



TESIS - ME142516

**KAJIAN EKSPERIMENTAL KONVERSI ENERGI
GELOMBANG DENGAN MENGGUNAKAN KOMBINASI
WELLS ROTOR DAN *TURBIN DARRIEUS***

DAIF RAHUNA

4114 204 004

DOSEN PEMBIMBING:

SUTOPO PURWONO FITRI, ST. M.Eng., Ph.D

DR. Ir. ERWANDI, M.Eng.

PROGRAM MAGISTER
TEKNIK SISTEM DAN PENGENDALIAN KELAUTAN
PROGRAM STUDI TEKNOLOGI KELAUTAN
FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2016

“Halaman ini sengaja dikosongkan”



THESIS - ME142516

**EXPERIMENTAL STUDY OF WAVE ENERGY
CONVERSION USING A COMBINATION OF WELLS
ROTOR AND *DARRIEUS TURBINE***

DAIF RAHUNA

4114 204 004

DOSEN PEMBIMBING:

SUTOPO PURWONO FITRI, ST. M.Eng., Ph.D

DR. Ir. ERWANDI, M.Eng.

PROGRAM MAGISTER
TEKNIK SISTEM DAN PENGENDALIAN KELAUTAN
PROGRAM STUDI TEKNOLOGI KELAUTAN
FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2016

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

LEMBAR PENGESAHAN TESIS

Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar
Magister Teknik (MT)
di
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh

DAIF RAHUNA
NRP. 4114 204 004

Hari / Tanggal Ujian : Jumat / 22 Juli 2016
Periode Wisuda : September 2016

Disetujui Oleh :

Dosen Pembimbing :

1. **Sutopo Purwono Fitri, ST, M.Eng, Ph.D**
NIP. 19751006 200212 1 003

2. **Dr. Ir. Erwandi, M.Eng**
NIP. 19660416 199103 1 003

Dosen Penguji:

1. **Ir. Agung Zuhdi M. F, M.Eng, Ph.D**
NIP. 19560519 198610 1 001

2. **Dr. I Made Ariana, ST, MT**
NIP. 19710610 199512 1 001

3. **Semin, ST, MT, Ph.D**
NIP. 19710110 199702 1 001



Direktur Program Pascasarjana,

Prof. Ir. Djauhar Manfaat, M.Sc, Ph.D
NIP. 19601202 198701 1 001

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

SURAT PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini menyatakan dengan sebenarnya bahwa :

Laporan tesis yang saya susun ini tidak terdapat tindakan plagiarisme, dan menyatakan dengan bahwa semua data, konsep, rancangan, bahan tulisan, dan materi yang ada di laporan merupakan hasil karya sendiri, tidak/tanpa ada yang mengambil peneliti dari pihak lain.

Nama : Daif Rahuna
NRP : 4114 204 004
Judul Tesis : Kajian Eksperimental Konversi Energi Gelombang dengan Menggunakan Kombinasi *Wells Rotor* dan *Turbin Darrieus*
Jurusan : Teknik Sistem Perkapalan FTK-ITS

Apabila di kemudian hari terbukti terdapat tindakan plagiarisme, maka saya akan bertanggung jawab sepenuhnya dan menerima sanksi yang diberikan oleh ITS sesuai dengan ketentuan yang berlaku.

Surabaya, Juli 2016

Daif Rahuna

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

Kajian Eksperimental Konversi Energi Gelombang dengan Menggunakan Kombinasi *Wells Rotor* dan *Turbin Darrieus*

Nama mahasiswa : Daif Rahuna
NRP : 4114 204 004
Pembimbing : 1. Sutopo Purwono Fitri, ST.M.Eng, Ph.D.
2. DR.Ir. Erwandi, M.Eng

ABSTRAK

Pada daerah pantai (*nearshore*) gelombang datang menuju pantai mempunyai massa air dan momentum, searah dengan penjaralannya. Yang mana akan menyebabkan terjadinya arus sekitar pantai, yaitu arus sepanjang pantai, arus seret dan arus balik. Hal itu bisa dimanfaatkan sebagai sumber energi baru untuk menggerakkan turbin, dimana turbin tersebut harus mampu menyerap kedua energi (energi gelombang dan arus). Jika kedua jenis turbin ini digabungkan dalam satu poros, bagaimana performa turbin kombinasi tersebut dalam mengkonversi energi gelombang.

Studi eksperimental ini meliputi perencanaan desain model, pembuatan model dan pengujian model yang dilakukan di kolam uji dengan gelombang buatan. Adapun spesifikasi model wells rotor adalah bentuk aerofoil NACA 0021, diameter rotor 910 mm, panjang chord 83 mm, jumlah bilah turbin 6 buah, dengan solidity 0,62. Sedangkan spesifikasi model turbin darrieus dengan bentuk aerofoil NACA 0021, diameter rotor 830 mm, panjang chord 83 mm dan jumlah bilah turbin 3 buah. Pengujian dilakukan di kolam uji dengan gelombang buatan yang divariasikan tinggi gelombang 8 cm, 10 cm, 12 cm, 14 cm, 16 cm dan 18 cm dengan periode gelombang bervariasi juga yaitu, 1 s, 1,5 s dan 2 s. Dengan variasi tersebut diharapkan dapat diketahui periode gelombang yang optimum untuk mendapatkan putaran turbin yang maksimal.

Kesimpulan dari uji eksperimental ini bahwa periode gelombang optimum yang sesuai dengan spesifikasi turbin kombinasi ini adalah sebesar 1,5 s. Wells rotor mempunyai putaran yang lebih tinggi daripada turbin kombinasi, hal itu dikarenakan blade turbin darrieus menjadi sebuah resistan, sedangkan pada turbin darrieus tidak dapat menerima energi gelombang. Turbin kombinasi antara wells dan darrieus mempunyai *self starting* yang rendah dimana mampu berputar pada kecepatan arus 0,2 m/s dan tinggi gelombang 0,08 m, efisiensi maksimal yang diperoleh dari turbin kombinasi wells dan darrieus adalah sebesar 21,6% dan pada wells rotor sebesar 20,8% dengan ketinggian gelombang 0,123 m dan *tip speed ratio* (TSR) pada turbin kombinasi wells rotor dan darrieus sebesar 1,84 dan pada wells rotor sebesar 2,26.

Kata kunci: *wells rotor*, *energi gelombang*, *turbin kombinasi*, *efisiensi*

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

Kajian Eksperimental Konversi Energi Gelombang dengan Menggunakan Kombinasi *Wells Rotor* dan *Turbin Darrieus*

Nama mahasiswa : Daif Rahuna
NRP : 4114 204 004
Pembimbing : 1. Sutopo Purwono Fitri, ST.M.Eng, Ph.D.
2. DR.Ir. Erwandi, M.Eng

ABSTRACT

In nearshore zone the waves coming towards the shore has a water mass and momentum, the direction of the wave. It will lead to flow around the beach, among other longshore current, rip current and backflow. It can be used as a new energy source to drive the turbines, which the turbines should be able to convert the both energy sources. If both types are combined in a single turbine shaft, turbine how the performance of such combinations in converting wave energy.

In experimental studies are design modeling, and model testing performed in the test pool with artificial waves. The specifications of the model rotor wells are foil type NACA 0021 aerofoil shape, a rotor diameter of 910 mm, 180 mm chord length, the number of turbine blades 6 pieces, with the solidity of 0,62. Darrieus turbine with foil type NACA 0021 aerofoil shape, a rotor diameter of 1004 mm, 83 mm chord length and the number of turbine blades 3 pieces. Tests conducted in a tank with wave generate, wave height 8 cm, 10 cm, 12 cm, 14 cm, 16 cm and 18 cm , the wave period 1 s, 1.5 s and 2 s. These variations is expected to be known to the optimum wave periods to obtain maximum turbine rotation.

The conclusion of this experimental test that the optimum wave period in accordance with the specifications of this combination turbine is of 1.5 s. Wells rotor has a higher rotation than the turbine combination, it is because blade Darrieus Trubin be a resistance, where the Darrieus turbine can not receive the wave energy. Combination Turbine have a low self starting which is capable of runing at the current speed of 0.2 m / s and the wave height of 0.08 m, the maximum efficiency combination turbine was 21.6% and in wells rotor of 20.8% with a wave height of 0.123 m and a tip speed ratio (TSR) of the combination turbine 1.84 and the wells rotor 2.26.

Kata kunci: *wells rotor, wave energy, combination turbine, efficiency*

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR ISI

LEMBAR JUDUL	iii
TITLE SHEET	v
LEMBAR PENGESAHAN TESIS	Error! Bookmark not defined.
SURAT PERNYATAAN.....	7
ABSTRAK	9
ABSTRACK	11
KATA PENGANTAR	Error! Bookmark not defined.
DAFTAR ISI.....	13
DAFTAR GAMBAR	17
DAFTAR TABEL.....	21
BAB I PENDAHULUAN.....	Error! Bookmark not defined.
1.1 Latar Belakang.....	Error! Bookmark not defined.
1.2 Perumusan Masalah.....	Error! Bookmark not defined.
1.3 Maksud dan Tujuan	Error! Bookmark not defined.
1.4 Manfaat Penelitian.....	Error! Bookmark not defined.
1.5 Batasan Masalah.....	Error! Bookmark not defined.
BAB II KAJIAN PUSTAKA	Error! Bookmark not defined.
2.1 Konversi Gelombang Laut	Error! Bookmark not defined.
2.2 Energi Gelombang Laut	Error! Bookmark not defined.
2.3 Teori Gelombang Laut Linier.....	Error! Bookmark not defined.
2.3.1 Kecepatan Potensial	Error! Bookmark not defined.
2.3.2 Kecepatan Partikel Air	Error! Bookmark not defined.
2.3.3 Hubungan Dispersi.....	Error! Bookmark not defined.
2.3.4 Tekanan Gelombang	Error! Bookmark not defined.
2.3.5 Energi Gelombang	Error! Bookmark not defined.
2.3.6 Faktor Shoaling	Error! Bookmark not defined.
2.4 Tip Speed Ratio (TSR).....	Error! Bookmark not defined.
2.5 Blade wells rotor.....	Error! Bookmark not defined.
2.6 Review Jurnal	Error! Bookmark not defined.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	Error! Bookmark not defined.
3.1 Diagram alir proses penelitian.....	Error! Bookmark not defined.
3.2 Studi Literatur.....	Error! Bookmark not defined.
3.3 Pengumpulan Data Sekunder	Error! Bookmark not defined.
3.3.1 Pengumpulan data dari kolam uji.....	Error! Bookmark not defined.
3.3.2 Pengumpulan data spesifikasi turbin.....	Error! Bookmark not defined.
3.4 Perencanaan Desain.....	Error! Bookmark not defined.
3.5 Pembuatan Spesimen Uji.....	Error! Bookmark not defined.
3.5.1 Wells rotor blade	Error! Bookmark not defined.
3.5.2 Darrieus turbine blade	Error! Bookmark not defined.
3.5.3 Hub	Error! Bookmark not defined.
3.5.4 poros turbin	Error! Bookmark not defined.
3.5.5 Frame turbin	Error! Bookmark not defined.
3.5.6 Bantalan.....	Error! Bookmark not defined.
3.5.7 Lengan Radial arm	Error! Bookmark not defined.
3.5.8 Penumpu darrieus turbine blade.....	Error! Bookmark not defined.
3.5.9 Assembly.....	Error! Bookmark not defined.
3.6 Persiapan pengujian.....	Error! Bookmark not defined.
3.6.1 Penimbangan tiap-tiap komponen....	Error! Bookmark not defined.
3.6.2 Kalibrasi torquemeter.....	Error! Bookmark not defined.
3.6.3 Persiapan alat-alat yang digunakan dalam pengujian	Error! Bookmark not defined.
3.6.4 Persiapan kolam uji.....	Error! Bookmark not defined.
3.7 Pengujian di Kolam Uji dengan Gelombang.....	Error! Bookmark not defined.
3.8 Validasi Uji Turbin dengan Arus	Error! Bookmark not defined.
3.9 Validasi Uji Generator.....	Error! Bookmark not defined.
BAB IV HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN	Error! Bookmark not defined.
4.1 Data Hasil Penelitian	Error! Bookmark not defined.
4.1.1 Data gelombang pengujian.....	Error! Bookmark not defined.

4.1.2	Data putaran turbin yang dihasilkan dengan variasi periode ...	Error! Bookmark not defined.
4.1.3	Data putaran turbin dan torsi pada pengujian gelombang.....	Error! Bookmark not defined.
4.1.4	Data hasil validasi uji turbin dengan arus	Error! Bookmark not defined.
4.1.5	Data validasi generator.....	Error! Bookmark not defined.
4.2	Pembahasan Data Hasil Penelitian	Error! Bookmark not defined.
4.2.1	Pembahasan parameter-parameter pada gelombang pengujian	Error! Bookmark not defined.
4.2.2	Pembahasan penentuan periode yang optimum	Error! Bookmark not defined.
4.2.3	Menentukan kecepatan horisontal dan vertikal dari partikel air	Error! Bookmark not defined.
4.2.4	Putaran dan torsi turbin yang dihasilkan	Error! Bookmark not defined.
4.2.5	Menentukan potensi daya turbin sebenarnya .	Error! Bookmark not defined.
4.2.6	Menentukan kapasitas daya turbin dan daya turbin akibat torsi	Error! Bookmark not defined.
4.2.7	Menentukan Tip speed Ratio (TSR)	Error! Bookmark not defined.
4.2.8	Hubungan efisiensi dengan kecepatan dan daya turbin	Error! Bookmark not defined.
4.2.9	Hubungan tip speed ratio (TSR) dengan efisiensi.	Error! Bookmark not defined.
4.2.10	Data dari peneliti lain	Error! Bookmark not defined.
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....		23
5.1	Kesimpulan.....	23
5.2	Saran-saran	23
DAFTAR PUSTAKA		
LAMPIRAN		
BIOGRAFI		

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR GAMBAR

- Gambar 1.1 Penjalaran gelombang dan arus di pantai **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 1.2 Konsep design Darrieus turbine vertical axis **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 1.3 Wells rotor pada system OWC **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 2.1 Gelombang pada laut dalam dan laut dangkal **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 2.2 Gelombang sinusoidal **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 2.3 Geometri blade dan diagram kecepatan **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 2.4 Permukaan panel distribusi..... **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 2.5 Tingkat konversi terhadap koefisien aliran **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 2.6 Model finite elemen pada garrieus dan wells **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 2.7 Validasi pada model komputasi pengukuran data **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 3.1 Diagram alir penelitian **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 3.2 Bentuk kontur aerofoil naca 0021 **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 3.3 *Wells rotor blade* type aerofoil naca 0021 **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 3.4 *Darrieus turbine blade* type aerofoil naca 0021 **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 3.5 *Hub* turbin..... **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 3.6 Poros turbin **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 3.7 Frame dan Poros turbin **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 3.8 Bearing **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 3.9 *Radial arm* **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 3.10 Penumpu blade **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 3.11 *Darrieus turbine dan wells rotor*.. **Error! Bookmark not defined.**

- Gambar 3.12 Proses penimbangan masing-masing komponen turbin **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 3.13 *Torquemeter* dan proese kalibrasi **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 3.14 *Wave High pectrumS sensor*.....**Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 3.15 *Tachometer***Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 3.16 *Currentmeter***Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 3.17 Persiapan pengujian pemasangan alat ukur**Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 3.18 pengujian wells rotor**Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 3.19 Pengujian konfigurasi 1 wells rotor dan arah putaran **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 3.20 Posisi water level saat pengujian konfigurasi 1**Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 3.21 Pengujian turbin kombinasi wells dan darrieus**Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 3.22 arah putaran kombinasi wells rotor dan turbin darrieus **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 3.23 konfigurasi 2 saat pengujian kombinasi wells rotor dan turbin darrieus.....**Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 3.24 konfigurasi 3 saat pengujian turbin darrieus**Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 3.25 konfigurasi 1 saat pengujian wells rotor dengan arus **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 3.26 konfigurasi 2 saat pengujian wells rotor dan turbin darrieus dengan arus.....**Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 3.27 Validasi generator.....**Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 4.1 Grafik hasil validasi antara putaran dan daya**Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 4.2 Grafik hasil validasi antara putaran dan tegangan..... **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 4.3 Grafik sinusoidal gelombang pengujian**Error! Bookmark not defined.**

- Gambar 4.4 Grafik sinusoidal gelombang pengujian **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 4.5 Grafik hubungan antara perbedaan periode gelombang dan putaran turbin **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 4.6 Grafik hubungan antara kecepatan horisontal air dan perbedaan kedalaman **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 4.7 Grafik hubungan antara kecepatan vertikal air dan perbedaan kedalaman **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 4.8 Grafik hubungan antara kecepatan partikel air dan tinggi gelombang..... **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 4.9 Grafik putaran yang dihasilkan turbin dengan tinggi gelombang **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 4.10 Grafik torsi turbin yang dihasilkan turbin dengan tinggi gelombang..... **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 4.11 Grafik putaran turbin yang dihasilkan turbin dengan kecepatan arus **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 4.12 Grafik hubungan efisiensi daya turbin dan kecepatan putaran turbin **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 4.13 Grafik hubungan efisiensi daya turbin dan kecepatan partikel air **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 4.14 Grafik hubungan efisiensi daya turbin dan potensi daya turbin **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 4.15 Grafik hubungan (TSR) dengan kecepatan partikel air..... **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 4.16 Grafik hubungan tip speed ratio (TSR) dengan putaran turbin **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 4.17 Grafik hubungan efisiensi daya turbin dengan tip speed ratio (TSR)..... **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 4.18 Wells rotor double stage dan pengujiannya **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 4.19 Wells rotor double stage dan pengujiannya **Error! Bookmark not defined.**

- Gambar 4.20 Prototype turbin arus laut type darrieus **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 4.21 Grafik hubungan TSR dan putaran turbin dengan kecepatan arus
..... **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 4.22 Turbin kombinasi wells dan darrieus **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 4.23 Grafik hubungan efisiensi daya turbin dengan tip speed ratio (TSR)..... **Error! Bookmark not defined.**

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR TABEL

- Tabel 2.1 Geometric utama pada airofoil NACA 0018**Error! Bookmark not defined.**
- Tabel 4.1 Hasil validasi gelombang pengujian **Error! Bookmark not defined.**
- Tabel 4.2 Putaran yang dihasilkan turbin dengan variasi tinggi dan periode gelombang.....**Error! Bookmark not defined.**
- Tabel 4.3 Putaran dan torsi yang dihasilkan dengan perbedaan tinggi gelombang.....**Error! Bookmark not defined.**
- Tabel 4.4 Putaran yang dihasilkan dengan kecepatan arus**Error! Bookmark not defined.**
- Tabel 4.5 Tegangan, daya dan kuat arus aktual dengan inputan putaran . **Error! Bookmark not defined.**
- Tabel 4.6 Tegangan, daya dan kuat arus aktual dengan inputan putaran . **Error! Bookmark not defined.**
- Tabel 4.7 Daya yang dihasilkan wells rotor dari hasil perhitungan dengan masukan kecepatan**Error! Bookmark not defined.**
- Tabel 4.8 Daya yang dihasilkan turbin kombinasi dari hasil perhitungan dengan masukan kecepatan.....**Error! Bookmark not defined.**
- Tabel 4.9 Tip Speed Ratio pada turbin wells rotor**Error! Bookmark not defined.**
- Tabel 4.10 Tip Speed Ratio pada wells rotor dan darrieus**Error! Bookmark not defined.**

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

1.1 Kesimpulan

1. Wells rotor yang terpasang horisontal hanya mampu menerima energi gelombang akibat adanya gerakan orbital dari partikel-partikel air dan tidak efektif dalam menerima energi arus air karena sejajar dengan arah aliran partikel air, sedangkan turbin darrieus yang terpasang vertikal sangat efektif dalam menerima energi arus dan tidak efektif dalam menerima energi gelombang. Sehingga penggunaan turbin kombinasi wells dan darrieus sangat efektif dalam menyerap kedua energi baik gelombang maupun energi arus.
2. Pada tinggi gelombang lebih tinggi akan menghasilkan energi yang lebih besar pada periode yang sama. Pada turbin kombinasi dan wells rotor pada pengujian ini dihasilkan putaran turbin yang maksimal pada periode gelombang sebesar 1,5s. Efisiensi maksimal yang diperoleh dari turbin kombinasi wells dan darrieus adalah sebesar 21,6% dan pada wells rotor sebesar 20,8% dengan ketinggian gelombang 0,123 m.
3. Dengan perbedaan tinggi gelombang, putaran turbin yang dihasilkan dan kecepatan partikel air maka diketahui hasil *tip speed ratio* (TSR) pada turbin kombinasi wells rotor dan darrieus sebesar 1,84 dan pada wells rotor sebesar 2,26.

