

# Optimalisasi Desain Turbin Wells pada Sistem Osilasi Kolom Air Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut Sebagai Upaya Meningkatkan Potensi Supply Energi Terbarukan pada Masyarakat Pesisir

Luthfi Nabila Nur Afifah<sup>1)</sup>, Isna Tita Safira<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Teknik Kimia, Universitas Islam Indonesia, Jl.Kaliurang KM.14,5 Yogyakarta  
Corresponding author email: [nabilaluthfi18@gmail.com](mailto:nabilaluthfi18@gmail.com)

## Abstrak

Laut Indonesia menyimpan potensi energi terbarukan yang dapat dimanfaatkan sebagai pengganti energi fosil dalam memenuhi kebutuhan listrik. Pemanfaatan energi mekanik dari gelombang laut menjadi energi listrik dilakukan menggunakan teknologi *Oscillating Water Column* dan pengaplikasian turbin Wells. Penelitian dengan studi literatur ini, bertujuan untuk meningkatkan efisiensi turbin Wells dengan menentukan geometri, jumlah sudu, modifikasi panjang *chord* dan penggunaan pagar *stall* pada sudu. Pemilihan geometri dan jumlah sudu dilakukan menggunakan foil NACA 0010, 0015, 0020, dan 0025 dengan variasi jumlah sudu 6 dan 8. Tekanan dan kecepatan aliran udara diperoleh menggunakan *software flow 3d* sedangkan gaya angkat pada sudu turbin dianalisis dengan *software Ansys CFX 14*. Penambahan pagar pada sudu bertujuan untuk menunda *stall* dan memperluas rentang operasi. Dimensi pagar ditentukan menggunakan teknik optimasi *surrogate-based*. Modifikasi pagar sudu NACA 0015 dan panjang *chord* menggunakan *software CFD ANSYS CFX 16.1* untuk membandingkan efisiensi, torsi, dan koefisien input pada laju aliran berbeda antara turbin referensi dan modifikasi. Berdasarkan hasil modifikasi geometri dan jumlah sudu, foil NACA 0025 dengan 8 sudu menghasilkan nilai paling optimum untuk daya sebesar 3,64 kW dan efisiensi sebesar 64%. Pada penambahan pagar di sudu NACA 0015, peningkatan rentang operasi turbin berpagar dibanding turbin referensi sebesar 16,6%. Pada modifikasi panjang *chord*, perbandingan desain rekomendasi dan konvensional menunjukkan penurunan rata-rata entropi hasil sebesar 26,02% di seluruh rentang operasi sehingga mendukung keunggulan desain baru. Pemilihan profil, geometri, dan jumlah sudu turbin Wells yang sesuai serta pengaplikasian pagar *stall* dapat meningkatkan efisiensi turbin dalam menghasilkan daya optimal untuk dikonversi oleh generator menjadi energi listrik.

Kata Kunci : Efisiensi, Gelombang Laut, *Oscillating Water Column*, Turbin Wells

## Abstract

The Indonesian sea holds the potential for renewable energy that can be used as a substitute for fossil energy in meeting electricity needs. The utilization of mechanical energy from ocean waves into electrical energy is carried out using *Oscillating Water Column* technology and the application of the Wells turbine. Research with this literature study aims to increase the efficiency of the Wells turbine by determining the geometry, number of blades, modification of the length of the chord and the use of a stall fence on the blade. The selection of the geometry and number of blades was carried out using NACA foils 0010, 0015, 0020, and 0025 with variations in the number of blades 6 and 8. Pressure and air flow velocity were obtained using *software flow 3d* while the lift force on turbine blades were analyzed using *Ansys CFX 14* software. Stall fence on the blade aims to delay stall and expand the operating range. The dimensions of the fence were determined using a surrogate-based optimization technique. Modification of NACA 0015 blade fence and chord length using *CFD ANSYS CFX 16.1* software to compare efficiency, torque, and input coefficients at different flow rates between reference and modification turbines. Based on the results of the geometry modification and the number of blades, the NACA 0025 foil with 8 blades produces the optimum value for power of 3.64 kW and efficiency of 64%. With the addition of a fence at NACA 0015 blades, the increase in the operating range of the fenced turbine compared to the reference turbine was 16.6%. In the modified chord length, the comparison of the recommended and conventional designs shows a decrease in the mean yield entropy of 26.02% over the entire operating range thus supporting the advantages of the new design. Selection of profiles, geometries, and the number of blades of turbine Wells that are suitable and the application of stall fence can increase the efficiency of the turbine in producing optimal power to be converted by the generator into electrical energy.

Keywords: Efficiency, *Oscillating Water Column*, Turbine Wells, Wave energy

## I. Pendahuluan

Konsumsi energi di negara Indonesia mengalami peningkatan yang signifikan setiap tahunnya akibat pertumbuhan penduduk, ekonomi, dan perkembangan teknologi yang pesat. Seperti data dari Dewan Energi Nasional (DEN), bahwa kebutuhan energi meningkat dari 185 juta ton setara minyak

(million ton oil equivalent/mtoe) pada tahun 2018 menjadi 290 mtoe pada tahun 2020 dengan energi fosil sebagai penyumbang terbesar untuk sektor kelistrikan sebanyak 85% (Utami, 2020; Thomas, 2020). Kebutuhan akan energi listrik saat ini sangat mendominasi dalam berbagai sektor baik transportasi, rumah tangga, industri, perkantoran, dan

# Optimalisasi Desain Turbin Wells pada Sistem Osilasi Kolom Air Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut Sebagai Upaya Meningkatkan Potensi Supply Energi Terbarukan pada Masyarakat Pesisir

pendidikan. Ketersediaan energi fosil yang semakin menipis membuat pemerintah terus berupaya memanfaatkan potensi energi baru terbarukan (EBT) dan mengembangkan pembangkit listrik berbasis EBT untuk dapat memenuhi kebutuhan listrik nasional.

