rendah dibandingkan turbin gorlov. Grafik perbandingan performa (Gambar 6) menunjukkan bahwa pengaruh penambahan komponen *pair* menyebabkan penurunan nilai *tip-speed ratio* (λ) dan *coefficient of power* (C_p).



Gambar 7. Rasio penambahan kecepatan aliran terhadap: (a) Torsi (τ); (b) Rotasi per menit (RPM).

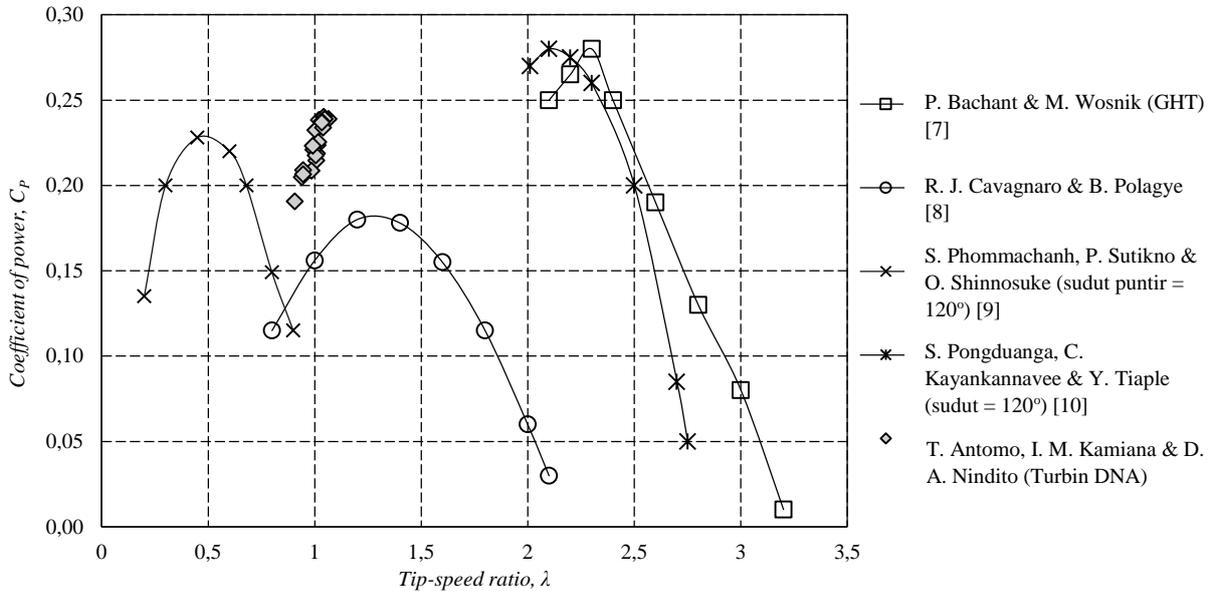
Gambar 7 menunjukkan nilai torsi (Gambar 7a) dan rotasi per menit (Gambar 7b) dari pengujian turbin hidrokinetik yang dilaksanakan pada variasi kecepatan aliran (V_{water}) 0,188 – 0,222 m/s. Nilai torsi (τ) yang dihasilkan dari turbin gorlov berdasarkan Gambar 7a adalah 0,025 – 0,038 Nm dan turbin DNA menghasilkan torsi (τ) 0,054 – 0,085 Nm. Berdasarkan perbandingan grafik yang ditunjukkan pada Gambar 7a, turbin DNA memiliki gradien peningkatan nilai torsi (τ) terhadap kecepatan aliran (V_{water}) yang lebih besar dibandingkan turbin gorlov.