1.2 Saran-saran

- ~ Perlu adanya pengembangan yang lebih lanjut dalam penelitian tentang turbin kombinasi antara wells dan darrieus untuk mendapatkan efisiensi yang lebih baik.
- ~ Lebih banyak inovasi pada sisi aerofoil dengan penambahan sudut serang untuk meningkatkan tekanan pada bilah turbin sehingga dapat meningkatkan penyerapan energi yang lebih baik.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR PUSTAKA

- Bambang Triatmodjo, (1999), “*Teknik Pantai*”, edisi pertama, BETA, Yogyakarta
- John Twidell, Tony weir, (2006), “*Renwable Energy Resources*”, 2nd edition, Taylor & Francis, London .
- Bernard Le Mehaute, (1976), “*An Introduction hydrodynamics & water waves*”, Springer-Verlag, New York .
- R, Bhattacharyya, M.E. Mc Cormick, 2003, “*Wave Energy Conversion*”, volume 6, series edition, Elseveir Ocean Engineering, New York.
- Herald Vervoorn, 1997, *Wave Energy Conversion*, Thesis, Delf University.
- David G. Dorrell and Min-Fu Hsieh, (2008), “Performance of Wells Turbines for use in Small-Scale Oscillating Water Columns”, ISOPE,.
- Katsuya Takasaki, Manabu Takao, Toshiaki setoguchi, 2014, “Effect Of Blade Shape on the Performance of Wells Turbine for Wave Energy Conversion”, International Scholarly and Scientific Research & Innovation.
- Z. Carija, L. kranjcevic, V. Banic, M. Cavrak, (2012), “Numerical Analysis of Wells Turbine for Wave Power Conversion”, Article Faculty of Engineering, Univirsity of Rijeka.
- Thakker, A., Abdulhadi, R., 2008 : “The performance of Wells turbine under bi-directional airflow, *Renewable Energy*”, 33, 11, 2467–2474.
- Thakker, A., Frawley, P. i Sheik Bajeeet, E., 2001 : “Numerical Analysis of Wells Turbine Perfor- mance Using a 3D Navier-Stokes Explicit Sol ver”. Proceedings of the Eleventh International Offshore and Polar Engineering Conference. Stavanger, Norway, 604-608.
- Gato, L. M. C., and Henriques, J. C. C., 1994, “*Optimization of Symmetrical Blades for Wells Turbine*”, *Air Turbine Development and Assessment for Wave Power Plants*, contract JOU2-CT93-0333, Progress Report, Instituto Superior Técnico, Lisbon.
- Erwandi, 2009, “ The Research On Vertical Axis Marine Current Proceeding Of Ocean Sciene”, *Technology, And Policy Syposium, World Ocean Conference*”, Manado
- Erwandi, 2011, “The Development Of Indonesian Vertical Axis Marine Current Turbine For The Tidal Power Generation”, Indonesia Marine

- El-Sayed, A.F dan Abdel Azim. 1995. "Dynamics of Vertical Axis Wind Turbines (Darrieus Type)". Zagazig University.
- Ion NILA, Radu BOGATEANU, Marcel STERE, 2012, "Small Power Wind Turbine (Type Darrieus)", Romania.
- Hantoro, R., Utama, IK AP., Erwandi, 2009, "Flow Visualization And Shape Mode In The Study Of Vortex Induced Vibration (VIV) And Torsional Vibration (TV) On Vertical Axis Ocean Current Turbine (VAOCT)", *Procedding Of Ocean Sciene, Technology, And Policy*" syposium, world ocean conference, Manado.
- Turaj Ashuri, Gerrard van Bussel, Stefan Mieras, 2012, "Development and Validation of a Computational Model For Design Analysis of a Novel Marine Turbine" Delft The Netherlands.
- Tapan H. Barot, Hitesh Jarwala, Mayur Kevadiya, May 2015, "a Review on Straight Bladed Vertical Axis H-Type Darrieus Wind Turbine", Gujarat, India.
- E. J. Soons, 2007, "Improving the Hydrodynamic Performance of a Combined Wells-Darrieus Rotor", Thesis Master, Delft University of Technology, Delft - Netherlands.
- International Application Published Under Patent Cooperation Treaty (PCT) WO 2010/011133 A1, 2010, "*a Device for the Utilisation of Wave Energy and a Method*".
- International Application Published Under Patent Cooperation Treaty (PCT) WO 2010/062170 A1, 2010, "*an Apparatus for Harvesting Energy from a Body of Water and a Method*"

BIOGRAFI



Daif Rahuna, dilahirkan di Surabaya pada tanggal 01 Agustus 1974 dari pasangan W. Setiawan (Alm) dan S. Nikmah, merupakan anak pertama dari 2 bersaudara, yang saat ini tinggal di Pagesangan IV Utara Lapangan Blok C no. 6 Surabaya.

Jenjang pendidikan dasar di tempuh selama 6 tahun (tahun 1980-1986) di SDN Ngagel I Surabaya, dan berikutnya melanjutkan pendidikan di SMPN 12 Surabaya (tahun 1986-1989), sedangkan pendidikan menengah di Pendidikan dan Latihan Kejuruan Teknik (DLKT) PT PAL. Indonesia di Ujung Surabaya (tahun 1989-1993). Setelah lulus pada tahun yang sama langsung bekerja di PT PAL. Indonesia di divisi Direktorat Teknologi dan ditempatkan di Laboratorium Hidrodinamika Indonesia yang merupakan kerjasama antara PT. PAL Indonesia dan BPPT. Sambil bekerja melanjutkan kuliah S1 jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik bdi Universitas tujuh belas Agustus 1945 Surabaya (tahun 1994-2001). Pada pertengahan kuliah S1 mengikuti kuliah yang lain di Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya program studi Teknik Bangunan Kapal jenjang pendidikan D3 (tahun 1998-2000).

Pada tahun 1998 hingga sekarang bergabung dengan UPT Balai Teknologi Hidrodinamika BPP Teknologi di Surabaya. Melakukan penelitian dan pengembangan dengan team Pembangkit Listrik Tenaga Arus Laut (PLTAL) sejak tahun 2009 hingga sekarang.

Pada tahun 2014 mendapat kesempatan untuk melanjutkan studi S2 di Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya pada fakultas Teknik Kelautan Jurusan Teknik Sistem dan Pengendalian Kelautan.

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Banyak penelitian yang dilakukan dalam mengembangkan dan memanfaatkan energi laut terutama pada sumber energi arus dan gelombang laut. Pada prinsipnya semua itu memanfaatkan energi kinetik dan energi potensial yang terjadi akibat gelombang laut dan energi kinetik yang terjadi pada arus laut, dimana energi tersebut digunakan untuk menggerakkan turbin merubah menjadi energi mekanik dan akan memutar generator merubah menjadi energi listrik.

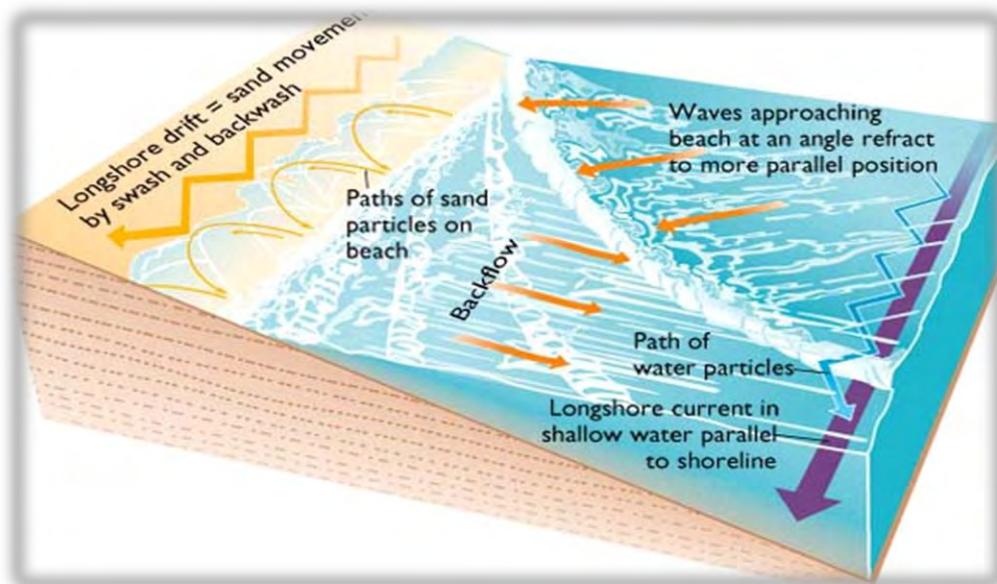
Menurut *Asosiasi Energi Laut Indonesia (ASELI)*, energi yang berasal dari laut (*ocean energy*) dapat dikategorikan menjadi 3 macam antara lain, energi ombak (*wave energy*), energi pasang surut (*tidal energy*) dan *ocean thermal energy conversion* (OTEC). Dalam lokakaryanya bertema “*Analisis Data Peta Potensi dan Penguatan Regulasi Energi Laut Indonesia*”, 2012 diadakan di Bandung, menyatakan bahwa energi laut di Indonesia menyimpan potensi sebesar 49 ribu MW.

Gelombang laut yang terjadi di tengah samudera sangat tidak beraturan (*irregular wave*), setelah mendekati pantai gelombang tersebut berubah menjadi gelombang beraturan (*regular wave*) menyesuaikan dengan kontur dari dasar laut dan kedalaman. Gerakan gelombang yang beraturan dapat digunakan sebagai pembangkit atau sumber energi, sehingga membutuhkan alat konversi energi dalam pemanfaatan energi gelombang tersebut, jadi dalam pemanfaatan gelombang laut sebagai sumber energi tidak harus berada di tengah laut.

Menurut *John Twidell and Tony Weir, 2007*, energi yang dihasilkan dari energi gelombang sangat besar, dimana energi gelombang laut yang dihasilkan berbanding dengan amplitudo dan perioda pergerakan gelombang laut, dimana panjang periode (~ 10 s) dan besar amplitudo (~ 2 m). Energi yang dihasilkan umumnya 50 sampai dengan 70 kW m^{-1} dari lebar gelombang.

Sedangkan arus laut mempunyai potensi energi yang tersimpan juga cukup besar, menurut *Kantha dan Clayson, 2000*, interaksi yang terjadi antara bumi dan bulan diperkirakan menghasilkan energi arus dan pasang surut sebesar 3,17 TW (*tetawatt*) setiap harinya diseluruh dunia sedikit lebih besar dari seluruh pembangkit yang ada diseluruh dunia di tahun 1995 yaitu sebesar 2,92 TW.

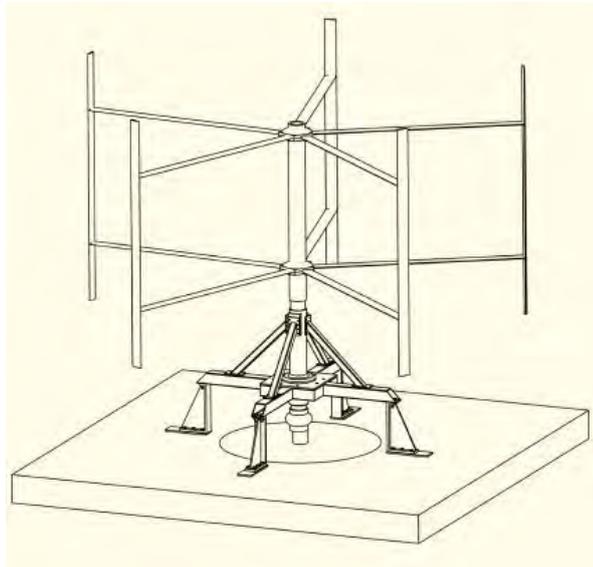
Gelombang yang datang menuju pantai membawa massa air dan momentum, searah penjalaran gelombangnya. Hal ini menyebabkan terjadinya arus di sekitar kawasan pantai. Penjalaran gelombang menuju pantai akan melintasi daerah-daerah lepas pantai (*offshore zone*), daerah gelombang pecah (*surf zone*), dan daerah deburan ombak di pantai (*swash zone*). Diantara ketiga daerah tersebut, *Bambang Triatmodjo, 1999* menjelaskan bahwa karakteristik gelombang di daerah surf zone dan swash zone adalah yang paling penting di dalam analisis proses pantai. Gerakan air tersebut menyimpan potensi energi yang sangat besar sehingga memungkinkan untuk dimanfaatkan menjadi suatu sumber energi baru.



Gambar 1.1 Penjalaran gelombang dan arus di pantai
(*Science Community Locus, 2010*)

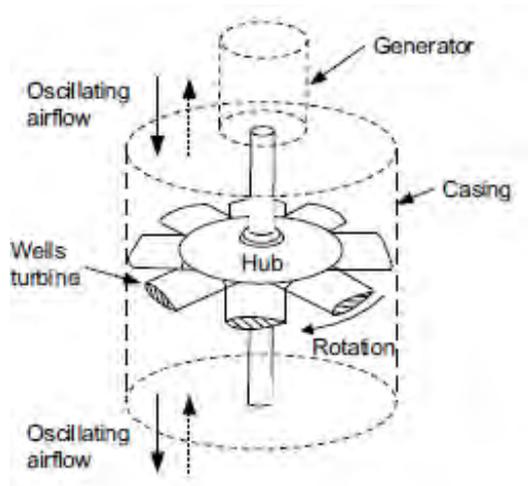
Dalam penyerapan energi arus laut sering menggunakan jenis turbin type darrieus (gambar 1.1), dimana turbin tersebut mempunyai sumbu vertikal,

dengan komponen utama, antara lain bilah (*blade*), lengan (*radial arm*) dan poros (*shaft*). Pada turbin type darrieus mempunyai bilah yang sejajar dengan sumbu poros turbin, bilah itu sendiri dipegang oleh lengan turbin sehingga dapat menyerap energi dari arah horisontal.



Gambar 1.2 Konsep design Darrieus turbine vertical axis
(M. Grabbe, et al, 2009)

Umumnya wells rotor digunakan pada konversi penyerapan energi gelombang sistem *oscilating water coulomb* (owc), dimana turbin berada di dalam ruang. Gerakan turbin tergantung dari gerakan fluida didalamnya, ada yang langsung memanfaatkan gerakan air naik-turun akibat gelombang dan juga ada yang memanfaatkan udara yang terkompresi akibat gerakan gelombang. Wells rotor (gambar 1.2) mempunyai dua bagian utama, antara lain poros turbin (*shaft*) dan bilah (*blade*). Wells rotor tidak memiliki lengan karena posisi bilah tegak lurus dengan poros dan dihubungkan dengan hub. Sehingga wells rotor mampu untuk menyerap energi yang datang dari arah vertikal dan horisontal.



Gambar 1.3 Wells rotor pada system OWC
(Shinya Okuhara, et al, 2013)

Dari konsep kinerja pada masing-masing type turbin, dimana wells rotor mempunyai kemampuan untuk menyerap energi dari arah vertikal dan turbin darrieus mampu menyerap energi dari arah horisontal, maka dilakukan penggabungan kedua-duanya. Tetapi wells rotor tidak lagi di tempatkan didalam ruang tertutup lagi, dan akan ditempatkan pada area terbuka sehingga gerak oscilasi gelombang air akan mengenai secara langsung terhadap sudu-sudu dari wells rotor itu sendiri. Untuk mengetahui dan membuktikan bahwa konsep penggabungan dua type turbin tersebut perlu dilakukan penelitian, dan dari penelitian tersebut akan dapat diketahui dari efisiensi, putaran, torque dan daya yang dihasilkan dalam penyerapan energi.

Besarnya potensi sumber energi yang bersumber dari laut, maka banyak sekali negara-negara dan industri besar yang berlomba untuk melakukan riset agar bisa mendapatkan hasil energi yang maksimal, efisien dan berharga murah. Keuntungan dari pemanfaatan energi laut adalah selain ramah lingkungan dan juga mempunyai densitas lebih besar daripada energi bayu, mengingat air laut mempunyai densitas 830 kali densitas udara, sehingga kapasitas turbin yang sama maka dimensi turbin arus jauh lebih kecil dari pada turbin angin.

1.2 Perumusan Masalah

Energi laut merupakan sumber energi baru yang membutuhkan sentuhan agar bisa dimanfaatkan sebagai sumber energi alternatif saat ini dan masa depan. Permasalahan yang ada dalam pengembangan turbin konversi energi gelombang terutama pada kombinasi wells rotor dan turbin darrieus adalah belum begitu banyak dilakukan penelitian dan pengkajiannya. Sehingga belum adanya literatur maupun jurnal saat ini yang membahas masalah tentang hal tersebut, dikarenakan perlunya untuk mengetahui beberapa karakteristik dan fenomena yang terjadi pada konversi energi gelombang yang menggunakan kombinasi wells rotor dan turbin darrieus, seberapa besar keefektifan (putaran, torque, daya dan efisiensi) wells rotor yang dikombinasikan dengan turbin darrieus dalam penyerapan energi gelombang, serta seberapa besar panjang dan frekwensi gelombang yang yang dibutuhkan dalam memutar turbin sehingga menghasilkan penyerapan energi yang optimum.

1.3 Maksud dan Tujuan

Adapun maksud dan tujuan penelitian dan penulisan ini adalah

- a. Mengetahui karakteristik secara visual dari wells rotor pada saat penyerapan energi gelombang.
- b. Mengetahui besarnya putaran, torque, efisiensi dari wells rotor dalam penyerapan energi gelombang.
- c. Mengetahui besarnya tinggi gelombang dan periode gelombang yang optimum bagi wells rotor dalam penyerapan energi gelombang.

1.4 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dan dampak yang akan dihasilkan dari penelitian ini adalah:

- a. Pemanfaatan arus dan gelombang laut menjadi sumber energi baru
- b. Adanya rancangan wells rotor untuk penyerapan energi gelombang
- c. Adanya data-data yang mendasar dalam proses desain rancang bangun dari wells rotor wave energy conversion.