Indonesia merupakan negara yang memiliki potensi EBT melimpah, namun pemanfaatannya hingga saat ini masih belum banyak dilakukan. Salah satu jenis EBT yang memiliki potensi besar untuk dijadikan sebagai sumber energi listrik yaitu energi gelombang laut, mengingat Indonesia merupakan salah satu negara yang memiliki wilayah laut terbesar di dunia. Jika dibandingkan dengan sumber EBT lainnya, energi gelombang tersedia sampai 90 persen terhadap waktu, sementara energi surya dan angin hanya tersedia 20 – 30 persen terhadap waktu (Rahman dkk., 2016). Sumber energi gelombang laut di Indonesia apabila dikonversi menjadi besaran daya dapat menyumbang sekitar 24.000 MW (Ferial, 2016). Dengan memanfaatkan potensi ini, diharapkan dapat menjadi upaya untuk mewujudkan poin *Sustainable Development Goals* (SDGs) yang ke-7, yakni memastikan akses energi yang terjangkau, andal, berkelanjutan, dan modern bagi semua.

Pemanfaatan potensi energi gelombang laut dilakukan dengan menggunakan sistem *Oscillating Water Column* (OWC) yang membangkitkan listrik dari gerakan naik turunnya air laut yang masuk kedalam sebuah kolom osilasi berlubang. Naik turunnya air laut menghasilkan tekanan udara pada lubang bagian atas kolom yang akan menggerakkan turbin. Pengaplikasian turbin Wells pada sistem OWC digunakan sebagai *converter* yang mengubah energi kinetik gelombang laut menjadi energi mekanik (Shintawati, 2019). Energi mekanik yang dihasilkan dari sistem tersebut akan mengaktifkan generator secara langsung untuk menghasilkan energi listrik (Safitri dkk., 2016).

Turbin Wells adalah salah satu jenis turbin yang paling sederhana dan ekonomis karena tidak memerlukan perbaikan katup udara dan dapat mengekstraksi daya pada laju aliran udara yang rendah (Shehata dkk., 2017). Meskipun memiliki banyak keunggulan, turbin Wells memiliki karakteristik *self-starting* yang buruk dan rentang operasi rendah. Ditambah fenomena *stall* pada turbin, di mana turbin menerima gelombang tinggi yang menyebabkan kinerja turun drastis secara tiba-tiba. Banyak cara dapat dilakukan untuk memodifikasi turbin Wells, terutama memodifikasi

parameter desain yang tujuan utamanya adalah untuk meningkatkan efisiensi kerja turbin. Misalnya, modifikasi ketebalan dan lokasi sudu maksimum profil NACA standar (Shaaban, 2017), modifikasi bagian tengah dan ujung *sweep* sudu (Halder dkk., 2017), modifikasi pada sudu dua-dimensi dan kepadatan *tip* (Gratton, 2018), dan masih banyak lagi.

Tujuan dari penelitian ini adalah menentukan desain rancangan turbin yang optimal untuk mengefisienkan kerja dari turbin Wells. Optimalisasi desain dapat dilakukan dengan menentukan jenis profil, geometri, jumlah sudu dan penambahan pagar *stall* serta variasi panjang *chord* pada sudu sehingga dapat menghasilkan daya turbin yang optimum. Pagar pada sudu menghasilkan pusaran untuk menjaga aliran tetap menempel pada permukaan sudu, sehingga menghasilkan kinerja atau transfer energi yang lebih tinggi ke sudu turbin (Samad dkk., 2017). Variasi panjang *chord* berkaitan dengan entropi yang dihasilkan, di mana tingkat generasi entropi yang lebih rendah sama dengan sistem energi yang lebih efisien. Dengan meningkatnya daya turbin, maka jumlah energi listrik yang dihasilkan dari sistem pembangkit listrik juga akan meningkat. Hal ini dapat menjadi upaya untuk memaksimalkan pemanfaatan energi gelombang laut sebagai sumber listrik di wilayah pesisir.

## II. Metodologi

Bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah jurnal-jurnal penelitian yang dapat dijadikan sebagai referensi dalam pengoptimalan desain turbin Wells.

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah dengan melakukan studi literatur mengenai data kuantitatif pada penelitian terdahulu, guna mendapatkan data primer dan sekunder untuk dijadikan sebagai acuan dalam menentukan desain ukuran, geometri, pagar *stall*, dan jumlah sudu dari turbin Wells sehingga dapat mengoptimalkan kinerja turbin Wells.

## III. Hasil dan Pembahasan

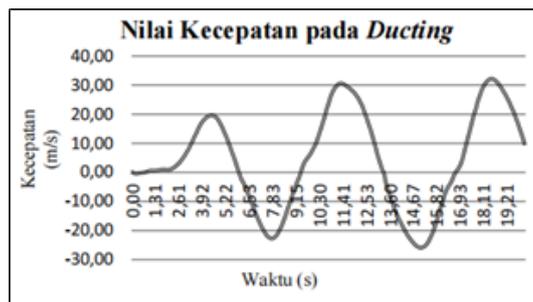
### 3.1 Analisis profil, geometri, dan jumlah sudu

Pada analisis profil, geometri, dan jumlah sudu yang dilakukan oleh Presetio, dkk (2015) digunakan profil NACA 0010, NACA 0015, NACA 0020 dan NACA 0025 dengan jumlah sudu sebanyak 6 dan 8.

a. Analisis nilai tekanan dan kecepatan aliran udara

Untuk mendapatkan nilai kecepatan aliran udara yang berasal dari gelombang air laut, dapat digunakan *software flow 3d*. Hasil perhitungan secara numerik yang dilakukan oleh Prasetio, dkk. menggunakan *software flow 3d* terlampir pada Gambar 1.