Nilai rotasi per menit (RPM) yang dihasilkan (Gambar 7b) dari turbin gorlov berkisar 31,1 – 38,1 dan untuk turbin DNA yaitu 13,0 – 17,6. Berdasarkan grafik nilai rotasi per menit (RPM) pada Gambar 7b menunjukkan bahwa turbin gorlov dan turbin DNA menghasilkan kecenderungan gradien peningkatan nilai rotasi per menit (RPM) terhadap kecepatan aliran (V_{water}) yang proporsional. Peningkatan nilai rotasi per menit (RPM) meningkat seiring dengan penambahan kecepatan aliran (V_{water}). Berdasarkan grafik pada Gambar 7a dan Gambar 7b, turbin gorlov menghasilkan nilai rotasi per menit (RPM) lebih tinggi dari turbin DNA. Akan tetapi, pengaruh penambahan komponen *pair* menyebabkan nilai torsi (τ) turbin DNA lebih unggul daripada turbin gorlov



Gambar 8. Hubungan nilai torsi (τ) setiap sudut rotasi (θ) terhadap variasi kecepatan aliran (V_{water}).

Gambar 8 menunjukkan hubungan nilai torsi (τ) pada setiap sudut rotasi (θ) masing-masing turbin gorlov dan turbin DNA. Pengamatan dilakukan pada variasi kecepatan aliran (V_{water}) 0,188 m/s dan 0,222 m/s. Berdasarkan pola grafik masing-masing turbin gorlov dan turbin DNA penambahan kecepatan aliran menghasilkan peningkatan nilai torsi pada sudut rotasi $0^\circ < \theta < 90^\circ$, $120^\circ < \theta < 210^\circ$ dan $240^\circ < \theta < 330^\circ$. Pola grafik nilai torsi (τ) yang dihasilkan turbin gorlov cukup stabil pada setiap sudut rotasi (θ). Pola grafik yang dihasilkan turbin DNA menunjukkan kecenderungan peningkatan torsi terhadap rasio penambahan kecepatan aliran yang jauh lebih besar daripada turbin gorlov. Penambahan komponen *pair* pada turbin DNA memperbesar luas bidang tangkap (A_f) menyebabkan nilai torsi (τ) menjadi meningkat.



Gambar 9. Perbandingan performa C_p dan λ hasil turbin DNA dengan hasil studi sebelumnya [7-10].

Gambar 9 menunjukkan perbandingan grafik hubungan $C_p - \lambda$ antara hasil performa turbin DNA dengan hasil studi sebelumnya. Studi [7] melakukan pengamatan eksperimental pada GHT (*gorlov helical turbine*) terhadap pengaruh gelombang dan turbulen. Pengujian [7] dilaksanakan dengan variasi kecepatan 1,5 m/s. Hasil *blockage correction* pada GHT [28] (*gorlov helical turbine*) menghasilkan nilai maksimum $C_p = 0,28$ pada saat $\lambda = 2,1$. Berdasarkan Gambar 9, nilai performa *coefficient of power* (C_p) turbin DNA lebih kecil dari perolehan studi [7]. Nilai *tip-speed ratio* (λ) grafik turbin DNA juga lebih kecil. Hasil perbandingan performa turbin DNA dengan hasil studi [7] menunjukkan bahwa pada variasi kecepatan yang lebih rendah (0,188 – 0,222 m/s), turbin DNA menghasilkan laju rotasi turbin yang lebih lambat dan kemampuan konversi energi kinetik yang rendah daripada studi [7].

Studi [8] melakukan penilaian lapangan terhadap performa turbin hidrokinetik yang diuji pada kondisi laboratorium. Pengujian [8] dilaksanakan pada variasi kecepatan 1,0 – 2,1 m/s. Hasil studi [8] menghasilkan nilai puncak $C_p = 0,17$ pada saat $\lambda = 1,3$. Berdasarkan Gambar 9, nilai performa *coefficient of power* (C_p) turbin DNA lebih tinggi dari studi [8]. Sedangkan nilai *tip-speed ratio* (λ) grafik turbin DNA berada di *range* studi [8]. Hal ini menunjukkan bahwa dengan variasi kecepatan aliran yang lebih rendah (0,188 – 0,222 m/s), turbin DNA menghasilkan laju rotasi turbin yang sama dengan hasil studi [8], akan tetapi mampu menunjukkan performa *coefficient of power* (C_p) yang lebih baik. Perbedaan nilai performa yang dihasilkan kemungkinan disebabkan perbedaan nilai *solidity* (σ). Hasil studi [8] menjelaskan bahwa pengaruh nilai *solidity* rotor yang tinggi menghasilkan nilai puncak C_p yang rendah (*low peak C_p*). Dari Tabel 3 desain turbin DNA memiliki nilai *solidity* (σ) 0,23, sedangkan studi [8] memiliki $\sigma = 0,30$.