1.5 Batasan Masalah

Dalam penelitian ini kajian teknik dalam hal penyerapan energi kinetik yang dihasilkan dari gerakan gelombang oleh wells rotor akan diterapkan pada model yang akan di uji. Ada beberapa batasan masalah dalam studi eksperimental ini, antara lain;

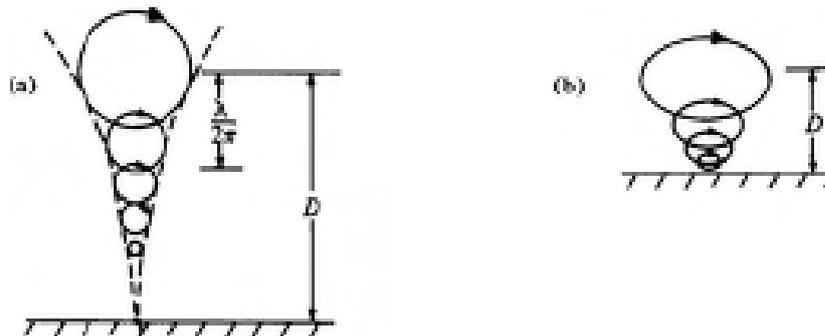
- a. Kajian difokuskan pada model wells rotor dengan spesifikasi sebagai berikut:
 - ~ Berbentuk hidrofoil naca 021
 - ~ Jumlah bilah wells rotor 6 buah
 - ~ Diameter wells rotor 910 mm
- b. Model turbin type Darrieus, dengan spesifikasi sebagai berikut:
 - ~ Diameter turbin 1020 mm
 - ~ Jumlah bilah turbin 3 buah
 - ~ Panjang span 980 mm
 - ~ Panjang chord 83 mm
- c. Pengujian dilakukan di kolam uji (*shallow water*) dengan gelombang buatan, adapun data gelombang sebagai berikut:
 - ~ Kedalaman kolam uji 1,2 m
 - ~ Tinggi gelombang 0,08 – 0,18 m
 - ~ Periode 1,0; 1,5; 2,0 s
- d. Sudut pitch pada bilah wells rotor adalah 0° (normal).

BAB II

KAJIAN PUSTAKA

2.1 Konversi Gelombang Laut

Pada dasarnya konversi energi gelombang laut dapat dinyatakan dalam istilah yang sangat umum yaitu, gaya (*force* atau *tourque*) dari gelombang yang menyebabkan gerakan relatif antara penyerap energi dan titik reaksi, sehingga mendorong fluida bekerja melalui generator penggerak utama. Sifat periodik pada gelombang laut merupakan gerakan yang relatif dalam oscilasi dan memiliki rentang frekwensi 3-30 siklus per menit. Hal ini jauh dari kebutuhan besarnya putaran/menit yang digunakan untuk pembangkit listrik konvensional. (*Toshiaki Setoguchi, 2001*).



Gambar 2.1 Gelombang pada laut dalam dan laut dangkal
(sumber: John Twidell, Tony weir, 2006)

Umumnya perangkat energi gelombang dirancang untuk mengekstrak energi dari gelombang air yang dalam. Ini adalah bentuk paling umum dari gelombang, ditemukan saat kedalaman rata-rata dasar laut D lebih dari setengah panjang gelombang λ . Sebagai contoh, gelombang laut untuk pembangkit listrik dapat diharapkan memiliki panjang gelombang ~ 100 m dan amplitudo ~ 3 m, dan

berperilaku sebagai gelombang air dalam pada kedalaman dasar laut lebih besar dari ~ 30 m. Gambar 2.1 (a) menggambarkan gerakan partikel air dalam gelombang air yang dalam. Gerak partikel melingkar memiliki amplitudo yang berkurang secara eksponensial dengan kedalaman dan menjadi diabaikan untuk $D > \lambda / 2$. Dalam air dangkal, Gambar 2.1 (b), gerak menjadi elips dan gerakan air terjadi terhadap dasar laut, menghasilkan disipasi energi.

2.2 Energi Gelombang Laut

Ketika angin dilaut berhembus sehingga dapat membangkitkan gelombang, disini energi gelombang laut ditimbulkan secara alami. Gelombang laut bergerak dengan jarak yang panjang maka kemudian gelombang laut akan melemah dan akan teredam.

Ada dua pengukuran yang digunakan dalam menentukan energi yang dihasilkan oleh gelombang laut yaitu, tinggi gelombang dan periode gelombang. Dengan kedua nilai tersebut dan teori gelombang linier maka energi gelombang dapat dihitung sebagai berikut.

Energi total yang dihasilkan oleh gelombang di permukaan:

$$E = \frac{\rho \cdot g \cdot H^2}{8} = \frac{\rho \cdot g \cdot A^2}{2}$$

Dimana, E = energi yang dihasilkan per luas permukaan [J/m^2]

ρ = massa jenis air laut, 1025 kg/m^3

g = gravitasi bumi, $9,81 \text{ m/s}^2$

H = tinggi gelombang [m]

A = amplitudo gelombang, $1/2H$

Energi per puncak gelombang:

$$E = \frac{\rho \cdot g \cdot H^2 \cdot \lambda}{8} = \frac{\rho \cdot g \cdot A^2 \cdot \lambda}{2}$$

Dimana, E_T = energi yang dihasilkan per panjang gelombang [J/m]

λ = panjang gelombang [m]

Pada gelombang laut dapat menghasilkan energi potensial dan energi kinetik. Energi potensial gelombang laut dipengaruhi adanya tinggi gelombang sedangkan energi kinetik tergantung adanya pergerakan jumlah partikel air laut. Sehingga total energi wave laut yang dihasilkan:

$$E = E_p + E_k$$

$$E = E_k = \frac{\rho \cdot g \cdot H^2 \cdot \lambda}{16}$$

Dimana, E_p = energi potensial [J/m]

E_k = energi kinetik [J/m]

Perubahan energi gelombang dari satu titik ke titik yang lain dalam arah gerakan gelombang secara spesifik disebut dengan energi flux atau energi gelombang.

$$P_w = \frac{\rho \cdot g \cdot H^2 \cdot C_g}{8} = \frac{\rho \cdot g \cdot A^2 \cdot C_g}{8} = E \cdot n \cdot c$$

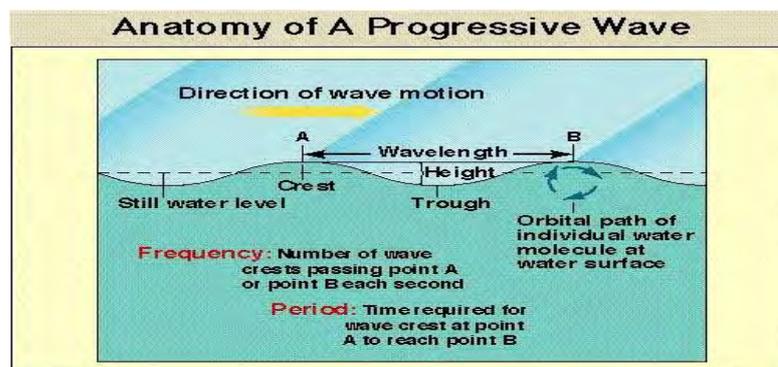
Dimana, P_w = energi gelombang [W/m]

C_g = kecepatan [m/s]

= $n \cdot c$

c = kecepatan gelombang [m/s]

2.3 Teori Gelombang Laut Linier



Gambar 2.2 Gelombang sinusoidal
(sumber: lancaster university)

Gerakan gelombang laut diasumsikan bebrbentuk sinusoidal dengan tinggi gelombang H panjang gelombang λ . Gelomabng sendiri mempunyai komponen periode T dan kecepatan c, hubungan keduanya $L = c \cdot T$

Level permukaan gelombang laut dapat didefinisikan sebagai berikut:

$$(x, t) = 1/2 H \cdot \sin\left(\frac{2\pi t}{T} - \frac{2\pi x}{\lambda}\right)$$

Dari definisi ini dapat digunakan:

$$\begin{aligned} a &= \text{amplitudo [m]} \\ &= 0,5 H \\ \omega &= \text{fekwensi [s}^{-1}\text{]} \\ &= 2\pi/T \\ k &= \text{jumlah [m}^{-1}\text{]} \\ &= 2\pi/L \end{aligned}$$

Sehingga,

$$(x, t) = a \cdot \sin(\omega t - kx)$$

untuk kecepatan gelombang,

$$c = \omega/k$$

2.3.1 Kecepatan Potensial

Dalam teori gelombang linear partikel air mempunyai kecepatan potensial Φ , pada kondisi seperti di bawah ini,

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = 0$$

Dimana, pada bottom

$$\frac{\partial \Phi}{\partial z} = 0$$

Pada permukaan

$$\frac{\partial \Phi}{\partial z} = \frac{\partial \Phi}{\partial t}$$

Sehingga,

$$\Phi(x, z, t) = \frac{\omega a \cos k(h + z)}{k \sin kh} \cos(\omega t - kx)$$

2.3.2 Kecepatan Partikel Air

Hasil dari diferensial kecepatan partikel air dapat diketahui sebagai berikut

$$u = \frac{\partial \Phi}{\partial x}$$

$$u = \omega a \frac{\cos k(h + z)}{\sin kh} \sin(\omega t - kx)$$

$$u = U_{amplitude} \cdot \sin(\omega t - kx)$$

$$w = \frac{\partial \Phi}{\partial z}$$

$$w = \omega a \frac{\sin k(h + z)}{\sin kh} \cos(\omega t - kx)$$

$$w = w_{amplitude} \cdot \cos(\omega t - kx)$$

Sehingga untuk laut dalam

$$U_{amplitude} = w_{amplitude} = \omega a e^{kz}$$

Dan untuk laut dangkal

$$U_{amplitude} = \omega a / kh$$

$$w_{amplitude} = \omega a \cdot (1 + z/h)$$

2.3.3 Hubungan Dispersi

Terdapat hubungan antara frekuensi gelombang dan jumlah gelombang pada kebebasan osilasi gelombang yang disebut dengan hubungan dispersi.

$$\omega^2 = gk \tan kh$$

Hubungan dengan panjang gelombang

$$\lambda = \frac{gT^2}{2\pi} \tan \frac{2\pi h}{\lambda}$$

$$\lambda = \lambda_0 \tan \frac{2\pi h}{\lambda}$$

Dimana, λ_0 = panjang gelombang laut dalam (m)

Kecepatan gelombang $c = \omega/k$ dapat dituliskan sebagai hubungan dispersi

$$c^2 = \omega^2/k^2$$

$$c^2 = \frac{g}{k} \tan kh$$

Atau

$$c = \left[\frac{g\lambda}{2\pi} \tan \frac{2\pi h}{\lambda} \right]^{1/2}$$

$$c = \frac{gT}{2\pi} \tan \frac{2\pi h}{cT}$$

$$c = c_0 \tan kh$$

Sehingga untuk gelombang laut dalam

$$c = c_0 = \frac{g\lambda}{2\pi}$$

Dan gelombang laut dangkal adalah

$$c = [gh]^{1/2}$$

2.3.4 Tekanan Gelombang

Berbagai tekanan gelombang dapat ditunjukkan oleh hukum bernoulli

$$p = -\rho gz - \rho \frac{\varphi}{t} - \frac{1}{2} \rho v^2$$

Dimana, p = tekanan (N/m²)

ρ = density (kg/m³)

g = kecepatan gravitasi (m/s²)

v = kecepatan partikel air (m/s)

$\frac{1}{2} \rho v^2$ dapat diganti untuk gelombang linear, sehingga tekanan menjadi

$$p = -\rho g z - \frac{\rho g H \cos k(h+z)}{2 \cos kh} \sin(\omega t - kx)$$

2.3.5 Energi Gelombang

Energi potensial dan energi kinetik dari energi gelombang

$$E_p = E_k = \frac{1}{4} \rho g a^2$$

Dimana, E_p = energi potensial pada permukaan (J/m^2)

E_k = energi kinetik pada permukaan (J/m^2)

Total energi per luasan permukaan,

$$E = \frac{\rho g a^2}{2} = \frac{\rho g H^2}{8}$$

Dimana, E = energi total perluasan permukaan (J/m^2)

Total energi per puncak panjang gelombang ,

$$E_T = \frac{\rho \cdot g \cdot H^2 \cdot \lambda}{8} = \frac{\rho \cdot g \cdot a^2 \cdot \lambda}{2}$$

Dimana E_T = energi total per meter pada puncak gelombang (J/m)

λ = panjang gelombang (m)

Energi rata-rata yang digerakan oleh gelombang per waktu per lebar puncak disebut dengan energi gelombang atau energi flux.

$$P = \left(\frac{1}{2} \rho \cdot g \cdot a^2 \right) \left(\frac{1}{2} + \frac{k \cdot h}{\sin 2kh} \right) (\omega \cdot k)$$

$$P = E \cdot n \cdot c$$

Dimana, P = energi gelombang/flux (W/m)

$$n = \frac{1}{2} + \frac{k \cdot h}{\sin 2kh}$$

Faktor (n) adalah indikasi kedalaman dengan nilai yang bervariasi antara 0,5 – 1,0 itu diukur dari dalam ke dangkal.

$$c_g = n \cdot c$$

c_g = kecepatan group (m/s)

2.3.6 Faktor Shoaling

Tinggi gelombang dan panjang gelombang dari perakan gelombang pada berbagai kedalaman dipengaruhi oleh kedalaman yang pada akhirnya mempengaruhi energi gelombang itu sendiri.

Energi gelombang konstan

$$\frac{1}{8} \rho \cdot g \cdot H_0^2 \cdot n_0 \cdot c_0 = \frac{1}{8} \rho \cdot g \cdot H_1^2 \cdot n_1 \cdot c_1$$

Pada kedalaman $n_0 = 1/2$

$$\frac{1}{2} H_0^2 \cdot n_0 \cdot c_0 = H_1^2 \cdot n_1 \cdot c_1$$

2.4 Tip Speed Ratio (TSR)

Pemilihan tip speed ratio untuk wells rotor tergantung dari beberapa faktor. Umumnya untuk tip speed ratio yang tinggi adalah gambaran keinginan dengan ptaran poros yang tinggi, hal ini membutuhkan operasional yang efisien dari generator pembangkit listrik. Adapun hubungan antara gelombang dan putaran rotor dapat diketahui sebagai berikut:

$$\lambda = \frac{v}{V} = \frac{\omega r}{V} = \frac{2 \pi f r}{V}$$

Dimana λ = tip speed ratio

v = kecepatan putaran rotor

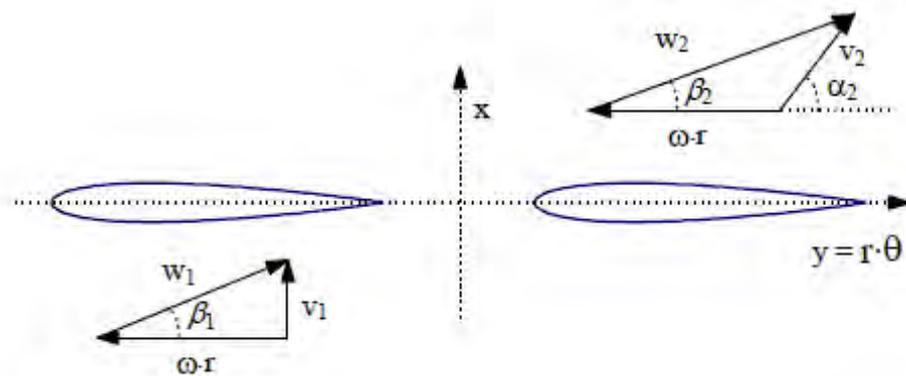
V = kecepatan aliran

r = jari-jari rotor

f = frekuensi

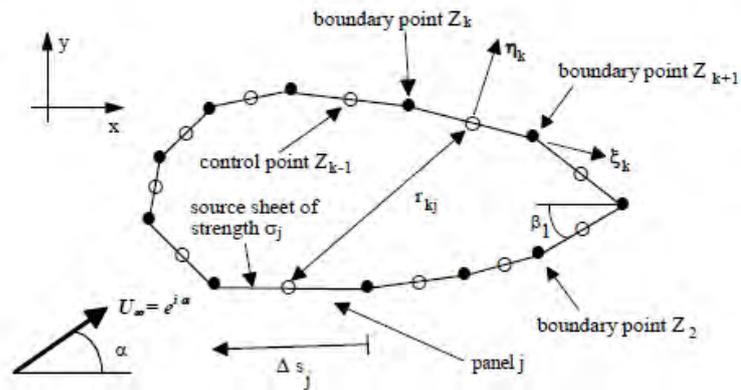
2.5 Blade wells rotor

Wells turbin adalah turbin aliran aksial yang pada dasarnya terdiri dari rotor dengan blade airfoil penampang simetris radial diatur pada sudut stagger $\lambda = 90^\circ$ (Raghunathan dan Tan, 1983a; Raghunathan, 1995; Gato dan Falcão, 1984; 1988), seperti yang ditunjukkan, simetris pesawat normal terhadap sumbu turbin, blade ini tidak sensitif terhadap arah aliran udara aksial yang mendekat dan memberikan torsi searah dari aliran udara yang berosilasi. Versi yang berbeda dari turbin telah dipertimbangkan dan dipelajari dengan dan tanpa adanya baling-baling, misalnya biplan (Raghunathan dan Tan, 1983b; Inoue et al, 1986; Gato dan Curran, 1996), kontra rotating (Beattie dan Raghunathan, 1993; Gato dan Curran, 1996) dan variabel-pitch turbin Wells (Gato dan Falcão, 1989; Sarmiento et al, 1990; Salter, 1993).



Gambar 2.3 Geometri blade dan diagram kecepatan
(sumber: Gato, Henriques, 1994)

Salah satu poin utama yang perlu dipertimbangkan dalam desain turbin rotor Wells untuk aplikasi energi gelombang adalah memaksimalkan berbagai kondisi laut di mana turbin dapat beroperasi secara efisien. Untuk tingkat aliran tinggi, kisaran operasional semua konfigurasi fixed-pitch dibatasi oleh aliran berputar sekitar baling-baling. Hal ini disebabkan sensitivitas turbin ke sudut aliran udara relatif mendekati pisau (Gato, Henriques, 1994).



Gambar 2.4 Permukaan panel distribusi
(sumber: Gato, Henriques, 1994)

Metode panel telah menjadi alat aerodinamis standar untuk solusi numerik arus kecepatan rendah, sejak akhir 1960-an. Namun, berbagai formulasi metode panel telah diusulkan, berbeda dasarnya dalam cara mereka menerapkan ini arus dasar.