Berdasarkan Gambar 1, nilai kecepatan aliran udara maksimum sebesar 32,13 m/s<sup>2</sup> dan nilai kecepatan aliran udara minimum sebesar 0,05 m/s<sup>2</sup>. Nilai variasi kecepatan aliran udara yang didapatkan kemudian digunakan sebagai kecepatan aliran udara masuk (inlet) untuk menganalisis turbin



Gambar 1. Hasil Analisis Kecepatan Pada Ducting dengan Software Flow 3D (Prasetio, 2015)

b. Analisis nilai gaya angkat turbin

Tabel 1. Nilai Gaya pada Analisis dengan Metode Numerik (Prasetio, 2015)

No	Geometri Airfoil	Jumlah Sudu	Kecepatan Inlet (m/s)	Lift Force (N)
1	NACA 0025	6	0,05	2,E-06
			32,13	9,87
2	NACA 0020	6	0,05	1,E-06
			32,13	7,94
3	NACA 0015	6	0,05	2,E-07
			32,13	4,61
4	NACA 0010	6	0,05	9,E-07
			32,13	2,64
5	NACA 0025	8	0,05	3,E-06
			32,13	15,09
6	NACA 0020	8	0,05	2,E-06
			32,13	10,31
7	NACA 0015	8	0,05	1,E-06
			32,13	5,82
8	NACA 0010	8	0,05	7,E-07
			32,13	2,88

Penentuan nilai gaya angkat turbin pada penelitian Prasetio, dkk (2015) dilakukan secara numerik dengan menggunakan *software Ansys CFX 14* untuk mendapatkan nilai *lift force* pada sudu dengan kecepatan 32 m/s<sup>2</sup> dan 0,05 m/s<sup>2</sup>. Berdasarkan Tabel 1, nilai *lift force* terbesar dimiliki oleh NACA 0025 dengan jumlah sudu 8 sebesar 15,09 N. Sedangkan nilai *lift force* terkecil dimiliki oleh NACA 0010 dengan jumlah sudu 6 sebesar 9,E-07. Sehingga berdasarkan hasil penelitian tersebut, profil NACA 0025 dengan

jumlah sudu 8 direkomendasikan sebagai desain sudu optimum karena menghasilkan nilai *lift force* yang besar.

c. Perhitungan Daya Dan Efisiensi Turbin Wells Pada Variasi Geometri Dan Jumlah Sudu

Perhitungan daya dilakukan untuk menentukan besarnya daya poros yang dihasilkan turbin Wells dari aliran udara inlet. Besarnya daya turbin dapat diperoleh melalui persamaan berikut:

**Optimalisasi Desain Turbin Wells pada Sistem Osilasi Kolom Air Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut Sebagai Upaya Meningkatkan Potensi Supply Energi Terbarukan pada Masyarakat Pesisir**

$$P_t = T \times \omega \quad (1)$$

Di mana P merupakan daya turbin (Watt), T sebagai torsi turbin (Nm), dan  $\omega$  sebagai kecepatan sudut (Rad/s). Nilai kecepatan sudut diperoleh dari hasil perkalian antara kecepatan aliran udara dengan hasil pembagian dari nilai Tip Speed Ratio

(TSR) dengan jari-jari. Nilai TSR dan jari-jari yang digunakan pada penelitian ini adalah 0,95 dan 0,3 meter. Sedangkan torsi turbin didapatkan dari hasil perkalian antara gaya tangensial dengan jari-jari. Hasil perhitungan daya turbin Wells yang dilakukan pada penelitian Prasetio, dkk. (2015) dapat dilihat pada Tabel 2 berikut:

Tabel 2. Perhitungan Daya Wells Turbin (Prasetio, 2015)

No	Geometri Airfoil	Jumlah Sudu	Kecepatan Inlet (m/s)	Kecepatan sudut (rad/s)	Torsi (Nm)	Daya Turbin (kW)
1	NACA 0025	6	0,05	1,5	0,09	0
			32,13	961,44	57,83	1,79
2	NACA 0020	6	0,05	1,5	0,09	0
			32,13	961,44	57,83	1,44
3	NACA 0015	6	0,05	1,5	0,09	0
			32,13	961,44	57,83	0,84
4	NACA 0010	6	0,05	1,5	0,09	0
			32,13	961,44	57,83	0,48
5	NACA 0025	8	0,05	1,5	0,12	0
			32,13	961,44	77,11	3,64
6	NACA 0020	8	0,05	1,5	0,12	0
			32,13	961,44	77,11	2,49
7	NACA 0015	8	0,05	1,5	0,12	0
			32,13	961,44	77,11	1,41
8	NACA 0010	8	0,05	1,5	0,12	0
			32,13	961,44	77,11	0,70

Dari Tabel 2 dapat dilihat, nilai daya turbin terbesar dimiliki oleh NACA 0025 dengan jumlah sudu 8 sebesar 3,64 kW. Sedangkan nilai daya turbin terkecil dimiliki oleh NACA 0010 dengan jumlah sudu 6 sebesar 0,48 kW. Sehingga berdasarkan hasil penelitian tersebut, profil NACA 0025 dengan jumlah sudu 8 dapat menjadi referensi desain turbin yang optimum karena dapat menghasilkan nilai daya turbin yang besar. Di mana semakin besar nilai daya turbin, maka semakin besar pula energi listrik yang dapat dihasilkan.