Studi [20] melakukan pengujian turbin heliks dengan sudut puntir 60° , 90° dan 120° , diuji pada saluran (*duct*) aliran air dengan kondisi *extremely low head* kurang dari 2 meter. Pengujian [20] dilakukan dengan variasi kecepatan 0,5 – 2 m/s menghasilkan nilai optimum $C_p = 0,23$. Turbin DNA dibandingkan studi [20] memiliki kesamaan pada parameter desain yang digunakan yaitu sama-sama menggunakan sudut puntir (φ) 120° . Berdasarkan Gambar 9, nilai performa *coefficient of power* (C_p) turbin DNA sedikit berada di atas studi [20]. Sedangkan pada nilai *tip-speed ratio* (λ) grafik turbin DNA lebih besar dari studi [20]. Perbandingan grafik ini menunjukkan bahwa turbin DNA dengan variasi kecepatan aliran yang lebih rendah (0,188 – 0,222 m/s), dapat menghasilkan laju rotasi dan performa *coefficient of power* (C_p) sedikit lebih baik daripada hasil studi [20].

Studi [10] melakukan investigasi eksperimental terhadap karakteristik turbin heliks akibat perbedaan sudut puntir 120° , 135° dan 150° . Pengujian [10] dilaksanakan pada variasi kecepatan 0,9 – 1,655 m/s. Hasil studi [10] menunjukkan pada sudut puntir 120° menghasilkan nilai *tip-speed ratio* (λ) antara 2,0 – 2,8 dan nilai *coefficient of power* (C_p) 0,05 – 0,27. Berdasarkan Tabel 3, desain turbin DNA memiliki parameter yang sama dengan studi [10] yaitu sudut puntir (φ) 120° . Perbandingan performa turbin DNA terhadap studi [10] bahwa nilai *tip-speed ratio* (λ) turbin DNA lebih kecil. Sedangkan pada perolehan *coefficient of power* (C_p), grafik performa turbin DNA lebih kecil dari studi [10]. Perbandingan terhadap studi [10] menunjukkan bahwa turbin DNA menghasilkan nilai performa *coefficient of power* (C_p) dan laju rotasi turbin lebih rendah.