Aliran non-lifting disimulasikan sebagai kombinasi dari distribusi dari sumber konstan kekuatan σ_j pada setiap j panel permukaan, dan aliran seragam pada α sudut datang. Kecepatan kompleks pada titik kontrol k diperoleh menambahkan kecepatan kompleks dievaluasi, masing-masing, untuk lembaran sumber (Gato dan Henriques, 1994).

$$w_k = -\frac{i}{2}\sigma_k + \sum_{j=1, N}^{j \neq k} Q_{kj}\sigma_j$$

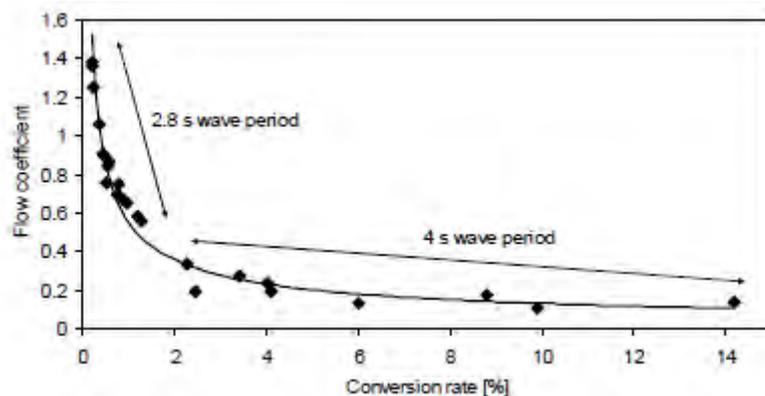
$$w_k^\infty = e^{(-\alpha + \beta_k)i}$$

Koefisien blade untuk single aerofoil, (Gato dan Henriques, 1994).

$$Q_{kj} = \frac{e^{i(\beta_k - \beta_j)}}{2\pi} \ln \left(\frac{z_k - c_{j1}}{z_k - c_{j2}} \right)$$

2.6 Review Jurnal

David G. Dorrell, Min-fuHsieh, 2008, melakukan penelitian performance wells rotor skala model yang digunakan untuk oscilating water columns. Dimana dimensi model wells rotor untuk studi eksperimental tersebut berdiameter 132 mm dan diameter hub 74 mm dengan sistem double stage, sedangkan pemodelan numerik dilakukan dengan menggunakan software Matlab dan CFD. Adapun Tujuan dari pengujian wells rotor yang dilakukan ini adalah untuk menggambarkan prinsip-prinsip desain dan sistem perhitungan dalam pengembangan dan penerapan pembangunan sistem OWC yang dengan skala yang sebenarnya. Dari penelitian ini dapat ditarik beberapa kesimpulan antara lain, tingkat konversi turbin sangat rendah untuk kecepeatan yang konstan dan dengan oscilasi yang rendah. Pada hasil simulasi numerik dengan menggunakan CFD dengan konversi lebih tinggi koefisien aliran menjadi lebih rendah, sehingga output daya yang dihasilkan akan menjadi rendah karena gelombang kecil. Tingkat konversi akan menjadi sangat tinggi jika koefisien aliran menurun sekitar 0,1 sesuai dengan literasi sebelumnya (*Watterson dan Raghunathan 2006, dan lain-lain*).



Gambar 2.5 Tingkat konversi terhadap koefisien aliran
(sumber: David G. Dorrell, Min-fuHsieh, 2008)

L.M.C. Gato, J. C. C. Henriques, 1994, optimasi pemilihan blade dengan profil simetri pada wells turbin, dalam penelitiannya dengan melakukan perbandingan metode perhitungan antara Polak Ribiere's dan Panel Method.

Kesimpulan yang dihasilkan bahwa hasil kedua metode yang digunakan dalam perhitungan adalah sama, pada jenis foil naca 0015 mengalami start awal lebih lama, hal tersebut dapat dilihat dari drag yang tinggi pada sudut datang yang rendah yang mana tidak diinginkan dalam turbin wells.

Z. Carja, L. Kranjcevic, V. Banic, M. Cavrak, 2012, penelitian yang dilakukan dengan cara pemodelan numerik pada wells rotor dengan type airfoil naca 0015, naca 0020, naca 0021, dengan menggunakan software Fluent dengan menggunakan tiga model turbulen RNG k- ϵ yang berbeda. Adapun kesimpulan yang dapat ditarik dari hasil pengkajian numerik tersebut adalah pada karakteristik operasional wells turbin dengan NACA 0021 mempunyai koefisien yang berbeda dengan aliran udara masuk. Efisiensi tertinggi pada wells turbin mencapai 60% untuk koefisien aliran non dimensional dengan koefisien aliran $\phi=0,155$. Penggunaan sistem konversi energi gelombang OWC sangat sesuai yang terdiri dari ruang udara turbin dan gelombang laut secara langsung.

Tapan H Barot, Hitesh Jariwala, Mayur Kevadiya, Mei 2015, melakukan studi literatur dalam penggunaan type blade dengan variasi type NACA pada turbin Darrieus sumbu vertikal, adapun type profile blade yang digunakan dalam kajian ini antara lain, NACA 0012, 0015, 0018, 0021 dan 0063. Dan hasil dari kajian studi literatur tersebut dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut, dengan menggunakan profil blade type NACA 0021 lebih baik saat start awal dan mempunyai ketebalan yang sesuai, memiliki efisiensi yang lebih baik yang berbanding lurus dengan efisiensi turbin dan memiliki self starting yang lebih baik dari type NACA yang lain dengan koefisien power yang tinggi.

K.E. Swalwell, et al, 2001, disajikan pengaruh intensitas turbulensi pada stall dari NACA 0021 Aerofoil. Dalam tulisan ini penulis telah menyajikan beberapa data lift dan drag yang diperoleh pada bagian tekanan pada NACA 0021 airfoil dengan bilangan Reynolds dari sekitar $3,5 \times 10^5$ lebih besar dari sudut serang. Airfoil menjadi pusat aliran rendah turbulensi intensitas turbulensi 0,6% dan arus berputar pada skala panjang 0,56 chord, intensitas 4% dan 7%. Para penulis menyimpulkan bahwa peningkatan intensitas turbulensi 7% pada stall akan menjadi lebih lama terjadinya.

G Colley, et al, 2010, disajikan pengaruh posisi blade rotor pada kinerja turbin angin vertikal axis. Dalam makalah ini studi numerik disajikan dengan tujuan mengevaluasi output kinerja tiga *Turbin Vertikal Axis Wind* (VAWT) konfigurasi. Para penulis telah menggunakan Computational Fluid Dynamics (CFD) Multi Referensi Bingkai dua dimensi (MRF) pendekatan telah digunakan untuk melakukan simulasi steady state. Untuk tujuan ini sebuah kecepatan inlet 4 m/s telah digunakan bersama dengan blade rotor Tip Kecepatan Rasio (λ) di kisaran 0-0,6. Telah ditentukan bahwa dalam sebuah bagian spesifikasi dari blade rotor, torsi maksimum diperoleh pada sudut rotor yang unik. Hal ini dapat dilihat bahwa output torsi turbin menurun dengan peningkatan rasio kecepatan ujung rotor (λ) untuk semua posisi blade rotor. Para penulis menyimpulkan bahwa VAWT karakteristik kurva daya bervariasi dengan posisi blade rotor relatif dan output torsi turbin menurun dengan peningkatan rasio kecepatan ujung rotor (λ) untuk semua tiga posisi blade rotor.

Joseph P. Tillman, 2011, menyajikan perbaikan untuk bilah turbin angin sumbu vertikal untuk membantu diri awal. Dalam penelitian ini penulis telah melakukan penelitian, perbaikan di airfoil atau desain blade untuk membantu dalam start awal pada tipe H-rotor sumbu vertikal turbin angin (VAWT) dan bagaimana perubahan ini akan mempengaruhi kinerja dari H-rotor VAWT. Para penulis menyimpulkan bahwa airfoil asimetris dapat mengaktifkan VAWT untuk self starting meskipun airfoil dengan leading edge yang lebih besar dan lebih tebal bagian cross section bekerja lebih baik di kecepatan angin rendah dan Reynolds number.

Javier Castillo, 2011, menyajikan desain sumbu vertikal turbin angin skala kecil. Para penulis berfokus pada desain sebuah turbin angin sumbu vertikal rotor kecil dengan kayu solid sebagai bahan konstruksi. Analisis aerodinamis dilakukan menerapkan model berdasarkan momentum pada program komputer matematika. Sebuah turbin angin dengan menggunakan tiga bilah diusulkan sebagai calon untuk pengujian prototipe lebih lanjut setelah mengevaluasi dampak dari beberapa parameter dalam efisiensi turbin, torsi dan akselerasi. Ini telah menemukan bahwa kayu merupakan bahan yang cocok untuk konstruksi rotor. Dan itu juga menemukan bahwa desain tiga dengan bilah lebih efisien daripada

rotor empat dengan bilah; soliditas turbin angin rendah dapat menimbulkan masalah diri awal efisiensi rotor rendah pada rasio kecepatan awal yang rendah.

Richard m. Keslo, et al, 2011, disajikan variasi kinerja terdepan untuk profil airfoil yang berbeda. Sebuah penyelidikan eksperimental telah dilakukan untuk mengetahui pengaruh sinusoidal terdepan tonjolan pada kinerja dua airfoil NACA dengan karakteristik aerodinamis yang berbeda. Pengukuran kekuatan pada airfoil penuh rentang dengan berbagai kombinasi tuberkulum amplitudo dan panjang gelombang mengungkapkan bahwa jika dibandingkan dengan setara dimodifikasi, tuberkel lebih bermanfaat bagi NACA 65-021 airfoil dari NACA 0021 airfoil. Para penulis menyimpulkan bahwa NACA 0021, yang memiliki ketebalan maksimum sebesar 30% dari chord, peningkatan kinerja lift di rezim pasca krios.

Franklyn Kanyako, disajikan Vertikal Axis Wind Turbine Kinerja Prediksi, Tinggi dan Rendah Analisis Fidelity. Dalam penelitian ini penulis menyoroti kemajuan dalam pengembangan model aerodinamis untuk memprediksi kinerja bilah lurus, profil sumbu vertikal blade turbin angin fixed-pitch. Sebuah elemen pisau algoritma momentum kesetiaan rendah ditingkatkan menggunakan database hybrid dibangun untuk menyelidiki soliditas turbin, dengan menganalisis efek dari chord pisau, jari-jari dan nomor pisau pada rasio kecepatan ujung yang berbeda. Para penulis telah melakukan investigasi numerik 2-D untuk membandingkan kemampuan prediksi kinerja CFD dan model matematika. Para penulis menyimpulkan bahwa CP negatif dan minimum torsi yang dihasilkan rasio kecepatan rendah di ujung, yang menyiratkan bahwa NACA 0015, NACA 0018, dan NACA 0021 airfoil tidak memiliki self starting yang baik. Namun demikian, NACA0021 telah terbukti memiliki kinerja awal lebih baik daripada dua airfoil lain karena bagian yang lebih tebal.

S.M. Camporeale, P. Filianoti, 2009, menyajikan sebuah pengkajian dan penelitian studi eksperimental pada wells turbin yang terkena aliran secara bervariasi. Pengujian bertujuan untuk menganalisis perilaku dan kinerja turbin yang terkena secara acak oleh berbagai aliran udara yang berosilasi, variabel sesuai dengan intensitas dan karakteristik spektrum dari laut. Pengukuran teknik akan dijadikan rekomendasi yang dikembangkan untuk uji di laut. Yang

memungkinkan untuk menentukan nilai koefisien torsi T dan tekanan koefisien Δp sebagai fungsi dari koefisien aliran, ϕ . Hasil analisis statistik dilakukan dengan menyorot dampak pada kondisi stall pada nilai tinggi koefisien aliran dan pada histeresis antara fase di mana laju aliran berkembang dan dimana laju aliran menurun. efisiensi konversi daya pneumatik di turbin (blade) listrik sekitar 25% dari kekuatan pneumatik karena dimensi kecil turbin, yang mengarah pada bilangan Reynolds rendah dan adanya pengaruh losses yang besar. Analisis regresi mampu untuk mengidentifikasi perbedaan yang cukup mengenai kondisi inflow dan outflow sehingga mempercepat atau memperlambat arus. Mekanisme histeresis pertama ditandai dengan loop-counter-clock wise (mengacu pada kondisi outflow) yang muncul dengan osilasi frekuensi tinggi. Amplitudo lingkaran sedikit, sehingga menghambat pada torsi turbin. Mekanisme yang kedua adalah terkait dengan kondisi stall dan muncul dengan osilasi dari amplitudo yang sangat besar, secara bebas dari frekuensi: setelah turbin berputar dan mampu mereproduksi nilai-nilai torsi yang sama diperoleh berdasarkan meningkatkan laju aliran, sampai aliran koefisien menjadi lebih rendah dari nilai yang dapat diidentifikasi sebagai koefisien aliran.

G. Bedon, M. Raciti Castelli, E. Benini, 2012, Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi dan mengetahui dampak dari soliditas rotor yang berhubungan dengan panjang chord, untuk diameter rotor seperti ditunjukkan pada sumbu vertikal Darrieus turbin angin kecil. Penelitian difokuskan pada kedua produksi listrik yang dihasilkan dan koefisien daya rotor, mengingat juga adanya kendala struktural yang berasal dari kekuatan sentrifugal karena rotor kecepatan sudut. Dalam pengkajian ini menggunakan aerofoil type NACA 0018 dengan spesifikasi turbin seperti ditunjukkan tabel 2.1.

Tabel 2.1 Geometric utama pada airofoil NACA 0018

Name	Value
Height	3.236 m
Diameter	2 m
Number of blades	3
Blade profile	NACA 0018
Blade shape	linear

Sumber: *G. Bedon, M. Raciti Castelli, E. Benini, 2012*

Soliditas rotor dapat didefinisikan sebagai berikut:

$$\sigma = \frac{Nc}{2\pi R}$$

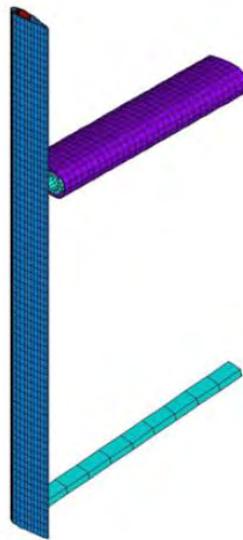
Dimana,

- σ = solidity
- N = number of blade
- c = chordlength
- R = radius

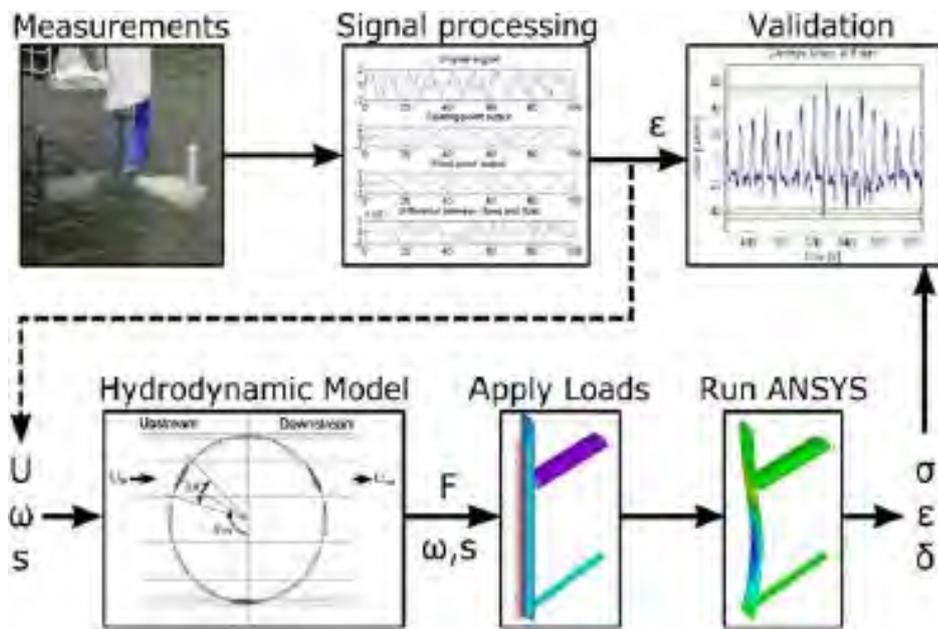
Dari hasil penelitian *G. Bedon, M. Raciti Castelli, E. Benini, 2012*, didapatkan kesimpulan bahwa pengaruh soliditas pada rotor terhadap kinerja dari VAWT tiga berbilah dari 2 m diameter telah diteliti dengan memvariasikan panjang chord di kisaran 0,15-0,30 m. Dari analisis kurva daya rotor yang dihasilkan, dapat diturunkan bahwa nilai yang rendah dari soliditas rotor yang mengarah ke produksi yang lebih tinggi dan turbin lebih terkendali. Di sisi lain, kecepatan sudut yang optimal lebih tinggi, yang menyebabkan kendala struktural yang lebih konsisten. Mengingat dua kecenderungan yang berlawanan (peningkatan rotasi kecepatan dan peningkatan produksi listrik), konfigurasi trade-off harus lebih dipilih untuk digunakan, karena untuk mendapatkan efisiensi tinggi pada aerodinamis dan kemudahan kontrol rotor, serta mengurangi beban struktur konstruksi pada baling-baling.

Stefan Mieras, Turaj Ashuri, Peter Scheijgrond, Gerard Bussel, 2010, melakukan penelitian pengkajian pada novel turbine, dimana penelitiannya menyajikan sistem energi laut baru yang mengintegrasikan konsep vertikal dan

horizontal turbin dengan menggabungkan Darrieus dan Wells Jenis rotor. Banyak konsep pada model yang menjelaskan hidrodinamik, struktur dan kontrol yang diperlukan untuk menentukan kelayakan teknis dan ekonomis tersebut. Dengan penggunaan beberapa teori streamtube ganda, model hidrodinamika dikembangkan untuk memprediksi kinerja dan beban pada bilah turbin ditambah dengan model finite elemen untuk menghitung strain dan stress. Untuk memvalidasi model, digunakan sebagai data dari pengukuran regangan lapangan dari prototipe demo. Model divalidasi digunakan untuk menghitung tekanan ekstrim dan menghitung umur kelelahan. Model ini memberikan perkiraan diandalkan tekanan dan kelelahan. Dengan hasil ini, analisis desain pisau turbin dapat dioptimalkan untuk kondisi situs dan diharapkan waktu hidup.



Gambar 2.6 Model finite elemen pada garrieus dan wells
(sumber: Stefan Mieras, Turaj Ashuri, Peter Scheijgrond, Gerard Bussel, 2010)



Gambar 2.7 Validasi pada model komputasi pengukuran data
(sumber: Stefan Mieras, Turaj Ashuri, Peter Scheijgrond, Gerard Bussel, 2010)

Kesimpulan yang dapat ditarik dari penelitian ini adalah bahwa kondisi operasi maksimum untuk saat turbin C-Energy telah diperkirakan menggunakan distribusi Weibull dari kecepatan arus air ditunjukkan pada titik fatigue. Bagian utama dari kerusakan kelelahan disebabkan oleh kecepatan arus air yang lebih tinggi yang akan terjadi hanya beberapa kali per tahun. Meskipun itu menunjukkan bahwa beban fatigue harus mendapat prioritas khusus dalam hal desain, oleh karena itu masih merupakan pertimbangan desain yang penting dan tidak dapat diabaikan. Untuk analisis beban ekstrim rotor, dapat diamati pada tekanan yang masih di bawah tegangan luluh bahan, mencegah blade dari kegagalan dengan menggunakan faktor keamanan yang tinggi.