d. Perhitungan Efisiensi Turbin

Efisiensi turbin didapatkan dari perbandingan daya keluar turbin dengan daya inlet angin. Efisiensi turbin dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut :

$$(\eta_t) = P_t / P_h \times 100\% \quad (2)$$

Di mana  $\eta_t$  merupakan efisiensi turbin (%),  $P_t$  merupakan daya turbin (kW), dan  $P_h$  sebagai daya angin (kW). Daya inlet angin pada percobaan ini didapatkan dari persamaan:

$$P_h = \frac{1}{2} \rho (A v) v^2 \quad (3)$$

Di mana  $\rho$  merupakan densitas udara ( $1,225 \text{ kg/m}^3$ ),  $A$  merupakan luas daerah yang tersapu turbin ( $0,28 \text{ m}^2$ ), dan  $v$  sebagai kecepatan aliran udara ( $\text{m/s}$ ). Dari persamaan tersebut didapatkan

nilai daya inlet angin pada kecepatan  $0,05 \text{ m/s}$  dan  $32,13 \text{ m/s}$  sebesar  $2, \text{E}-08 \text{ kW}$  dan  $5,69 \text{ kW}$ . Setelah didapatkan nilai daya inlet angin maka dapat dilakukan perhitungan efisiensi turbin. Hasil perhitungan efisiensi turbin pada penelitian Prasetio, dkk. dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Nilai Efisiensi Turbin Pada Setiap Variasi (Prasetio, 2015)

No	Geometri Airfoil	Jumlah Sudu	Daya Angin (kW)	Daya Turbin (kW)	Efisiensi (%)
1	NACA 0025	6	2,E-08	0	2,63
			5,69	1,79	31,43
2	NACA 0020	6	2,E-08	0	1,31
			5,69	1,44	25,28
3	NACA 0015	6	2,E-08	0	2,76
			5,69	0,84	14,68
4	NACA 0010	6	2,E-08	0	1,18
			5,69	0,48	8,41
5	NACA 0025	8	2,E-08	0	5,61
			5,69	3,64	64,07
6	NACA 0020	8	2,E-08	0	3,51
			5,69	2,49	43,77
7	NACA 0015	8	2,E-08	0	1,75
			5,69	1,41	24,71
8	NACA 0010	8	2,E-08	0	1,23
			5,69	0,70	12,38

Berdasarkan Tabel 3 tersebut nilai efisiensi paling besar dimiliki oleh NACA 0025 dengan jumlah sudu 8 sebesar  $64,07 \%$ , sedangkan nilai efisiensi paling kecil dimiliki oleh NACA 0010 dengan jumlah sudu 6 sebesar  $1,18 \%$ . Sehingga profil NACA 0025 dengan jumlah sudu 8 dapat dijadikan sebagai referensi desain turbin Wells karena memiliki nilai efisiensi yang tinggi. Dengan

meningkatnya nilai efisiensi sudu, maka kinerja turbin Wells akan semakin baik.

### 3.2 Penambahan Pagar Stall

Das & Samad (2019) melakukan penelitian ini menggunakan sudu foil NACA 0015 dengan ukuran terlampir pada Tabel 4.

**Optimalisasi Desain Turbin Wells pada Sistem Osilasi Kolom Air Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut Sebagai Upaya Meningkatkan Potensi Supply Energi Terbarukan pada Masyarakat Pesisir**

Tabel 4. Ukuran sudu referensi  
(Das & Samad, 2019)

Panjang <i>chord</i> (c)	0,125 m
Rasio <i>hub</i> ke <i>tip</i> (h)	0,67
Radius <i>hub</i> (r <sub>c</sub> )	0,2 m
Soliditas di rentang menengah (s)	0,64
Jarak <i>tip</i> (T)	1% dari c

Tahap pertama, Das & Samad (2019) menentukan dimensi optimal pagar agar rentang operasi dapat ditingkatkan sehingga menunda fenomena *stall* ke nilai koefisien aliran yang lebih tinggi. Rentang operasi didefinisikan sebagai rentang koefisien aliran di mana turbin dapat beroperasi tanpa *stall*. Titik ini umumnya ditemukan dari plot karakteristik turbin. Rentang operasi merupakan area di bawah kurva efisiensi (fungsi objektif). Fungsi objektif dapat dihitung menggunakan rumus:

$$A = \int_{0,075}^{0,275} \eta d\phi \quad (4)$$

Integrasi diselesaikan mengikuti aturan trapezoida.

Penentuan dimensi optimal pagar menggunakan *Surrogate model-kriging* (KRG) dari Sacks dkk. (1989) dengan persamaan:

$$y(x) = F(x) + Z(x) \quad (5)$$

Di mana  $y(x)$  adalah fungsi respons yang tidak diketahui yang diperkirakan menggunakan titik sampel.  $F(x)$  didefinisikan sebagai fungsi yang merepresentasikan tren fungsi yang tidak diketahui di atas ruang desain (polinomial orde rendah). Fungsi  $Z(x)$  menginterpolasi titik data sampel (hasil metode *Latin Hypercube Sampling* (LHS) (McKay dkk., 1979)) menggunakan korelasi Gaussian, yang memiliki rata-rata nol dan kovariansi bukan nol.

Berikut adalah persentase minimum dan maksimum ukuran pagar pada *chord* yang didapatkan oleh Das & Samad (2019).

Tabel 5. Rentang variabel desain  
(Das & Samad, 2019)

Variabel desain	Nilai minimum	Nilai maksimum
Tinggi (h)	1% tinggi <i>chord</i>	4% tinggi <i>chord</i>
Ketebalan (t)	1% tebal <i>chord</i>	4% tebal <i>chord</i>
Panjang (l)	10% panjang <i>chord</i>	100% panjang <i>chord</i>

Tabel 6. Desain Pagar Stall  
(Das & Samad, 2019)

Model <i>Surrogate</i>	Variabel Desain			A <sub>SURR</sub>	A <sub>RANS</sub>
	Tinggi (h)	Ketebalan (t)	Panjang (l)		
KRG	1,58	1,66	80	0,0952	0,0969

Tabel 6 dapat disimpulkan bahwa, tinggi dan ketebalan pagar sekitar 1,6% dari panjang *chord*. Sedangkan panjang pagar sekitar 80% dari panjang *chord*. Fungsi objektif (A<sub>SURR</sub>) yang didapat dari hasil Persamaan 4 mendekati hasil dari analisis CFD (A<sub>RANS</sub>), menandakan keakuratan proses optimisasi.