5. Kesimpulan

Turbin gorlov menghasilkan nilai *tip-speed ratio* (λ) 2,11 – 2,24, dan nilai *coefficient of power* (C_p) 0,26 – 0,30. Turbin DNA menghasilkan *tip-speed ratio* (λ) dengan range 0,91 – 1,07 dan nilai *coefficient of power* (C_p) 0,19 – 0,24. Pengaruh penambahan luas bidang tangkap (A_f) dengan melakukan penambahan komponen *pair* menyebabkan penurunan performa *coefficient of power* (C_p) dan *tip-speed ratio* (λ) pada desain turbin DNA. Kemampuan rotasi per menit (RPM) turbin DNA juga mengalami penurunan, akan tetapi memiliki keunggulan dalam nilai torsi (τ) yang dihasilkan. Penambahan komponen *pair* mampu meningkatkan perolehan nilai torsi. Hal ini terlihat dari kecenderungan grafik nilai torsi (τ) pada rasio penambahan kecepatan aliran pada sudut rotasi $0^\circ < \theta < 90^\circ$, $120^\circ < \theta < 210^\circ$ dan $240^\circ < \theta < 330^\circ$. Pada studi berikutnya, turbin DNA dapat diujikan pada kondisi kecepatan aliran yang memiliki range lebih besar, sehingga diperoleh grafik performa turbin yang lebih lengkap meliputi sisi naik, puncak dan resesi. Pengujian konfigurasi sudut pengaruh *pair* dan dimensi yang berbeda menjadi hal menarik pula untuk studi selanjutnya.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Erinofiardi, Gokhale, P., Date, A., *et al.* (2017). A review on micro hydropower in Indonesia. *Energy Procedia*, vol. 110, pp. 316–321.
- [2] Elbatran, A. H., Abdel-Hamed, M. W., Yaakob, O. B., Ahmed, Y. M., & Ismail, M. A. (2015). Hydro power and turbine systems reviews. *J. Teknol.*, vol. 74, no. 5, pp. 83–90.
- [3] Kumar, A., & Saini, R. (2014). Development of hydrokinetic power generation system: A review. *Int. J. Eng. Sci. Adv. Technol.*, vol. 4, no. 6, pp. 464–477.
- [4] Joshi, H., Dwivedi, A., Anand, A., & Patil, P. P. (2014). Design and analysis of a cross flow hydrokinetic turbine using computational fluid dynamics. *J. Basic Appl. Eng. Res.*, vol. 1, no. 3, pp. 55–59.
- [5] Johnston, A. J. (2011). Analytical and numerical modeling of performance characteristics of cross-flow hydrokinetic turbines [Master's Theses and Capstones]. Durham: University of New Hampshire.
- [6] Portnov, G. G., & Palley, I. Z. (1998). Application of the theory of naturally curved and twisted bars to designing gorlov's helical turbine. *Mechanics of Composite Materials*, vol. 34, no. 4, pp. 343–354.
- [7] Bachant, P., & Wosnik, M. (2011). Experimental investigation of helical cross-flow axis hydrokinetic turbines, including effects of waves and turbulence. *Proceedings of the ASME-JSME-KSME 2011 Joint Fluids Engineering Conference*, AJK2011-07020, pp. 1895-1906.
- [8] Cavagnaro, R. J., & Polagye, B. (2016). Field performance assessment of a hydrokinetic turbine. *International Journal of Marine Energy*, vol. 14, pp. 125–142.
- [9] Phommachanh, S., Sutikno, P., & Shinnosuke, O. (2010). Duct water current turbine and extremely low head helical turbine. *AIP Conf. Proc.*, vol. 1225, pp. 213–224.
- [10] Pongduang, S., Kayankannavee, C., & Tiaple, Y. (2015). Experimental investigation of helical tidal turbine characteristics with different twists. *Energy Procedia*, vol. 79, pp. 409-414.
- [11] Putra, T. E. (2011). Studi potensi dan perencanaan bangunan utama PLTMH di permukiman tepi sungai (Studi kasus Desa Tumbang Habangoi Kecamatan Petak Malai). Palangka Raya: Universitas Palangka Raya.
- [12] Nindito, D. A. & Kamiana, I. M. (2010). Perencanaan model PLTA skala kecil berbasis teknologi lokal di daerah pemukiman tepi sungai. *Jurnal Proteksi*, pp. 1–7.
- [13] Muljadi, E., Wright, A., Gevorgian, V., Donegan, J., Marnagh, C., & McEntee, J. (2004). *Power Generation for River and Tidal Generators*. United States: National Renewable Energy Laboratory (NREL).
- [14] Khan, J. (2004). *River current turbine : modeling and system design* [project presentation].
- [15] McGlynn, J. (2014). *The Energy Innovation Center: River Hydrokinetic Energy Overview* [project presentation]. Inter American Development Bank.
- [16] Sornes, K. (2010). *Small-Scale Water Current Turbines for River Applications*. Maridalsveien: ZERO – Zero Emission Resoruce Organisation.
- [17] Yuce, M. I. & Muratoglu, A. (2015). Hydrokinetic energy conversion systems: a technology status review. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 43, pp. 72–82.
- [18] Tidewalker Engineering. (2010). *Marine and Hydrokinetic Technology Readiness Advancement Initiative: Optimization of Gorlov Helical Turbine Production*. Trescott(US): Tidewalker Engineering.
- [19] Talukdar, P. K., Kumar, S., Kulkarni, V., Das, A. K., & Saha, U. K. (2015). On site testing of a zero head vertical axis helical water turbine for power generation. *ASME 2015 Gas Turbine India Conference*. doi:10.1115/gtindia2015-1230.
- [20] Lopulalan, R. M., Sarwito, S., & Koenhardono, E. S. (2016). Desain blade turbin pembangkit listrik tenaga arus laut di Banyuwangi berbasis CFD. *J. Tek. ITS*, vol. 5, no. 2, pp. B424–B430.