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram alir proses penelitian

Untuk mencapai tujuan dari penelitian ini menggunakan uji eksperimental dimana terdiri dari beberapa tahapan proses antara lain adalah:

1. Desain model

Dalam desain model dilakukan secara perhitungan numerik dalam menentukan dimensi dari model uji. Adapun hasil dari perhitungan untuk dimensi dari model uji (turbin kombinasi wells dan darrieus) adalah sebagai berikut; untuk wells rotor, type foil NACA 0021 diameter 0,910 m ditambah dengan diameter darrieus menjadi 1,04 m, jumlah bilah 6 buah, panjang chord 0,180 m dengan solidity 0,62 dan untuk turbin darrieus menggunakan type foil NACA 0021, diameter 1,04 m, panjang chord 0,083 m, panjang 0,980 m, jumlah bilah 3 dengan solidity 0,41. Data sekunder merupakan data yang didapat dari kolam uji, seperti data gelombang (tinggi dan periode) yang sanggup dibangkitkan oleh pembangkit gelombang, kedalaman dan data alat-alat ukur yang digunakan.

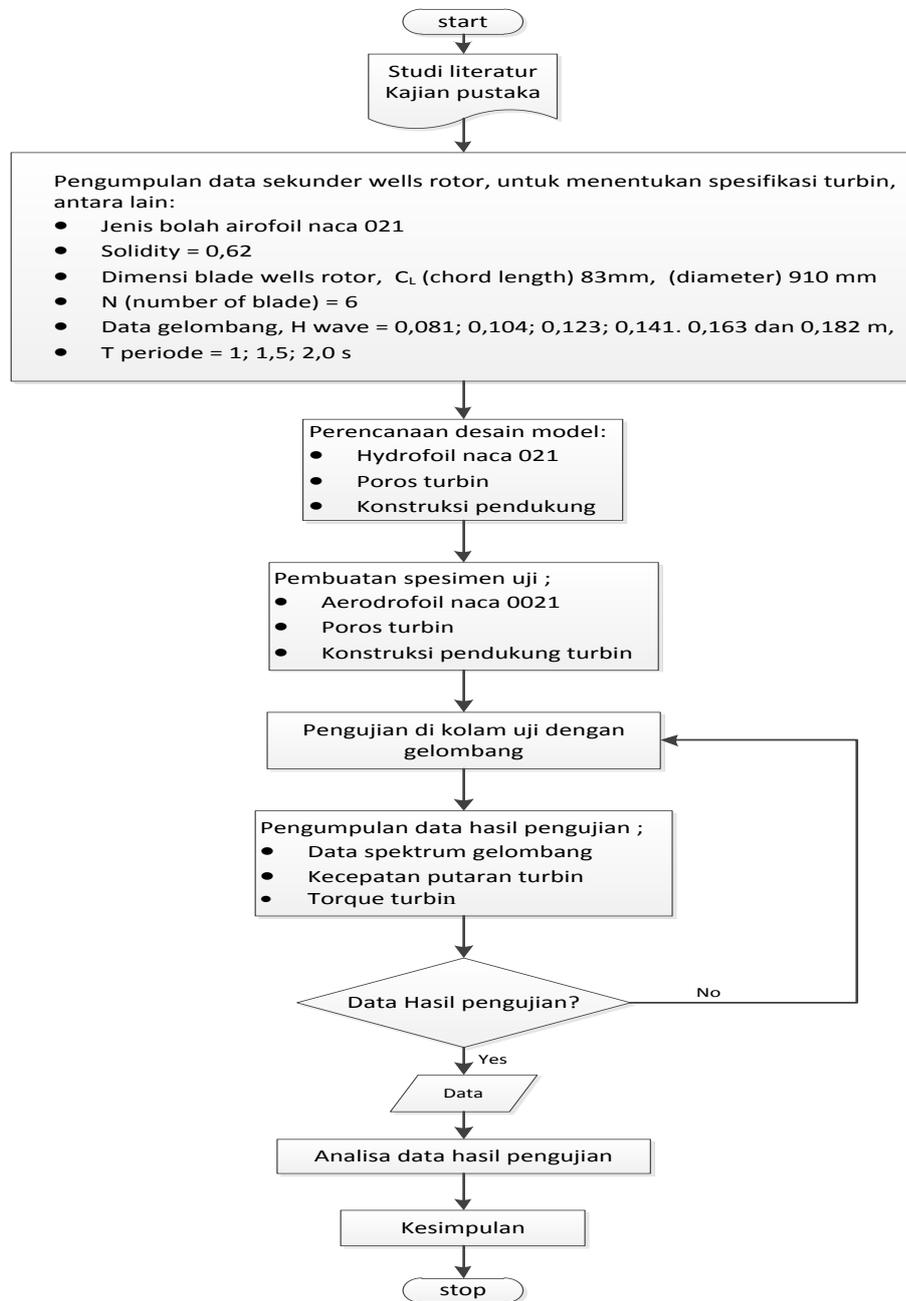
2. Proses fabrikasi model turbin

Proses fabrikasi meliputi perencanaan pemilihan material yang akan digunakan dalam pembuatan turbin, proses fabrikasi, proses assembly dan proses finishing.

3. Proses pengujian

Proses pengujian dilakukan di kolam uji dengan gelombang buatan yang dibangkitkan oleh pembangkit gelombang dengan variasi tinggi gelombang dan periode, serta pengambilan data uji berupa data gelombang yang terukur, putaran turbin dan fenomena yang terjadi turbin akibat terkena gelombang.

Berikut ini adalah diagram alir (gambar 3.1) dari proses penelitian turbin kombinasi wells dan darrieus serta membandingkan dengan hasil wells rotor itu sendiri dengan metode uji eksperimental skala laboratorium.



Gambar 3.1 Diagram alir penelitian

3.2 Studi Literatur

Dalam menunjang penelitian ini maka diperlukan beberapa literatur pendukung yang akan digunakan sebagai landasan teori. Adapun landasan teori yang dibutuhkan adalah sebagai berikut:

- a. Teori gelombang
- b. Teori konversi energi gelombang
- c. Teori turbin dengan wells rotor
- d. Teori hydrofoil
- e. Teori gaya-gaya pada hydrofoil
- f. Jurnal pendukung dengan topik wells rotor
- g. Paten pendukung

3.3 Pengumpulan Data Sekunder

3.3.1 Pengumpulan data dari kolam uji

Rencana pengujian akan dilakukan di kolam uji Manouvering Ocean Basin (MOB) Laboratorium Hidrodinamika Indonesia - BPPT, dimana kolam uji tersebut mempunyai pembangkit gelombang (*wave generator*). Hal ini dipilih karena kolam uji tersebut bisa mensimulasikan gelombang laut yang sebenarnya dengan skala laboratorium.

Dalam sebuah perencanaan desain turbin skala laboratorium, hal yang menjadi pertimbangan adalah besarnya energi yang dapat dihasilkan oleh gelombang buatan yang dibangkitkan oleh pembangkit gelombang pada kolam uji. Karena hal tersebut akan digunakan dalam menentukan desain awal untuk dimensi turbin yang akan dibuat, sehingga turbin yang dibuat sesuai dengan spesifikasi kolam uji. Serta dilakukan perhitungan awal dalam menentukan pada spesifikasi kolam yang akan digunakan saat pengujian. Adapun data-data yang diperoleh dari hasil pengukuran adalah sebagai berikut:

- a. Kedalaman kolam uji 1,2 m.
- b. Tinggi gelombang buatan 0,16 m.
- c. Periode gelombang 1 s sampai dengan 2,0 s.

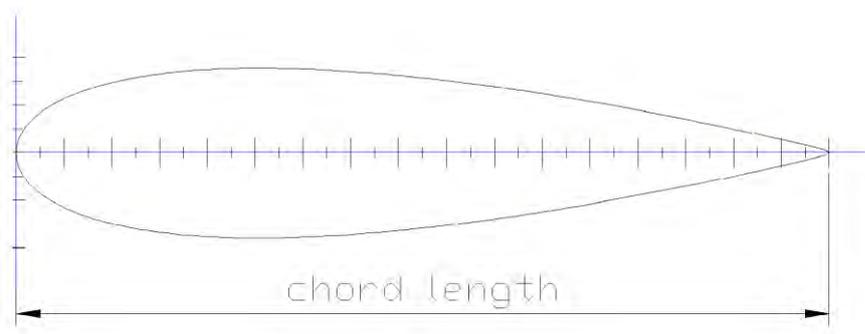
Sedangkan data-data hasil perhitungan dalam perencanaan desain turbin adalah sebagai berikut:

- a. Panjang gelombang
- b. Amplitudo gelombang
- c. Frekwensi gelombang
- d. Cepat rambat gelombang
- e. Kelompok kecepatan gelombang

3.3.2 Pengumpulan data spesifikasi turbin

Pengumpulan data ini dilakukan dari hasil kajian literatur dan perhitungan, sehingga didapatkan data-data utama turbin wells rotor sebagai berikut :

- a. Melakukan perhitungan awal akan kemampuan kolam uji dalam menghasilkan energi gelombang. Adapun hasil perhitungan tersebut adalah sebagai berikut
- b. Jenis hydrofoil NACA 021
- c. Solidity turbin = 0,62
- d. Ukuran utama wells rotor, panjang chord = 83 mm, diameter = 910 mm
- e. Jumlah sudu 6 buah
- f. Spektrum gelombang dengan tinggi gelombang 0,08; 0,104; 0,123; 0,141; 0,163 dan 0,182 m dengan variasi frekwensi periode gelombang (gelombang panjang dan gelombang pendek).



Gambar 3.2 Bentuk kontur aerofoil naca 0021

3.4 Perencanaan Desain

Berdasarkan data-data sekunder yang diperoleh, dilakukan perencanaan desain turbin wells rotor ini dengan menggunakan software AUTOCAD 2010, antara lain:

- a. Pembuatan gambar desain wells rotor
- b. Pembuatan gambar komponen-komponen pendukung
- c. Pembuatan gambar konstruksi untuk pengujian

3.5 Pembuatan Spesimen Uji

Pembuatan spesimen uji dan komponen pendukung untuk diaplikasikan pada saat pengujian di kolam uji, adapun komponen tersebut antara lain:

3.5.1 Wells rotor blade

Blade turbin wells rotor dengan type NACA 021 jumlah 6 buah, menggunakan bahan fibreglass dengan proses cetak.



Gambar 3.3 *Wells rotor blade type aerofoil naca 0021*

3.5.2 Darrieus turbine blade

Sama seperti *blade wells rotor*, *darrieus turbine blade* juga dengan type NACA 021 jumlah 3 buah, menggunakan bahan fibreglass dengan proses cetak.



Gambar 3.4 *Darrieus turbine blade type aerofoil naca 0021*

3.5.3 Hub

Hub dibuat dengan bahan teflon yang terdiri 2 buah, antara lain hub bagian atas yang digunakan sebagai penumpu *radial arm wells rotor* dan *darrieus turbine*, sedangkan pada bagian bawah sebagai penumpu *radial arm darrieus turbine*.



Gambar 3.5 *Hub turbin*

3.5.4 poros turbin

Poros turbin, dengan menggunakan bahan pipa diameter 1,25' dan pada masing-masing ujung dihubungkan dengan baja AS SS40 diameter 40 mm dengan panjang total 1150 mm. Dengan proses machining dan finishing dengan pengecatan.



Gambar 3.6 Poros turbin

3.5.5 Frame turbin

Konstruksi frame yang digunakan dudukan turbin wells rotor, terbuat dari bahan profil siku 40x40x4 baja ST 41 penyambungan proses pengelasan dengan finishing pengecatan.



Gambar 3.7 Frame dan Poros turbin

3.5.6 Bantalan

Bantalan poros menggunakan type taper bearing dan ball bearing dengan diameter dalam 30 mm dan diameter luar 60 mm.



Gambar 3.8 Bearing

3.5.7 Lengan Radial arm

Radial arm dibuat dengan bahan dari pipa galvanis diameter $\frac{1}{2}$ ', dan pada masing-masing ujung dihubungkan dengan baja AS SS40 diameter 40 mm dengan proses machining dan finishing dengan pengecatan. Radial arm dibagi menjadi dua yaitu bagian atas untuk penumpu wells rotor 6 buah dan bagian bawah untuk penumpu darrieus turbine blade



Gambar 3.9 *Radial arm*

3.5.8 Penumpu darrieus turbine blade

Penumpu blade merupakan dudukan dari poros blade yang berfungsi sebagai engsel dan juga stopper dari gerakan blade. Adapun bahan yang digunakan adalah teflon, dengan proses machining, dengan jumlah 6 buah untuk bagian atas dan bawah.



Gambar 3.10 Penumpu blade

3.5.9 Assembly

Proses assembly adalah perangkaian seluruh komponen yang telah dibuat menjadi satu kesatuan menjadi bentuk turbin yang utuh. Sebelum dilakukan proses pengujian dilakukan uji performance untuk mengetahui setiap komponen dalam keadaan berfungsi dengan baik.



Gambar 3.11 *Darrieus turbine dan wells rotor*

3.6 Persiapan pengujian

3.6.1 Penimbangan tiap-tiap komponen

Penimbangan ini dilakukan untuk mengetahui berat dari masing-masing komponen sehingga pada saat turbin berputar tidak terlalu dipengaruhi oleh berat masing-masing komponen karena ketidakseragaman yang terlalu jauh.



Gambar 3.12 Proses penimbangan masing-masing komponen turbin

3.6.2 Kalibrasi torquemeter

Menurut ISO/IEC Guide 17025:2005 dan Vocabulary of International Metrology (VIM), kalibrasi adalah kegiatan yang menghubungkan nilai yang ditunjukkan oleh instrument(alat) ukur atau nilai yang diwakili oleh bahan ukur dengan nilai-nilai yang sudah diketahui tingkat kebenarannya (yang berkaitan dengan besaran yang diukur) dalam kondisi tertentu.



Gambar 3.13 *Torquemeter* dan proese kalibrasi

3.6.3 Persiapan alat-alat yang digunakan dalam pengujian

Dalam pengujian yang akan dilakukan memerlukan beberapa alat ukur untuk mengetahui besaran atau nilai yang akan diperoleh saat pengujian. Adapun alat-alat ukur yang digunakan antara lain adalah:

a. *Wave high Spectrum (WHS)*

Wave high Spectrum (WHS) adalah alat ukur gelombang, dimana alat tersebut berupa sensor yang kan dihubung dengan monitor untuk mengetahui spektrum gelombang yang terjadi.



Gambar 3.14 *Wave High pectrumS sensor*

b. *Tachometer*

Tachometer adalah alat ukur putaran, yang mana akan digunakan untuk mengetahui putaran yang terjadi pada turbin saat pengujian berlangsung.



Gambar 3.15 *Tachometer*

c. *Currentmeter*

Currentmeter adalah alat ukur arus air atau gerak air yang horisontal.



Gambar 3.16 *Currentmeter*

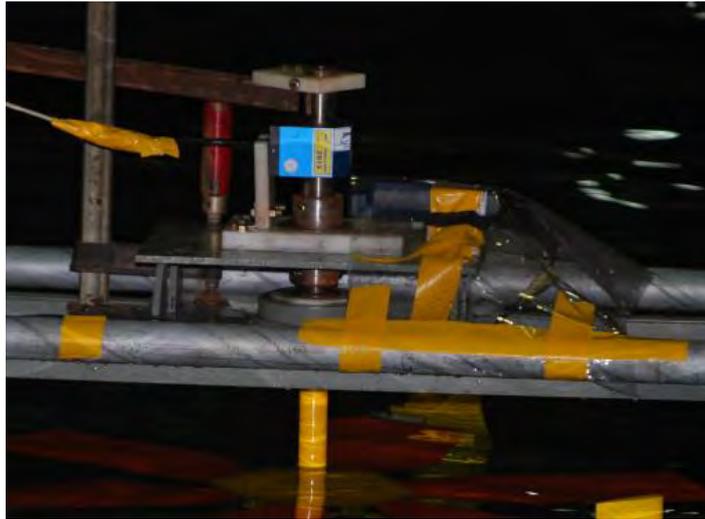
d. *Visual camera*

Visual camera digunakan untuk mendokumentasikan proses pengujian dan juga digunakan untuk pengamatan secara visual seluruh kejadian atau fenomena yang terjadi pada saat pengujian berlangsung dimana fenomena-fenomena tersebut tidak tertangkap oleh indra penglihatam kita.

3.6.4 Persiapan kolam uji

Sebelum dilakukan pengujian terlebih dulu dilakukan persiapan kolam, yang mana meliputi:

- a. Penempatan alat ukur gelombang (WHS).
- b. Penentuan spektrum gelombang yang akan digunakan dalam pengujian.
- c. Pemasangan alat-alat ukur yang terletak menjadi satu dengan turbin.
- d. Penentuan posisi turbin yang akan diuji.
- e. Pengukuran level air kolam.
- f. Pemasangan monitor untuk merekam hasil pengujian.



Gambar 3.17 Persiapan pengujian pemasangan alat ukur

3.7 Pengujian di Kolam Uji dengan Gelombang

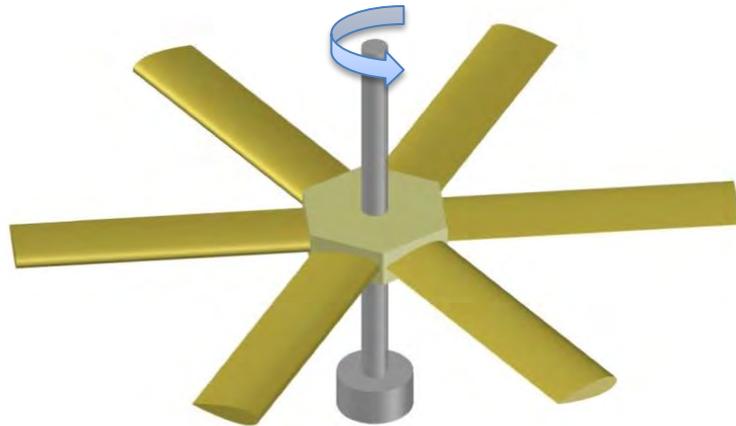
Pengujian dilakukan dengan beberapa konfigurasi, antara lain:

a. Konfigurasi 1

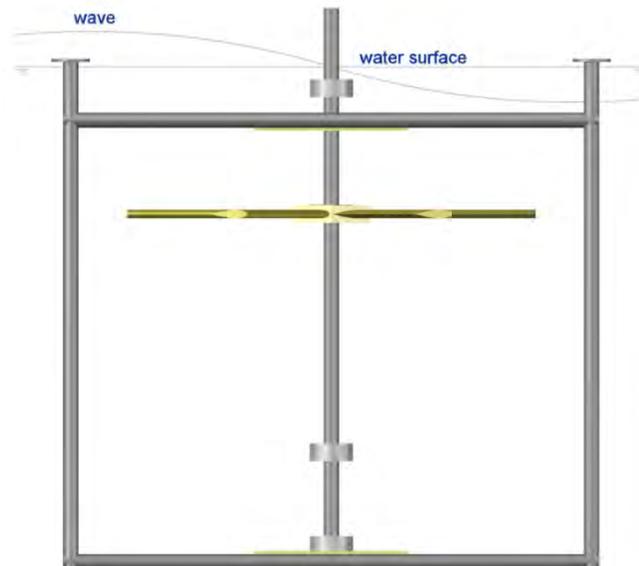
Spesimen uji hanya berupa wells rotor yang tidak dikoneksikan dengan turbin darrieus.