Untuk membandingkan kinerja sudu referensi dan modifikasi, Das & Samad (2019) melakukan penyelesaian persamaan *Reynolds-Averaged Navier-Stokes* (RANS) di aliran

*incompressible* yang stabil menggunakan software ANSYS CFX v 16.1. Parameter yang diperhatikan adalah efisiensi, torsi, dan koefisien aliran. Koefisien aliran merupakan fungsi dari kecepatan udara masuk dan kecepatan ujung rotor (u). Kecepatan ujung rotor tetap konstan untuk setiap koefisien aliran (karena kecepatan putar turbin tetap). Hasilnya (nilai efisiensi dan torsi) di plot pada grafik dengan koefisien aliran sebagai variabel bebas ( $0,075 \leq \phi \leq 0,275$ ).

Torsi non-dimensi

$$T^* = \frac{T}{\rho \omega_r^2 R^5} \quad (6)$$

Efisiensi

$$\eta = \frac{T \omega_r}{\Delta P_0 Q} \quad (7)$$

Koefisien aliran

$$\phi = \frac{u_a}{u_t} \quad (8)$$

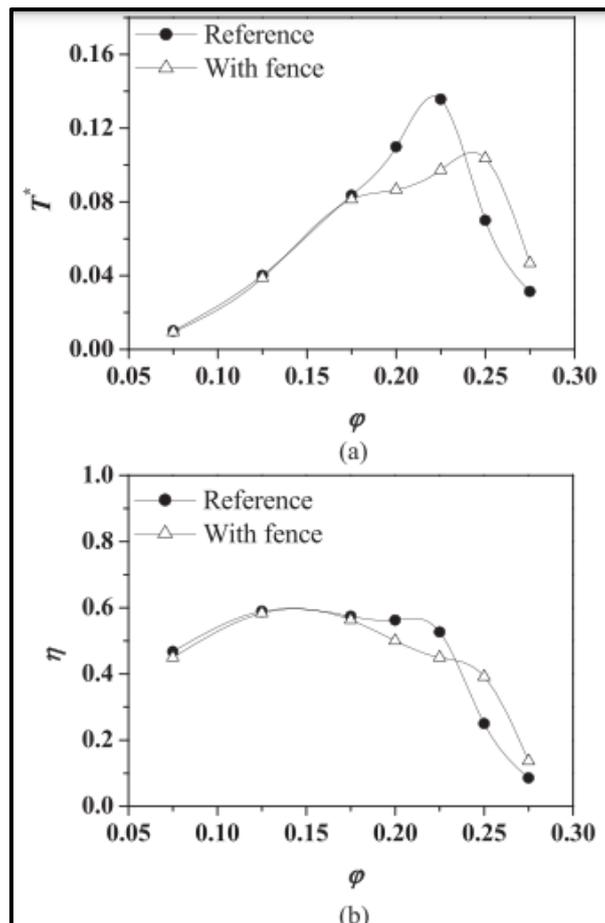
Dari Gambar 2 dapat dilihat aliran pada permukaan isap sudu di dua koefisien aliran yang berbeda. Untuk koefisien aliran dari  $\phi = 0,075$  sampai  $\phi = 0,175$ , aliran menempel sepenuhnya ke permukaan *suction*, tidak ada pusaran atau pemisahan aliran. Namun, pada koefisien aliran yang lebih tinggi,  $\phi = 0,250$ , terdapat pusaran besar di dekat tepi depan permukaan *suction* sudu referensi. Hal ini terjadi karena sudut datang yang besar pada koefisien aliran yang lebih tinggi, dan aliran mulai memisahkan diri dari ujung depan sudu rotor (kondisi pasca *stall*).

Maka dapat disimpulkan pada turbin referensi, torsi non-dimensi dan efisiensi turun

lebih awal pada  $\phi = 0,225$  karena adanya *stall*. Sedangkan pada turbin berpagar, titik terjadinya *stall* berada di  $\phi = 0,250$ . Begitu pula dengan efisiensi, turbin berpagar masih memiliki efisiensi lebih tinggi daripada turbin referensi walaupun setelah terjadi fenomena *stall*.

Pada konverter energi gelombang, nilai rasio daya puncak-ke-rata-rata rendah lebih diminati (Henriques dkk., 2016). Untuk aliran yang stabil dan kecepatan putar konstan, daya keluar dari turbin sebanding dengan torsi yang dihasilkan. Dilihat dari puncak torsi pada turbin modifikasi yang lebih rendah dibanding turbin referensi, dapat disimpulkan bahwa rasio daya puncak-ke-rata-rata di daerah bebas-*stall* ( $\phi = 0,225$  untuk turbin referensi,  $\phi = 0,250$  untuk turbin modifikasi) mengalami pengurangan sebesar 16,7% (Das & Samad, 2019).

Perbandingan turbin berpagar dengan turbin referensi menunjukkan peningkatan rentang operasi sebesar 16,6% (Das & Samad, 2019).



Gambar 2. Perbandingan (a) Torsi non-dimensi (b) Efisiensi untuk turbin berpagar dengan turbin referensi (Das & Samad, 2019)

**Optimalisasi Desain Turbin Wells pada Sistem Osilasi Kolom Air Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut Sebagai Upaya Meningkatkan Potensi Supply Energi Terbarukan pada Masyarakat Pesisir**

**3.3 Variasi panjang chord**

Soltanmohamadi & Lakzian (2015) melakukan penelitian ini menggunakan sudu NACA 0020, NACA 0022, NACA 0012 serta *software* untuk analisis numerik.

Analisis numerik untuk validasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD) menggunakan

pemecahan persamaan yang sama dengan modifikasi penambahan pagar *stall*. Sedangkan untuk model turbulen, Soltanmohamadi & Lakzian (2015) menggunakan model RNG k-ε karena kemampuannya yang baik dalam memprediksi aliran pusaran turbulen.