- [21] Talukdar, P. K., Kulkarni, V., Dehingia, D., & Saha, U. K. (2017). Evaluation of a model helical bladed hydrokinetic turbine characteristics from in-Situ experiments. *Proceedings of the ASME 2017 11th International Conference on Energy Sustainability collocated with the ASME 2017 Power Conference Joint With ICOPE-17, the ASME 2017 15th International Conference on Fuel Cell Science, Engineering and Technology, and the ASME 2017 Nuclear Forum. ASME 2017 11th International Conference on Energy Sustainability. Charlotte, North Carolina, USA. June 26–30, 2017. V001T07A005. ASME. doi: 10.1115/ES2017-3490.*
- [22] Hatomi, F. (2012). Analisis CFD turbin pembangkit listrik tenaga arus laut pada kapasitas 1.2 kW. Jakarta: Universitas Indonesia.
- [23] Gorban', A. N., Gorlov, A. M., & Silantyev, V. M. (2001). Limits of the turbine efficiency for free fluid flow. *J. Energy Resour. Technol. Trans. ASME*, vol. 123, no. 4, pp. 311–317.
- [24] Rakesh, C., Joseph, A. T. V., Krishna, A. H. A., Adhvaith, M., & Nallode, C. (2016). Theoretical study and performance test of lucid spherical turbine. *Int. J. Innov. Res. Sci. Technol.*, vol. 3, no. 02, pp. 418–423.
- [25] Alvarez E. A., Rico-Secades, M., Corominas, E. L., Huerta-Medina, N., & Guitart, J. S. (2018). Design and control strategies for a modular hydrokinetic smart grid. *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 95, pp. 137–145.
- [26] Fathurrahman, M. T., Irfanto, D. A. & Bimantoro, B. (2018). HIVESS (*high energy generator vesser*): Kapal pembangkit listrik menggunakan gorlov helical turbine sebagai solusi pemenuhan kebutuhan listrik di kawasan Laut Sawu Nusa Tenggara Timur [LKTI Nasional]. Surabaya: ITS.
- [27] Niharman & Sipahutar, R. (2015). The effect of steering blade angles of helical turbine for power generation in irrigation DAM of Seluma Bengkulu. *J. Mech. Sci. Eng.*, vol. 2, no. 1, pp. 13–16.
- [28] Bachant, P., & Wosnik, M. (2015). Performance measurements of cylindrical and spherical-helical cross-flow marine hydrokinetic turbines, with estimates of exergy efficiency. *Renew. Energy*, vol. 74, pp. 318–325.
- [29] Gunai, P., Bhonge, A., & Joshi, K. (2016). Numerical analysis of cross flow hydrokinetic turbine by using computational fluid dynamics. *Int. J. Adv. Eng. Res. Sci.*, vol. 3, no. 11, pp. 105–109.
- [30] Gunai, P., Gumaste, S., Gathe, S., & Das, A. (2016). Design, analysis and improvisation of helical cross flow hydro kinetic turbine. *Int. J. Adv. Eng. Res. Sci.*, vol. 3, no. 9, pp. 36–41.
- [31] U. S. National Library of Medicine, "What is DNA?," [Online], Available: <https://medlineplus.gov/genetics/understanding/basics/dna/> [Accessed: Sep. 27, 2020].