Gambar 3.18 pengujian wells rotor



Gambar 3.19 Pengujian konfigurasi 1 wells rotor dan arah putaran



Gambar 3.20 Posisi water level saat pengujian konfigurasi 1

spesifikasi gelombang yang digunakan dalam pengujian

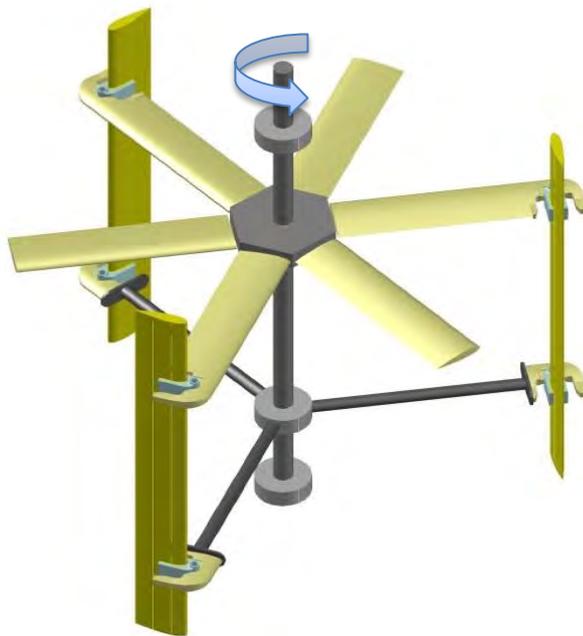
kedalaman d (m)	:	1,2				
Tinggi Gelombang H (m)	:	0,081	0,104	0,123	0,141	0,182
Periode T (s)	:	1,0	1,5	2,0		

b. Konfigurasi 2

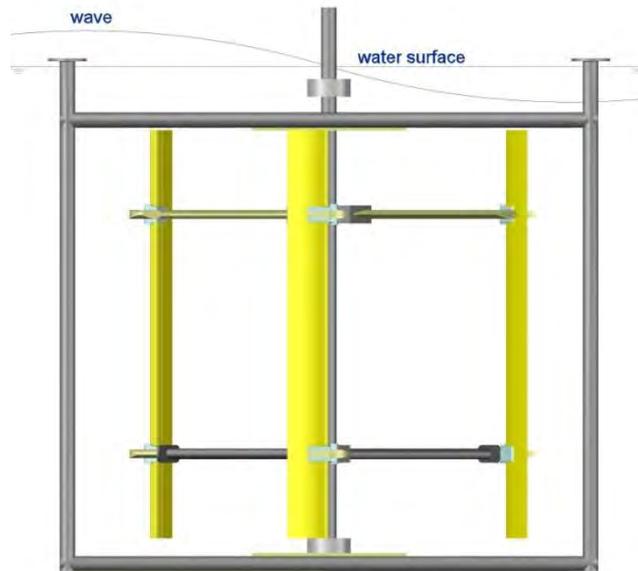
Spesimen uji berupa wells rotor yang sudah dikoneksikan dengan turbin darrieus.



Gambar 3.21 Pengujian turbin kombinasi wells dan darrieus



Gambar 3.22 arah putaran kombinasi wells rotor dan turbin darrieus



Gambar 3.23 konfigurasi 2 saat pengujian kombinasi wells rotor dan turbin darrieus

spesifikasi gelombang yang digunakan dalam pengujian

kedalaman d (m)	:	1,2				
Tinggi Gelombang H (m)	:	0,081	0,104	0,123	0,141	0,182
Periode T (s)	:	1,0	1,5	2,0		

c. Konfigurasi 3

Spesimen uji berupa turbin type darrieus tanpa dikoneksikan dengan wells rotor.



Gambar 3.24 konfigurasi 3 saat pengujian turbin darrieus

spesifikasi gelombang yang digunakan dalam pengujian

kedalaman d (m)	:	1,2				
Tinggi Gelombang H (m)	:	0,081	0,104	0,123	0,141	0,182
Periode T (s)	:	1,0	1,5	2,0		

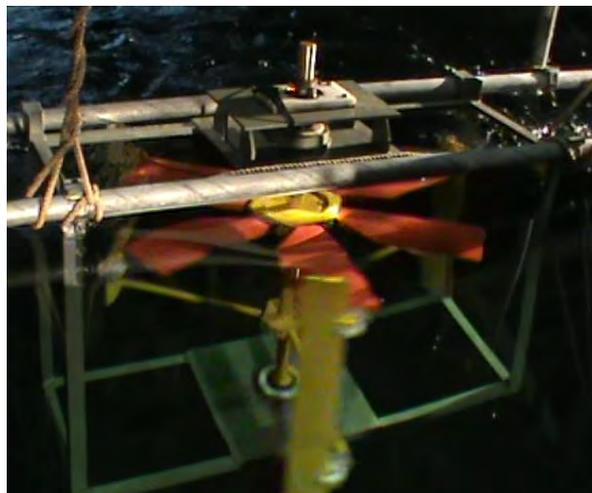
3.8 Validasi Uji Turbin dengan Arus

Uji dengan arus dilakukan di kolam uji Towing Tank, dalam uji model turbin dengan arus dilakukan dengan menarik turbin dengan kecepatan tertentu sebagai pengganti kecepatan arus. Jadi didalam pengujian ini turbin yang akan ditarik dengan carriage sedangkan fluidanya dalam kondisi diam.

Adapun kecepatan yang digunakan dalam uji turbin dengan arus adalah 0,2 m/s sampai dengan 1,4 m/s pada kedalaman 1,2 m dengan beberapa konfigurasi seperti pada uji dengan gelombang.



Gambar 3.25 konfigurasi 1 saat pengujian wells rotor dengan arus



Gambar 3.26 konfigurasi 2 saat pengujian wells rotor dan turbin darrieus dengan arus

3.9 Validasi Uji Generator

Validasi uji generator dilakukan untuk mengetahui hubungan putaran dengan tegangan, arus dan daya pada keadaan yang sebenarnya. Adapun spesifikasi dari generator adalah :

- a. Permanent magnet generator merk GINLONG
- b. Type GL-PMG-1000, buatan China
- c. Power output 1000 w
- d. Putaran maksimal 450 rpm



Gambar 3.27 Validasi generator

BAB IV

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

4.1 Data Hasil Penelitian

4.1.1 Data gelombang pengujian

Gelombang adalah faktor yang utama dalam konversi energi gelombang, karena gelombang sebagai inputan energi pada pengujian kombinasi wells rotor dan turbin darrieus dalam konversi energi gelombang. Dalam pengujian ini gelombang dibangkitkan oleh *wave generator* untuk menghasilkan gelombang uji yang diinginkan untuk menggerakkan/memutar turbin.

Inputan data dalam pembangkitan gelombang belum tentu mendapatkan hasil output spektrum gelombang sesuai dengan inputan data. Oleh karena itu perlu dilakukan validasi gelombang dengan menggunakan alat ukur gelombang WHS (*wave high spectrum*). Inputan data gelombang uji meliputi tinggi gelombang H, periode gelombang T dan faktor.

Adapun inputan data pada wave generator dan hasil validasi gelombang yang terbentuk sebenarnya adalah sebagai berikut (tabel 4.1), pada gelombang 1 inputan data $H=0,080\text{m}$ dan $T=1,5\text{s}$ dengan faktor 0,75 diperoleh hasil validasi gelombang $H=0,081\text{m}$ dan $T=1,5\text{s}$, gelombang 2a inputan data $H=0,100\text{m}$ dan $T=1,0\text{s}$ dengan faktor 0,75 diperoleh hasil validasi gelombang $H=0,102\text{m}$ dan $T=1,0\text{s}$, gelombang 2b inputan data $H=0,100\text{m}$ dan $T=1,5\text{s}$ dengan faktor 0,75 diperoleh hasil validasi gelombang $H=0,104\text{m}$ dan $T=1,5\text{s}$, gelombang 2c inputan data $H=0,100\text{m}$ dan $T=2,0\text{s}$ dengan faktor 0,75 diperoleh hasil validasi gelombang $H=0,100\text{m}$ dan $T=2,0\text{s}$, gelombang 3a inputan data $H=0,120\text{m}$ dan $T=1,0\text{s}$ dengan faktor 0,75 diperoleh hasil validasi gelombang $H=0,124\text{m}$ dan $T=1,0\text{ s}$, gelombang 3b inputan data $H=0,120\text{m}$ dan $T=1,5\text{s}$ dengan faktor 0,75 diperoleh hasil validasi gelombang $H=0,123\text{m}$ dan $T=1,5\text{ s}$, gelombang 3c inputan data $H=0,120\text{m}$ dan $T=2,0\text{s}$ dengan faktor 0,75 diperoleh hasil validasi gelombang

H=0,119m dan T=2,0s, gelombang 4a inputan data H=0,140m dan T=1,0s dengan faktor 0,75 diperoleh hasil validasi gelombang H=0,143m dan T=1,0s, gelombang 4b inputan data H=0,140m dan T=1,5s dengan faktor 0,75 diperoleh hasil validasi gelombang H=0,141m dan T=1,5s, gelombang 4c inputan data H=0,140m dan T=2,0s dengan faktor 0,75 diperoleh hasil validasi gelombang H=0,141m dan T=2,0s, gelombang 5 inputan data H=0,160m dan T=1,5s dengan faktor 0,75 diperoleh hasil validasi gelombang H=0,163m dan T=1,5s, dan gelombang 6 inputan data H=0,180m dan T=1,5s dengan faktor 0,75 diperoleh hasil validasi gelombang H=0,182m dan T=1,5s.

Tabel 4.1 Hasil validasi gelombang pengujian

gelombang	Data Input			Hasil Validasi	
	Tinggi, H (m)	Periode, T (s)	Faktor	Tinggi, H (m)	Periode, T (s)
1	0,080	1,5	0,75	0,081	1,5
2a	0,100	1,0	0,75	0,102	1,0
2b	0,100	1,5	0,75	0,104	1,5
2c	0,100	2,0	0,75	0,100	2,0
3a	0,120	1,0	0,75	0,124	1,0
3b	0,120	1,5	0,75	0,123	1,5
3c	0,120	2,0	0,75	0,119	2,0
4a	0,140	1,0	0,75	0,143	1,0
4b	0,140	1,5	0,75	0,141	1,5
4c	0,140	2,0	0,75	0,141	2,0
5	0,160	1,5	0,75	0,163	1,5
6	0,180	1,5	0,75	0,182	1,5

4.1.2 Data putaran turbin yang dihasilkan dengan variasi periode

Tujuan dari penentuan periode gelombang ini adalah untuk mendapatkan periode gelombang yang optimum dalam menghasilkan putaran turbin yang maksimal. Dengan memvariasikan beberapa tinggi gelombang dan periode maka didapatkan beberapa data hasil putaran dari turbin, adapun data putaran yang dihasilkan adalah sebagai berikut (tabel 4.2), pada tinggi gelombang H=0,102m, periode T=1,0s dan putaran turbin yang dihasilkan 1,8rpm, tinggi gelombang H=0,104m, periode T=1,5s dan putaran turbin yang dihasilkan 5,6rpm, tinggi

gelombang $H=0,100\text{m}$, periode $T=2,0\text{s}$ dan turbin tidak berputar, tinggi gelombang $H=0,124\text{m}$, periode $T=1,0\text{s}$ dan putaran turbin yang dihasilkan $4,1\text{rpm}$, tinggi gelombang $H=0,123\text{m}$, periode $T=1,5\text{s}$ dan putaran turbin yang dihasilkan $8,6\text{rpm}$, tinggi gelombang $H=0,119\text{m}$, periode $T=2,0\text{s}$ dan turbin tidak berputar, tinggi gelombang $H=0,143\text{m}$, periode $T=1,0\text{s}$ dan putaran turbin yang dihasilkan $5,3\text{rpm}$, tinggi gelombang $H=0,141\text{m}$, periode $T=1,5\text{s}$ dan putaran turbin yang dihasilkan $10,0\text{rpm}$, dan pada tinggi gelombang $H=0,141\text{m}$, periode $T=2,0\text{s}$ dan turbin tidak berputar. Maka hasil penentuan periode gelombang yang optimum dalam menghasilkan putaran turbin yang maksimal, adalah periode gelombang ditentukan **1,5s**.

Tabel 4.2 Putaran yang dihasilkan turbin dengan variasi tinggi dan periode gelombang

<i>Tinggi, H (m)</i>	<i>Periode, T (s)</i>	<i>Putaran, n (rpm)</i>
0,102	1,0	1,8
0,104	1,5	5,6
0,100	2,0	0
0,124	1,0	4,1
0,123	1,5	8,6
0,119	2,0	0
0,143	1,0	5,3
0,141	1,5	10,0
0,141	2,0	0

4.1.3 Data putaran turbin dan torsi pada pengujian gelombang

Dari hasil penentuan periode gelombang yang optimum dalam menghasilkan putaran turbin, maka periode gelombang ditentukan 1,5s. Dengan memvariasikan tinggi gelombang dan periode yang telah ditentukan kemudian dilakukan pengambilan data putaran turbin dan torsi yang dihasilkan.

Dengan periode gelombang 1,5s dan memvariasikan tinggi gelombang maka dihasilkan data putaran turbin dan torsi yang diperoleh dari pengujian masing-masing turbin kombinasi *wells dan darrieus (konfigurasi 1)* sebagai berikut (tabel 4.3), pada tinggi gelombang $H=0,081\text{m}$ menghasilkan putaran $3,6\text{rpm}$ dan torsi $0,5\text{Nm}$, pada tinggi gelombang $H=0,104\text{m}$ menghasilkan putaran

5,6rpm dan torsi 0,93Nm, pada tinggi gelombang $H=0,123\text{m}$ menghasilkan putaran 8,6rpm dan torsi 1,28Nm, pada tinggi gelombang $H=0,141\text{m}$ menghasilkan putaran 10rpm dan torsi 1,48Nm, pada tinggi gelombang $H=0,163\text{m}$ menghasilkan putaran 11,2rpm dan torsi 1,64Nm, dan pada tinggi gelombang $H=0,182\text{m}$ untuk turbin menghasilkan putaran 12rpm dan torsi 1,76Nm.

Sedangkan data putaran turbin dan torsi yang diperoleh dari hasil pengujian *wells rotor (konfigurasi 2)* sebagai berikut (tabel 4.3), pada tinggi gelombang $H=0,081\text{m}$ menghasilkan putaran 4,4rpm dan torsi 0,4Nm, pada tinggi gelombang $H=0,104\text{m}$ menghasilkan putaran 8,3rpm dan torsi 0,77Nm, pada tinggi gelombang $H=0,123\text{m}$ menghasilkan putaran 10,7rpm dan torsi 1,07Nm, pada tinggi gelombang $H=0,141\text{m}$ menghasilkan putaran 11,4rpm dan torsi 1,32Nm, pada tinggi gelombang $H=0,163\text{m}$ menghasilkan putaran 12,3rpm dan torsi 1,45Nm, dan pada tinggi gelombang $H=0,182\text{m}$ untuk turbin menghasilkan putaran 13rpm dan torsi 1,61Nm.

Tabel 4.3 Putaran dan torsi yang dihasilkan dengan perbedaan tinggi gelombang

Tinggi, H (m)	putaran, n (rpm)		Torque, t (Nm)	
	Kombinasi	wells	kombinasi	wells
0,081	3,6	4,4	0,5	0,4
0,104	5,6	8,3	0,93	0,77
0,123	8,6	10,7	1,28	1,07
0,141	10	11,4	1,48	1,32
0,163	11,2	12,3	1,64	1,45
0,182	12	13	1,76	1,61

Sedangkan pada saat pengujian *turbin darrieus (konfigurasi 3)* dengan perbedaan gelombang tidak menghasilkan putaran turbin.

4.1.4 Data hasil validasi uji turbin dengan arus

Untuk mengetahui seberapa besar putaran turbin yang dihasilkan oleh adanya arus maka dilakukan pengujian turbin dengan inputan arus. Dalam

pengujian turbin dengan arus dibagi menjadi 3 konfigurasi seperti pada uji turbin dengan gelombang. Adapun data putaran yang diperoleh dari hasil pengujian turbin kombinasi *wells dan darrieus (konfigurasi 1)* dengan perbedaan kecepatan arus adalah sebagai berikut (tabel 4.4), pada kecepatan arus $v=0,2\text{m/s}$ menghasilkan putaran turbin $n=1,7\text{rpm}$, kecepatan arus $v=0,4\text{m/s}$ menghasilkan putaran turbin $n=6,4\text{rpm}$, kecepatan arus $v=0,6\text{m/s}$ menghasilkan putaran turbin $n=20,8\text{rpm}$, kecepatan arus $v=0,8\text{m/s}$ menghasilkan putaran turbin $n=31,8\text{rpm}$, kecepatan arus $v=1,0\text{m/s}$ menghasilkan putaran turbin $n=41,5\text{rpm}$, kecepatan arus $v=1,2\text{m/s}$ menghasilkan putaran turbin $n=49,1\text{rpm}$, dan kecepatan arus $v=1,4\text{m/s}$ menghasilkan putaran turbin $n=58,7\text{rpm}$.

Sedangkan data putaran yang diperoleh dari hasil pengujian turbin *darrieus (konfigurasi 3)* dengan perbedaan kecepatan arus adalah sebagai berikut (tabel 4.4), pada kecepatan arus $v=0,2\text{m/s}$ menghasilkan putaran turbin $n=2,3\text{rpm}$, kecepatan arus $v=0,4\text{m/s}$ menghasilkan putaran turbin $n=14,5\text{rpm}$, kecepatan arus $v=0,6\text{m/s}$ menghasilkan putaran turbin $n=27,3\text{rpm}$, kecepatan arus $v=0,8\text{m/s}$ menghasilkan putaran turbin $n=37,8\text{rpm}$, kecepatan arus $v=1,0\text{m/s}$ menghasilkan putaran turbin $n=47,2\text{rpm}$, kecepatan arus $v=1,2\text{m/s}$ menghasilkan putaran turbin $n=56,1\text{rpm}$, dan pada kecepatan arus $v=1,4\text{m/s}$ menghasilkan putaran turbin $n=64,3\text{rpm}$.