Tabel 7. Geometri Turbin Referensi Dan Modifikasi (Soltanmohamadi & Lakzian, 2015)

	Rotor chord konstan referensi	Rotor chord variasi modifikasi
Jumlah planes	1	1
Jumlah sudu (N)	6	6
Panjang chord dari hub ke tip (l)	90 mm	72,93 – 115,15 mm
Soliditas pada radius rata-rata ( $\sigma_R$ )	0,67	0,67
Aspek rasio (AR)	0,5	0,5
Rasio hub ke tip (v)	0,7	0,7
Diameter tip (Dt)	298 mm	298 mm
Tip clearance	0,5 mm	0,5 mm
Profil sudu dari hub ke tip	NACA 0020	NACA 0022 - NACA 0012
Tebal sudu (blade sweep)	0,35	0,35

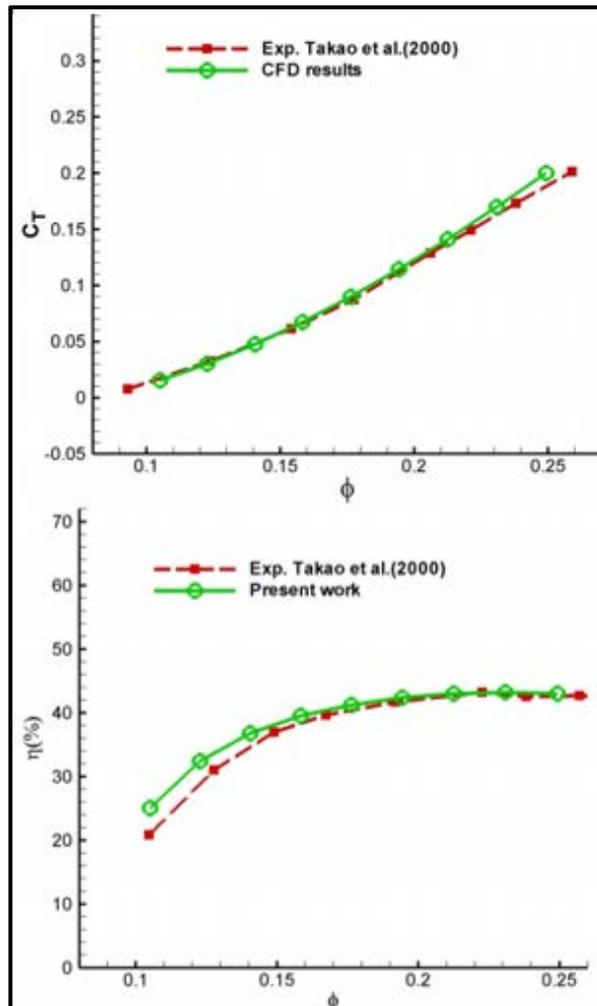
Modifikasi dilakukan oleh Soltanmohamadi & Lakzian (2015) dengan memvariasikan panjang hub ke tip dengan rasio *taper* ( $Ct/Ch$ ) = 1,58 tanpa sudut sapuan dan tanpa *skew* sudu. Tujuannya untuk mencapai peningkatan linear yang konstan pada jarak antara dua sudu berurutan dari hub ke tip sebesar 1,5, yang hasil akhirnya berupa distribusi kecepatan relatif dan sudut serang yang lebih baik pada ujung depan blade.

Dari Tabel 7, NACA 0022 digunakan karena karakteristiknya sebagai profil sudu yang lebih tebal di hub untuk mengatasi gaya sentrifugal dan karakteristik *self-starting* yang lebih baik (Setoguchi dkk., 2004). Sedangkan NACA 0012

dipilih karena karakteristiknya sebagai profil yang lebih tipis di tip untuk menentukan rasio ketebalan airfoil terbaik, yaitu 15% di area kecepatan aksial maksimum dekat hub (Saqr dkk., 2014).

Model numerik yang sudah diselesaikan dari persamaan RANS, kemudian divalidasi dengan melakukan perbandingan hasil eksperimen penelitian sebelumnya yaitu milik Takao dkk (2000).

Gambar 3 menunjukkan hasil bahwa eksperimen dengan hasil analisis numerik memiliki deviasi sangat kecil dan cenderung sama, sehingga model analisis yang digunakan cocok untuk penelitian ini.



Gambar 3. Perbandingan Parameter Hitung Dengan Hasil Eksperimen;  $C_t$  = Koefisien Torsi;  $H$  = Efisiensi. (Soltanmohamadi & Lakzian, 2015)

Pengaruh desain sudu yang telah dimodifikasi dengan entropi yang dihasilkan dapat diketahui dengan rumus:

$$S'''_{gen} = \frac{k}{T^2} (\nabla T)^2 + \frac{\mu}{T} \varphi > 0 \quad (9)$$

Di mana  $S'''_{gen}$  merupakan tingkat hasil entropi volumetrik ( $W/m^3K$ ),  $k$  merupakan konduktivitas termal, dan  $\varphi$  sebagai fungsi disipasi viskos yang dinyatakan dalam koordinat kartesius tiga dimensi.