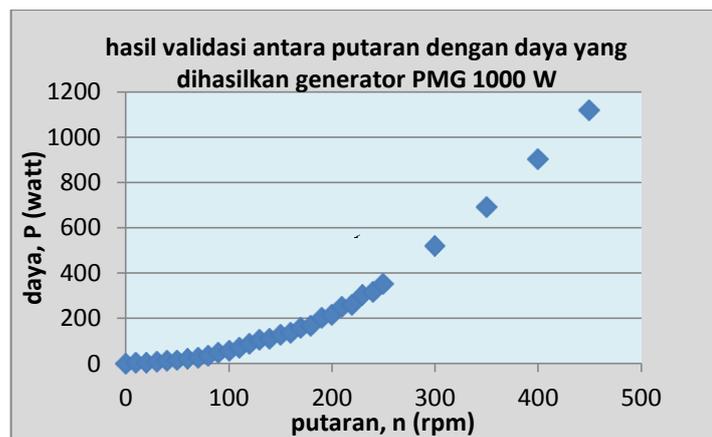
Tabel 4.4 Putaran yang dihasilkan dengan kecepatan arus

<i>kec. arus, v (m)</i>	<i>putaran, n (rpm)</i>		<i>Torque, t (Nm)</i>	
	<i>kombinasi</i>	<i>darrieus</i>	<i>kombinasi</i>	<i>darrieus</i>
0,2	1,7	2,3	1,77	1,29
0,4	6,4	14,5	3,84	1,76
0,6	20,8	27,3	4,38	3,25
0,8	31,8	37,8	6,94	5,52
1,0	41,5	47,2	9,85	8,76
1,2	49,1	56,1	14,31	12,62
1,4	58,7	64,3	18,32	16,91

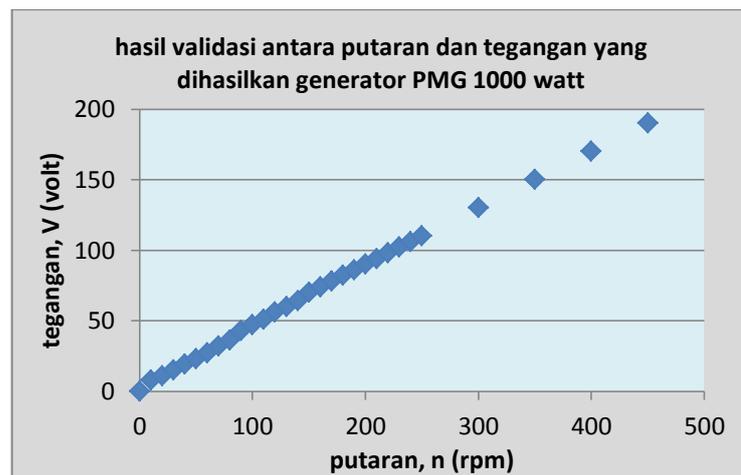
Sedangkan pada saat pengujian *wells rotor (konfigurasi 2)* dengan perbedaan kecepatan arus tidak menghasilkan putaran turbin.

4.1.5 Data validasi generator

Validasi generator dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui hubungan putaran dengan tegangan, daya dan kuat arus yang dihasilkan secara aktual. Pada validasi generator ini putaran divariasikan dari 10rpm sampai dengan 450rpm dengan menggunakan kontrol frekwensi sebagai pengatur putaran pada motor.



Gambar 4.1 Grafik hasil validasi antara putaran dan daya yang dihasilkan generator PMG 1000 watt



Gambar 4.2 Grafik hasil validasi antara putaran dan tegangan yang dihasilkan generator PMG 1000 watt

Adapun hasil validasi pengujian generator PMG 1000 watt adalah sebagai berikut, pada putaran $n=10\text{rpm}$ menghasilkan daya sebesar $P=2,5\text{watt}$ dengan tegangan $V=8\text{volt}$, putaran $n=20\text{rpm}$ menghasilkan daya sebesar $P=5,1\text{watt}$ dengan tegangan $V=11\text{volt}$, putaran $n=30\text{rpm}$ menghasilkan daya sebesar $P=7,0\text{watt}$ dengan tegangan $V=15\text{volt}$, putaran $n=40\text{rpm}$ menghasilkan daya sebesar $P=11,8\text{watt}$ dengan tegangan $V=19\text{volt}$, putaran $n=50\text{rpm}$ menghasilkan daya sebesar $P=14,3\text{watt}$ dengan tegangan $V=23\text{volt}$, putaran $n=60\text{rpm}$ menghasilkan daya sebesar $P=21,0\text{watt}$ dengan tegangan $V=27\text{volt}$, putaran $n=70\text{rpm}$ menghasilkan daya sebesar $P=25,6\text{watt}$ dengan tegangan $V=32\text{volt}$, putaran $n=80\text{rpm}$ menghasilkan daya sebesar $P=36,0\text{watt}$ dengan tegangan $V=36\text{volt}$, putaran $n=90\text{rpm}$ menghasilkan daya sebesar $P=47,3\text{watt}$ dengan tegangan $V=43\text{volt}$, putaran $n=100\text{rpm}$ menghasilkan daya sebesar $P=56,4\text{watt}$ dengan tegangan $V=47\text{volt}$, putaran $n=110\text{rpm}$ menghasilkan daya sebesar $P=71,6\text{watt}$ dengan tegangan $V=51\text{volt}$, putaran $n=120\text{rpm}$ menghasilkan daya sebesar $P=87,3\text{watt}$ dengan tegangan $V=56\text{volt}$, putaran $n=130\text{rpm}$ menghasilkan daya sebesar $P=102,9\text{watt}$ dengan tegangan $V=60\text{volt}$, putaran $n=140\text{rpm}$ menghasilkan daya sebesar $P=109,7\text{watt}$ dengan tegangan $V=64\text{volt}$, putaran $n=150\text{rpm}$ menghasilkan daya sebesar $P=125,9\text{watt}$ dengan tegangan $V=70\text{volt}$, putaran $n=160\text{rpm}$ menghasilkan daya sebesar $P=135,0\text{watt}$ dengan tegangan $V=74\text{volt}$, putaran $n=170\text{rpm}$ menghasilkan daya sebesar $P=158,1\text{watt}$ dengan tegangan $V=78\text{volt}$, putaran $n=180\text{rpm}$ menghasilkan daya sebesar $166,2\text{watt}$ dengan tegangan $V=82\text{volt}$, putaran $n=190\text{rpm}$ menghasilkan daya sebesar $P=201,1\text{watt}$ dengan tegangan $V=86\text{volt}$, putaran $n=200\text{rpm}$ menghasilkan daya sebesar $P=215,8\text{watt}$ dengan tegangan $V=90\text{volt}$, putaran $n=210\text{rpm}$ menghasilkan daya sebesar $P=249,1\text{watt}$ dengan tegangan $V=94\text{volt}$, putaran $n=220\text{rpm}$ menghasilkan daya sebesar $P=259,7\text{watt}$ dengan tegangan $V=98\text{volt}$, putaran $n=230\text{rpm}$ menghasilkan daya sebesar $P=302,1\text{watt}$ dengan tegangan $V=102\text{volt}$, putaran $n=240\text{rpm}$ menghasilkan daya sebesar $P=314,0\text{watt}$ dengan tegangan $V=106\text{volt}$, putaran $n=250\text{rpm}$ menghasilkan daya sebesar $P=351,7\text{watt}$ dengan tegangan $V=110\text{volt}$, putaran $n=300\text{rpm}$ menghasilkan daya sebesar $P=516,8\text{watt}$ dengan tegangan $V=130\text{volt}$, putaran $n=350\text{rpm}$ menghasilkan daya sebesar $P=689,8\text{watt}$ dengan tegangan $V=150\text{volt}$, putaran $n=400\text{rpm}$

menghasilkan daya sebesar $P=901,0\text{watt}$ dengan tegangan $V=170\text{volt}$, dan pada putaran $n=450\text{rpm}$ menghasilkan daya sebesar $P=1119,6\text{watt}$ dengan tegangan $V=190\text{volt}$.

4.2 Pembahasan Data Hasil Penelitian

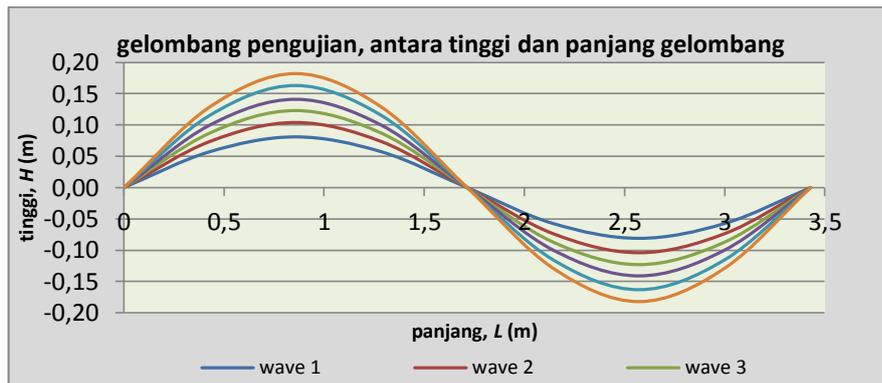
4.2.1 Pembahasan parameter-parameter pada gelombang pengujian

Setelah mendapatkan data dari hasil pengukuran dari *wave high spectrum* (*WHS*) pada gelombang pengujian dan kemudian dilakukan perhitungan untuk mengetahui komponen-komponen gelombang secara spesifik. Adapaun analisa data hasil perhitungan dengan data utama hasil pengukuran gelombang adalah sebagai berikut:

Tinggi, H	: 0,081m; 0,104m; 0,123m; 0,141m; 0,163m; 0,182m
Periode, T	: 1,5 s
Kedalaman, d	: 1,2 m
Panjang gelombang, L	: 3,429 m
Kecepatan rambat, C	: 2,286 m/s
Frekwensi, σ	: 0,667 /s
Wave number, k	: 1,831 /m

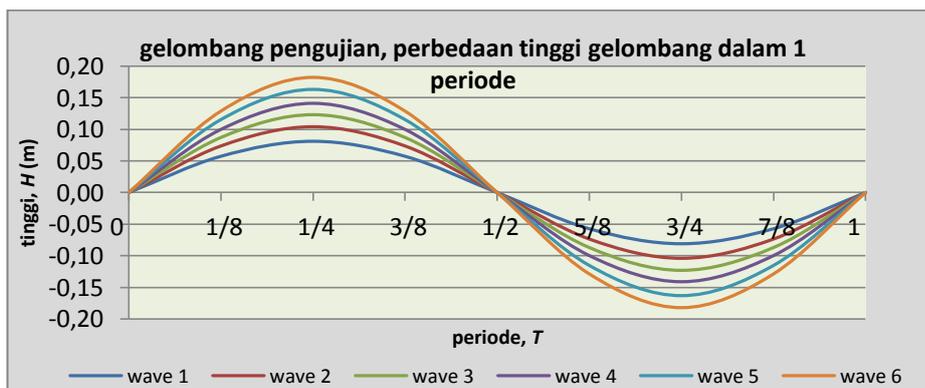
Dari hasil perhitungan tersebut diatas maka nilai Panjang gelombang (L), kecepatan rambat gelombang (C), *frekwensi* (σ), dan wave number (k) adalah sama meskipun dengan adanya perbedaan tinggi gelombang (H), karena semua itu dipengaruhi oleh periode gelombang (T) dan kedalaman (d) dan tidak dipengaruhi oleh tinggi gelombang (H).

Dari data gambar 4.3 yang diperoleh hasil pengukuran gelombang saat pengujian berlangsung dan setelah dilakukan analisa dengan perhitungan maka diketahui bahwa dalam pengujian menggunakan panjang gelombang yang sama dengan perbedaan masing-masing tinggi gelombang atau variasi pada tinggi gelombang. Dimana masing-masing tinggi gelombang yang digunakan saat pengujian adalah 0,081m; 0,104m; 0,123m; 0,141m; 0,163m dan 0,182m, sedangkan panjang gelombang sebesar 3,429m.



Gambar 4.3 Grafik sinusoidal gelombang pengujian antara tinggi dan panjang gelombang

Sedangkan pada gambar 4.4 dapat diketahui bahwa gelombang pengujian yang digunakan adalah dengan memvariasikan tinggi gelombang dalam 1 periode. Dimana masing-masing tinggi gelombang yang digunakan saat pengujian adalah 0,081m; 0,104m; 0,123m; 0,141m; 0,163m dan 0,182m, sedangkan periode nya sebesar 1,5s.

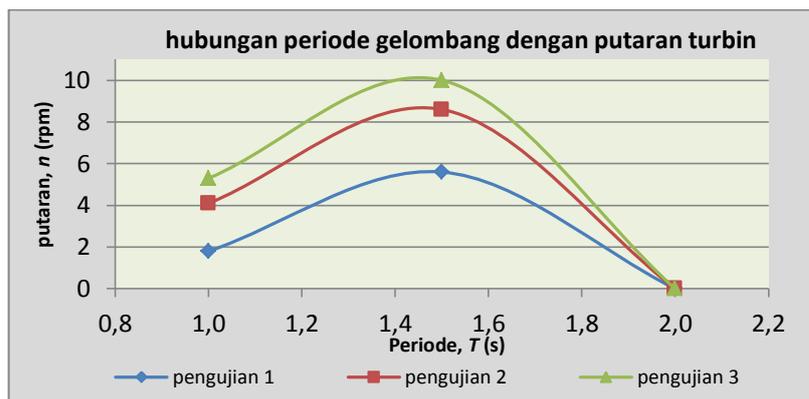


Gambar 4.4 Grafik sinusoidal gelombang pengujian Perbedaan tinggi gelombang dalam 1 periode

4.2.2 Pembahasan penentuan periode yang optimum

Dengan memvariasikan beberapa tinggi gelombang dan periode maka didapatkan beberapa data hasil putaran dari turbin, adapun data putaran yang dihasilkan adalah sebagai berikut, pada tinggi gelombang $H=0,102\text{m}$, periode $T=1,0\text{s}$ dan putaran turbin yang dihasilkan 1,8rpm, tinggi gelombang $H=0,104\text{m}$, periode $T=1,5\text{s}$ dan putaran turbin yang dihasilkan 5,6rpm, tinggi gelombang $H=0,100\text{m}$, periode $T=2,0\text{s}$ dan turbin tidak berputar, tinggi gelombang

H=0,124m, periode T=1,0s dan putaran turbin yang dihasilkan 4,1rpm, tinggi gelombang H=0,123m, periode T=1,5s dan putaran turbin yang dihasilkan 8,6rpm, tinggi gelombang H=0,119m, periode T=2,0s dan turbin tidak berputar, tinggi gelombang H=0,143m, periode T=1,0s dan putaran turbin yang dihasilkan 5,3rpm, tinggi gelombang H=0,141m, periode T=1,5s dan putaran turbin yang dihasilkan 10,0rpm, dan pada tinggi gelombang H=0,141m, periode T=2,0s dan turbin tidak berputar. Sehingga pemilihan periode (T) yang optimum dalam konversi energi gelombang yang digunakan sebagai inputan energi pada turbin kombinasi wells dan darrieus sebesar **1,5 detik**.



Gambar 4.5 Grafik hubungan antara perbedaan periode gelombang dan putaran turbin

4.2.3 Menentukan kecepatan horisontal dan vertikal dari partikel air

Kecepatan horisontal partikel air yang bergerak secara orbital akan selalu menurun sampai dengan kedalaman tertentu pada setiap tinggi gelombang yang sama. Komponen dari kecepatan horisontal dan vertikal partikel air (u dan w) dapat ditentukan berdasarkan persamaan sebagai berikut:

- Kecepatan horisontal partikel air

$$u = \frac{u}{x}$$

$$u = \left(\frac{\pi H}{T}\right) \frac{\cosh k(d+y)}{\sinh kd} \sin(kx - \sigma t)$$

- Kecepatan vertikal partikel air

$$w = \frac{w}{z}$$

$$w = \left(\frac{\pi H}{T} \right) \frac{\sinh k(d + y)}{\sinh kd} \sin(kx - \sigma t)$$

Hal tersebut dibuktikan dengan grafik gambar 4.6 dimana pada tinggi gelombang $H=0,081\text{m}$ dimana pada permukaan air $y=0\text{m}$ kecepatan horisontal partikel air $u=0,174\text{m/s}$, kedalaman dari permukaan air $y=0,1\text{m}$ kecepatan horisontal partikel air $u=0,145\text{m/s}$, kedalaman dari permukaan air $y=0,2\text{m}$ kecepatan horisontal partikel air $u=0,122\text{m/s}$, kedalaman dari permukaan air $y=0,3\text{m}$ kecepatan horisontal partikel air $u=0,103\text{m/s}$, kedalaman dari permukaan air $y=0,4\text{m}$ kecepatan horisontal partikel air $u=0,087\text{m/s}$, dan kedalaman dari permukaan air $y=0,5\text{m}$ kecepatan horisontal partikel air $u=0,074\text{m/s}$.

Pada tinggi gelombang $H=0,104\text{m}$ dimana pada permukaan air $y=0\text{m}$ kecepatan horisontal partikel air $u=0,223\text{m/s}$, kedalaman dari permukaan air $y=0,1\text{m}$ kecepatan horisontal partikel air $u=0,187\text{m/s}$, kedalaman dari permukaan air $y=0,2\text{m}$ kecepatan horisontal partikel air $u=0,157\text{m/s}$, kedalaman dari permukaan air $y=0,3\text{m}$ kecepatan horisontal partikel air $u=0,132\text{m/s}$, kedalaman dari permukaan air $y=0,4\text{m}$ kecepatan horisontal partikel air $u=0,112\text{m/s}$, dan kedalaman dari permukaan air $y=0,5\text{m}$ kecepatan horisontal partikel air $u=0,095\text{m/s}$.

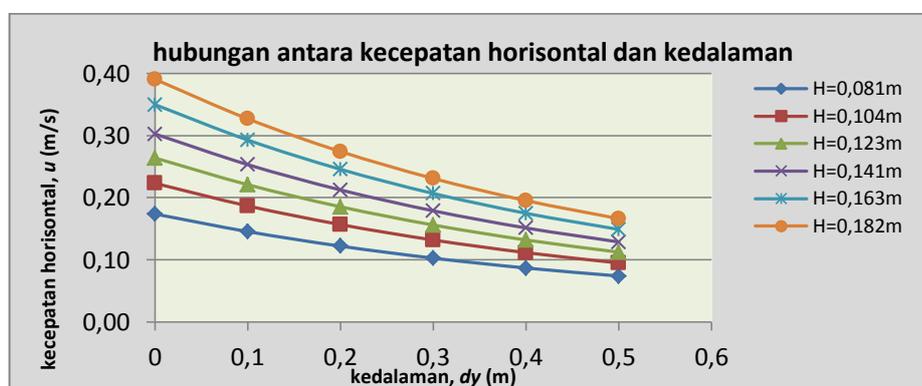
Pada tinggi gelombang $H=0,123\text{m}$ dimana pada permukaan air $y=0\text{m}$ kecepatan horisontal partikel air $u=0,264\text{m/s}$, kedalaman dari permukaan air $y=0,1\text{m}$ kecepatan horisontal partikel air $u=0,221\text{m/s}$, kedalaman dari permukaan air $y=0,2\text{m}$ kecepatan horisontal partikel air $u=0,185\text{m/s}$, kedalaman dari permukaan air $y=0,3\text{m}$ kecepatan horisontal partikel air $u=0,156\text{m/s}$, kedalaman dari permukaan air $y=0,4\text{m}$ kecepatan horisontal partikel air $u=0,132\text{m/s}$, dan kedalaman dari permukaan air $y=0,5\text{m}$ kecepatan horisontal partikel air $u=0,112\text{m/s}$.

Pada tinggi gelombang $H=0,141\text{m}$ dimana pada permukaan air $y=0\text{m}$ kecepatan horisontal partikel $u=0,303\text{m/s}$, kedalaman dari permukaan air $y=0,1\text{m}$ kecepatan horisontal partikel air $u=0,253\text{m/s}$, kedalaman dari permukaan air $y=0,2\text{m}$ kecepatan horisontal partikel air $u=0,213\text{m/s}$, kedalaman dari permukaan air $y=0,3\text{m}$ kecepatan horisontal partikel air $u=0,179\text{m/s}$, kedalaman dari

permukaan air $y=0,4\text{m}$ kecepatan horisontal partikel air $u=0,151\text{m/s}$, dan kedalaman dari permukaan air $y=0,5\text{m}$ kecepatan horisontal partikel air $u=0,129\text{m/s}$.