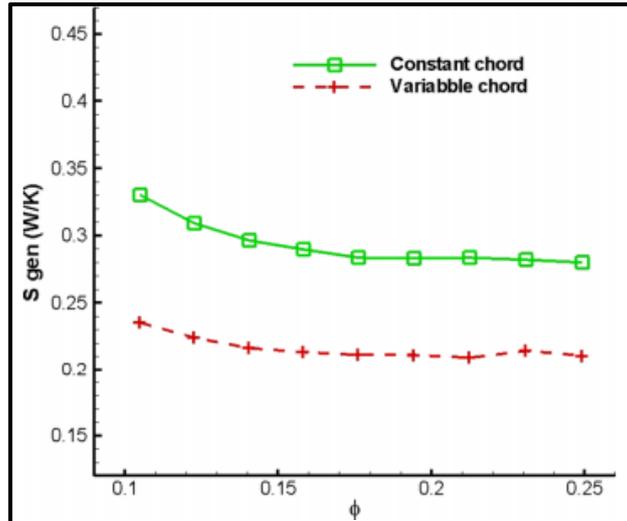
$$\varphi = 2 \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right] + \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \quad (10)$$

$u$ ,  $v$  dan  $w$  merupakan komponen kecepatan masing-masing di arah  $x$ ,  $y$  dan  $z$ . Dari persamaan (9), terdapat dua mekanisme dalam irreversibilitas termodinamika di aliran kental: disipasi termal dan disipasi viskos. Karena aliran di turbin Wells merupakan aliran isothermal, maka disipasi termal ditiadakan sehingga tingkat hasil entropi total atas volume dapat dihitung sebagai berikut (Soltanmohamadi & Lakzian, 2015):

$$S_{gen} = \iiint \left( \frac{\mu}{T} \varphi \right) dx dy dz \quad (11)$$

Perlu diingat bahwa perhitungan ini mengikuti hukum termodinamika kedua dengan asumsi pemanasan viskos diabaikan serta aliran stabil, *incompressible*, tiga dimensi, dan turbulen .

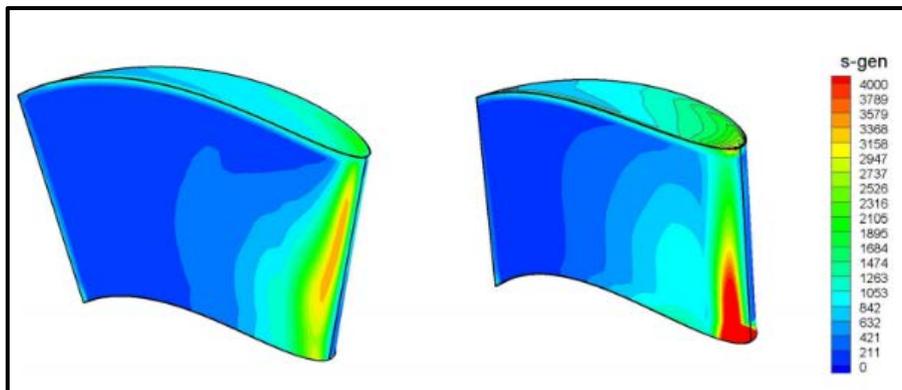
**Optimalisasi Desain Turbin Wells pada Sistem Osilasi Kolom Air Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut Sebagai Upaya Meningkatkan Potensi Supply Energi Terbarukan pada Masyarakat Pesisir**



Gambar 4. Perbandingan Hasil Entropi Total Di Seluruh Domein Komputasi (Satu Sudu) Untuk Nilai  $\Phi$  Yang Berbeda (Soltanmohamadi & Lakzian, 2015)

Dilihat dari Gambar 4, laju hasil entropi di tiap variasi panjang *chord* selalu lebih rendah dibanding panjang *chord* konstan. Perbedaan hasil entropi semakin rendah seiring meningkatnya (2015).

koefisien aliran. Penurunan bervariasi antara 23,82% hingga 28,66% dengan penurunan rata-rata sebesar 26,02% (Soltanmohamadi & Lakzian,



Gambar 5. Hasil Entropi Lokal In Sisi Suction Dan Tip Dari Sudu Chord Variasi (Kiri) Dan Chord Konstan (Kanan) Untuk  $\Phi = 0,23$  (Soltanmohamadi & Lakzian, 2015)

Dilihat dari Gambar 5, hasil entropi dan perubahan momentum tertinggi terjadi di zona yang memanjang dari tepi depan sudu ke titik ketebalan maksimum sudu di sisi *suction*. Di zona ini, hasil entropi *chord* variasi lebih rendah daripada *chord* konstan (Soltanmohamadi & Lakzian, 2015).

Selain energi yang lebih efisien, hasil entropi memberikan efek yang menguntungkan pada turbin Wells dengan mengurangi pemisahan aliran di bagian ujung sudu dalam kondisi *stall* yang kuat.

**IV. Kesimpulan**

Berdasarkan penelitian menggunakan data hasil analisis mengenai profil dan geometri sudu menggunakan NACA 0010, NACA 0015, NACA 0020, dan NACA 0025 dengan jumlah sudu pada masing-masing profil sebanyak 6 dan 8, dapat disimpulkan bahwa desain optimal yang dapat dijadikan referensi untuk perancangan sudu turbin Wells yaitu profil NACA 0025 dengan jumlah sudu 8 karena profil tersebut menghasilkan nilai daya

terbesar yaitu 3,64 kW dan efisiensi terbesar yaitu 64,07 % dibandingkan dengan profil sudu lainnya.

Pada modifikasi penambahan pagar pada sudu, nilai optimum pagar *stall* berupa tinggi pagar sebesar 1,6% dari panjang *chord* serta tebal pagar sebesar 80% panjang *chord*. Dengan ditambahnya pagar pada sudu, titik terjadinya *stall* bergeser dari  $\phi = 0,225$  menjadi  $\phi = 0,250$ . Rentang operasi juga meningkat sebesar 16,66% yang menandakan *stall* tertunda ke koefisien aliran lebih tinggi. Peran pagar yaitu dengan menjaga aliran menempel pada permukaan sudu untuk kinerja yang lebih baik ke sudu turbin.

Modifikasi panjang *chord* menghasilkan total entropi lebih rendah sebesar 26,02% dari desain sudu yang lama. Entropi yang rendah sama dengan sistem energi yang lebih efisien, serta dapat mengurangi pemisahan aliran di bagian ujung sudu dalam kondisi *stall* yang kuat.

Modifikasi parameter geometri turbin Wells merupakan cara utama untuk meningkatkan kinerja turbin karena parameter tersebut saling berkaitan satu sama lain. Selain pemilihan profil *airfoil*, jumlah sudu, modifikasi pada panjang *chord* (rasio *hub* ke *tip*) serta pagar *stall*, penelitian lebih lanjut untuk mengefisienkan daya dapat dilakukan dengan modifikasi soliditas, rasio aspek, dan jarak *tip*.

## V. Daftar Pustaka

- Bejan, A. (1987). The thermodynamic design of heat and mass transfer processes and devices. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 8(4), hal: 258-276.
- Das, T.K., Samad, Abdus. (2019). Influence of stall fences on the performance of Wells turbine. *Energy*, Vol. 194(1), hal: 1-15.
- Ferial. (2016). *Potensi Energi Laut Indonesia Menjanjikan*. (EBTKE) diakses tanggal 1 Maret 2021, dari URL website : <https://ebtke.esdm.go.id/post/2016/04/14/1188/potensi.energi.laut.indonesia.menjanjikan>
- Gratton, Tim., Ghisu, Tiziano., Parks, Geoff., Cambuli, Francesco., Puddu, Pierpaolo. (2018). Optimization of blade profiles for the Wells turbine. *Ocean Engineering*, Vol. 169(1), hal: 202-214.
- Halder, Paresh., Rhee, S.H., Samad, Abdus. (2017). Numerical optimization of Wells turbine for wave energy extraction. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, Vol. 9(1), hal: 11-24.
- Henriques, J.C.C., Gato, L.M.C., Lemons, J.M., Gomes, R.P.F., Falcao, A.F.O. (2016). Peak-power control of a grid-integrated oscillating water column wave energy converter. *Energy*, Vol. 109(1), hal:378-390.
- McKay, M.D., Beckman, R.J., Conover, W.J. (1979). A comparison of three methods for selecting values of input variables in the analysis of output from a computer code. *Technometrics*, Vol. 21(2), hal: 239-245.
- Prasetio, B., Chrismianto, D., Iqbal, M., (2015). *Jurnal Teknik Perkapalan : Analisa Pengaruh Geometri Dan Jumlah Sudu Terhadap Performa Wells Turbine*, Vol. 3(4), hal: 371-381.
- Rahman, S., Baeda, A.Y., Umar, H. (2016). *Jurnal JPE: Potensi Energi Gelombang sebagai Sumber Energi Alternatif di Pulau-Pulau Terluar Wilayah NKRI*, Vol. 20(2), hal: 33.
- Utami, S.S, (2020). *Menilik Kebutuhan vs Cadangan Energi Nasional*. (Medcom.id) diakses tanggal 1 Maret 2021, dari URL website: <https://www.medcom.id/ekonomi/bisnis/JKR/GwrQN-menilik-kebutuhan-vs-cadangan-energi-nasional#:~:text=Mengutip%20data%20Dewan%20Energi%20Nasional,persen%20dari%20kebutuhan%20konsumsi%20dunia>
- Sacks, J., Welch, W.J., Mitchell, T.J., Wynn, H.P. (1989). Design and Analysis of Computer Experiments. *Statistical Science*, Vol. 4(4), hal: 409-435.
- Safitri, L.E., Jumarang, M., Apriansyah. (2016). *Positron: Studi Potensi Energi Listrik Tenaga Gelombang Laut Sistem Oscillating Water Column (OWC) di Perairan Pesisir Kalimantan Barat*, Vol. 69(1), hal: 10.
- Samad, A., Halder, P., Thévenin, D. (2017). Improved design of a wells turbine for higher operating range. *Journal of Renewable Energy*, Vol. 106(1), hal: 122-134.
- Saqr, K.M., Shehata, A.S., Shehadeh, M., Xiao, Q., Day, A. (2014). Entropy generation due to viscous dissipation around a Wells turbine blade: a preliminary numerical study. *Energy Procedia*, Vol 50(1), hal: 808–816
- Shaaban, S. (2017). Wells turbine blade profile optimization for better wave energy capture: Wells turbine blade profile optimization.

**Optimalisasi Desain Turbin Wells pada Sistem Osilasi Kolom Air Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut Sebagai Upaya Meningkatkan Potensi Supply Energi Terbarukan pada Masyarakat Pesisir**

*International Journal of Energy Research*, Vol. 41(4), hal: 1-14.

Shehata, A.S., Xiao, Qing., Saqr, Khalid M., Day, Sandy. (2017). Wells turbine for wave energy conversion: A review. *International Journal of Energy Research*, Vol. 41(1), hal: 6-38.

Shintawati, D.W. (2019). *Studi Potensi Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut Sistem Oscillating Water Column (OWC) di Kelautan Indonesia*. Surakarta: Tesis Program Studi Teknik Elektro, Universitas Muhammadiyah Surakarta.

Soltanmohamadi, R., Lakzian, E. (2015). Improved design of Wells turbine for wave energy conversion using entropy generation. *Meccanica*, Vol. 51(8), hal: 1-10.

Takao, M., Setoguchi, T., Kim, T., Kaneko, K., Inoue, M., (2000). The performance of Wells turbine with 3D guide vanes. *Proceeding The Tenth International Offshore and Polar Engineering Conference*. International Society of Offshore and Polar Engineers

Setoguchi, T., Takao, M., Itakura, K., Mohammad, M., Kaneko, K., Thakker, A. (2004). Effect of rotor geometry on the performance of Wells turbine. *International Journal of Ambient Energy*, Vol. 25(3), hal: 137-150

Thomas, V.F. (2020). *Energi Fosil Sumbang 85% Listrik RI per Mei 2020, Terbanyak PLTU*. (Tirto.id) diakses tanggal 1 Maret 2021, dari URL website: <https://tirto.id/energi-fosil-sumbang-85-listrik-ri-per-mei-2020-terbanyak-pltu-fU1K>