Pada tinggi gelombang $H=0,163\text{m}$ dimana pada permukaan air $y=0\text{m}$ kecepatan horisontal partikel air $u=0,350\text{m/s}$, kedalaman dari permukaan air $y=0,1\text{m}$ kecepatan horisontal partikel air $u=0,293\text{m/s}$, kedalaman dari permukaan air $y=0,2\text{m}$ kecepatan horisontal partikel air $u=0,246\text{m/s}$, kedalaman dari permukaan air $y=0,3\text{m}$ kecepatan horisontal partikel air $u=0,207\text{m/s}$, kedalaman dari permukaan air $y=0,4\text{m}$ kecepatan horisontal partikel air $u=0,175\text{m/s}$, dan kedalaman dari permukaan air $y=0,5\text{m}$ kecepatan horisontal partikel air $u=0,149\text{m/s}$.

Pada tinggi gelombang $H=0,182\text{m}$ dimana pada permukaan air $y=0\text{m}$ kecepatan horisontal partikel air $u=0,391\text{m/s}$, kedalaman dari permukaan air $y=0,1\text{m}$ kecepatan horisontal partikel air $u=0,327\text{m/s}$, kedalaman dari permukaan air $y=0,2\text{m}$ kecepatan horisontal partikel air $u=0,274\text{m/s}$, kedalaman dari permukaan air $y=0,3\text{m}$ kecepatan horisontal partikel air $u=0,231\text{m/s}$, kedalaman dari permukaan air $y=0,4\text{m}$ kecepatan horisontal partikel air $u=0,195\text{m/s}$, dan kedalaman dari permukaan air $y=0,5\text{m}$ kecepatan horisontal partikel air $u=0,166\text{m/s}$.



Gambar 4.6 Grafik hubungan antara kecepatan horisontal air dan perbedaan kedalaman

Dan untuk membuktikan kecepatan vertikal juga akan menurun pada setiap perbedaan kedalaman dengan grafik gambar 4.7 dimana pada tinggi gelombang $H=0,081\text{m}$ dimana pada permukaan air $y=0\text{m}$ kecepatan vertikal

partikel air $w=0,170\text{m/s}$, kedalaman dari permukaan air $y=0,1\text{m}$ kecepatan vertikal partikel air $w=0,140\text{m/s}$, kedalaman dari permukaan air $y=0,2\text{m}$ kecepatan vertikal partikel air $w=0,116\text{m/s}$, kedalaman dari permukaan air $y=0,3\text{m}$ kecepatan vertikal partikel air $w=0,095\text{m/s}$, kedalaman dari permukaan air $y=0,4\text{m}$ kecepatan vertikal partikel air $w=0,078\text{m/s}$, dan kedalaman dari permukaan air $y=0,5\text{m}$ kecepatan vertikal partikel air $w=0,063\text{m/s}$.

Pada tinggi gelombang $H=0,104\text{m}$ dimana pada permukaan air $y=0\text{m}$ kecepatan vertikal partikel air $w=0,218\text{m/s}$, kedalaman dari permukaan air $y=0,1\text{m}$ kecepatan vertikal partikel air $w=0,180\text{m/s}$, kedalaman dari permukaan air $y=0,2\text{m}$ kecepatan vertikal partikel air $w=0,149\text{m/s}$, kedalaman dari permukaan air $y=0,3\text{m}$ kecepatan vertikal partikel air $w=0,123\text{m/s}$, kedalaman dari permukaan air $y=0,4\text{m}$ kecepatan vertikal partikel air $w=0,100\text{m/s}$, dan kedalaman dari permukaan air $y=0,5\text{m}$ kecepatan vertikal partikel air $w=0,081\text{m/s}$.

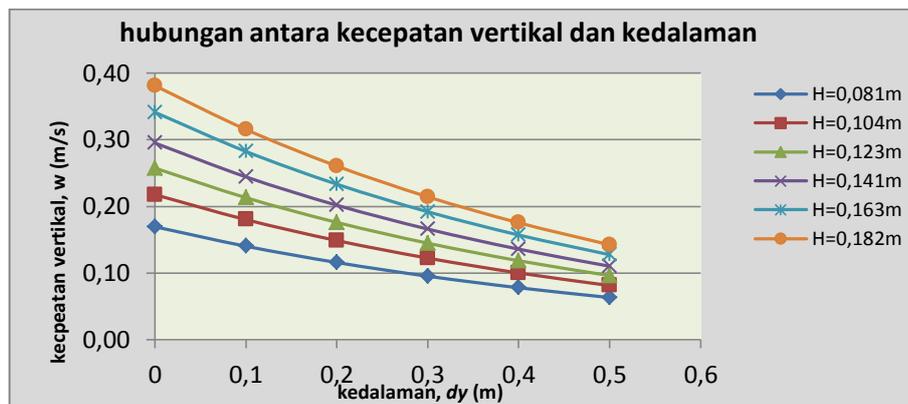
Pada tinggi gelombang $H=0,123\text{m}$ dimana pada permukaan air $y=0\text{m}$ kecepatan vertikal partikel air $w=0,257\text{m/s}$, kedalaman dari permukaan air $y=0,1\text{m}$ kecepatan vertikal partikel air $w=0,213\text{m/s}$, kedalaman dari permukaan air $y=0,2\text{m}$ kecepatan vertikal partikel air $w=0,176\text{m/s}$, kedalaman dari permukaan air $y=0,3\text{m}$ kecepatan vertikal partikel air $w=0,145\text{m/s}$, kedalaman dari permukaan air $y=0,4\text{m}$ kecepatan vertikal partikel air $w=0,119\text{m/s}$, dan kedalaman dari permukaan air $y=0,5\text{m}$ kecepatan vertikal partikel air $w=0,096\text{m/s}$.

Pada tinggi gelombang $H=0,141\text{m}$ dimana pada permukaan air $y=0\text{m}$ kecepatan vertikal partikel air $w=0,295\text{m/s}$, kedalaman dari permukaan air $y=0,1\text{m}$ kecepatan vertikal partikel air $w=0,244\text{m/s}$, kedalaman dari permukaan air $y=0,2\text{m}$ kecepatan vertikal partikel air $w=0,202\text{m/s}$, kedalaman dari permukaan air $y=0,3\text{m}$ kecepatan vertikal partikel air $w=0,166\text{m/s}$, kedalaman dari permukaan air $y=0,4\text{m}$ kecepatan vertikal partikel air $w=0,136\text{m/s}$, dan kedalaman dari permukaan air $y=0,5\text{m}$ kecepatan vertikal partikel air $w=0,110\text{m/s}$.

Pada tinggi gelombang $H=0,163\text{m}$ dimana pada permukaan air $y=0\text{m}$ kecepatan vertikal partikel air $w=0,341\text{m/s}$, kedalaman dari permukaan air

$y=0,1\text{m}$ kecepatan vertikal partikel air $w=0,283\text{m/s}$, kedalaman dari permukaan air $y=0,2\text{m}$ kecepatan vertikal partikel air $w=0,233\text{m/s}$, kedalaman dari permukaan air $y=0,3\text{m}$ kecepatan vertikal partikel air $w=0,192\text{m/s}$, kedalaman dari permukaan air $y=0,4\text{m}$ kecepatan vertikal partikel air $w=0,157\text{m/s}$, dan kedalaman dari permukaan air $y=0,5\text{m}$ kecepatan vertikal partikel air $w=0,128\text{m/s}$.

Pada tinggi gelombang $H=0,182\text{m}$ dimana pada permukaan air $y=0\text{m}$ kecepatan vertikal partikel air $w=0,381\text{m/s}$, kedalaman dari permukaan air $y=0,1\text{m}$ kecepatan vertikal partikel air $w=0,315\text{m/s}$, kedalaman dari permukaan air $y=0,2\text{m}$ kecepatan vertikal partikel air $w=0,261\text{m/s}$, kedalaman dari permukaan air $y=0,3\text{m}$ kecepatan vertikal partikel air $w=0,214\text{m/s}$, kedalaman dari permukaan air $y=0,4\text{m}$ kecepatan vertikal partikel air $w=0,176\text{m/s}$, dan kedalaman dari permukaan air $y=0,5\text{m}$ kecepatan vertikal partikel air $w=0,143\text{m/s}$.



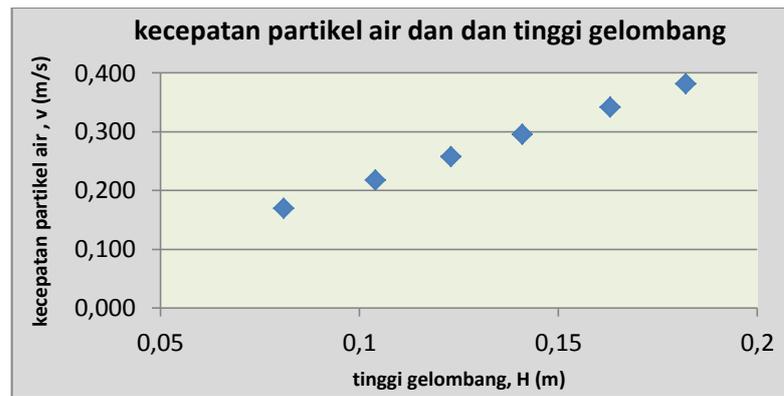
Gambar 4.7 Grafik hubungan antara kecepatan vertikal air dan perbedaan kedalaman

Karena hasil yang didapat adalah kecepatan horisontal dan kecepatan vertikal dari partikel air maka dilakukan perhitungan dengan menentukan resultan dari kedua kecepatan tersebut, dan dihasilkan kecepatan partikel air yang berada di permukaan $y=0$ lebih besar daripada kecepatan partikel air yang berada pada bagian bawah permukaan air, sehingga dalam penentuan kecepatan partikel air digunakan kecepatan partikel air yang berada di permukaan. Menurut *Scheijgrond*

et.al., 2010, kecepatan orbital partikel air maksimum dapat ditentukan sebagai berikut:

$$v = \frac{H}{T_p}$$

Dimana, v = kecepatan orbital partikel air
 H = tinggi gelombang
 T_p = periode



Gambar 4.8 Grafik hubungan antara kecepatan partikel air dan tinggi gelombang

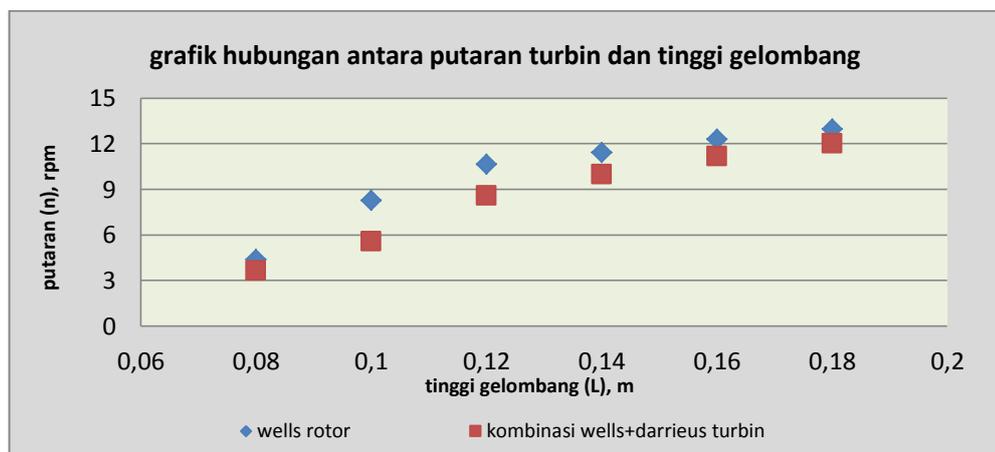
Hasil dari resultan kecepatan horisontal dan vertikal partikel air pada permukaan $y=0$ adalah sebagai berikut gambar 4.8, bahwa dengan tinggi gelombang $H=0,081\text{m}$ diperoleh kecepatan partikel air $v=0,170\text{m/s}$, tinggi gelombang $H=0,104\text{m}$ diperoleh kecepatan partikel air $v=0,218\text{m/s}$, tinggi gelombang $H=0,123\text{m}$ diperoleh kecepatan partikel air $v=0,257\text{m/s}$, tinggi gelombang $H=0,141\text{m}$ diperoleh kecepatan partikel air $v=0,295\text{m/s}$, tinggi gelombang $H=0,163\text{m}$ diperoleh kecepatan partikel air $v=0,341\text{m/s}$, dan dengan tinggi gelombang $H=0,182\text{m}$ diperoleh kecepatan partikel air $v=0,381\text{m/s}$.

4.2.4 Putaran dan torsi turbin yang dihasilkan

Putaran dan torsi pada turbin baik wells rotor maupun turbin kombinasi antara well dan darrieus yang dikenai oleh gelombang air akan selalu meningkat seiring dengan meningkatnya tinggi gelombang air dengan periode dan kedalaman yang tetap. Hal ini disebabkan (*hukum bernoulli*) karena adanya perbedaan

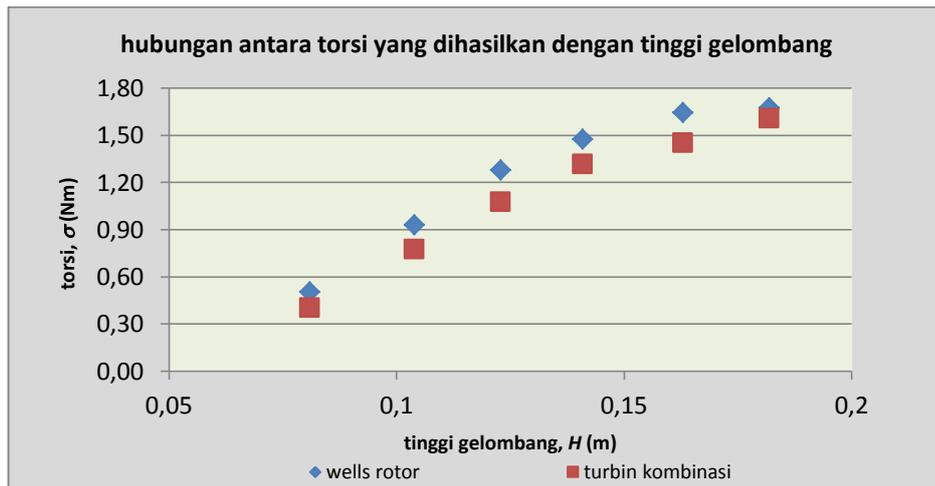
kecepatan dan tekanan pada masing-masing sisi permukaan bilah turbin khususnya bilah dari wells rotor pada posisi horisontal disaat terkena gelombang, bilah turbin wells rotor mempunyai 2 sisi yaitu bagian atas dan bagian bawah.

Pada hasil pengujian dengan gelombang air, putaran dan torsi yang dihasilkan oleh turbin dengan wells rotor lebih besar dibandingkan dengan turbin kombinasi antara wells dan darrieus. Hal ini disebabkan karena pada saat wells rotor menerima gelombang air sebagai masukan energi tertahan oleh adanya bilah turbin darrieus, sehingga turbin darrieus menjadi sebuah resistansi, hal ini disebabkan karena kedua type turbin ini dalam satu poros.



Gambar 4.9 Grafik putaran yang dihasilkan turbin dengan tinggi gelombang

Data putaran turbin dan torsi yang diperoleh dari hasil pengujian turbin kombinasi *wells dan darrieus (konfigurasi 1)* dengan perbedaan tinggi gelombang adalah sebagai berikut (gambar 4.9 dan 4.10), pada tinggi gelombang $H=0,081\text{m}$ menghasilkan putaran $3,6\text{rpm}$ dan torsi $0,4\text{Nm}$, pada tinggi gelombang $H=0,104\text{m}$ menghasilkan putaran $5,6\text{rpm}$ dan torsi $0,77\text{Nm}$, pada tinggi gelombang $H=0,123\text{m}$ menghasilkan putaran $8,6\text{rpm}$ dan torsi $1,07\text{Nm}$, pada tinggi gelombang $H=0,141\text{m}$ menghasilkan putaran 10rpm dan torsi $1,32\text{Nm}$, pada tinggi gelombang $H=0,163\text{m}$ menghasilkan putaran $11,2\text{rpm}$ dan torsi $1,45\text{Nm}$, dan pada tinggi gelombang $H=0,182\text{m}$ untuk turbin menghasilkan putaran 12rpm dan torsi $1,61\text{Nm}$.



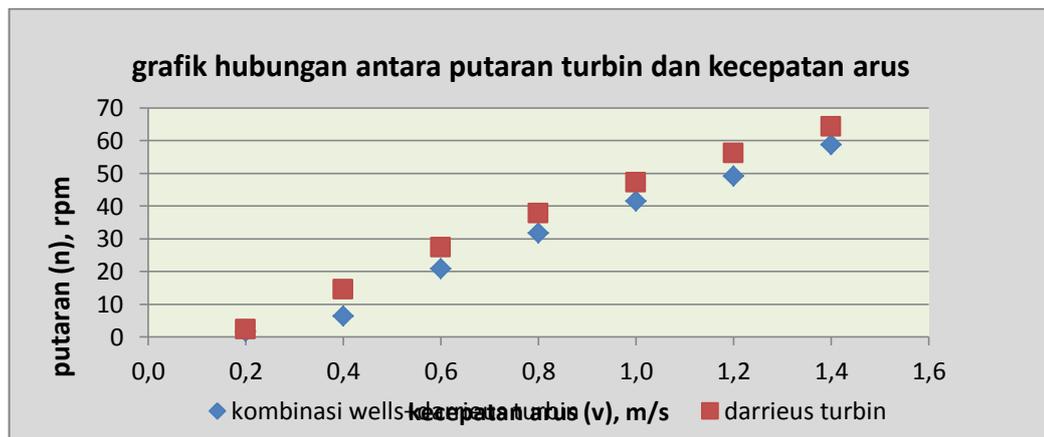
Gambar 4.10 Grafik torsi turbin yang dihasilkan turbin dengan tinggi gelombang

Sedangkan data putaran turbin dan torsi yang diperoleh dari hasil pengujian *wells rotor* (*konfigurasi 2*) dengan perbedaan tinggi gelombang adalah sebagai berikut (gambar 4.9 dan 4.10), pada tinggi gelombang $H=0,081\text{m}$ menghasilkan putaran 4,4rpm dan torsi 0,5Nm, pada tinggi gelombang $H=0,104\text{m}$ menghasilkan putaran 8,3rpm dan torsi 0,93Nm, pada tinggi gelombang $H=0,123\text{m}$ menghasilkan putaran 10,7rpm dan torsi 1,28Nm, pada tinggi gelombang $H=0,141\text{m}$ menghasilkan putaran 11,4rpm dan torsi 1,48Nm, pada tinggi gelombang $H=0,163\text{m}$ menghasilkan putaran 12,3rpm dan torsi 1,64Nm, dan pada tinggi gelombang $H=0,182\text{m}$ untuk turbin menghasilkan putaran 13rpm dan torsi 1,76Nm.

Sedangkan fenomena yang terjadi darrieus turbin tidak berputar sedikitpun walaupun dikenai gelombang dengan tingkat ketinggian yang lebih tinggi. Hal ini disebabkan karena posisi dari bilah turbin darrieus vertikal sehingga kecepatan partikel air dan tekanan yang mengenai bilah-bilah turbin darrieus adalah sama.

Pada validasi uji turbin dengan arus diketahui bahwa pada turbin darrieus dan turbin kombinasi dapat menghasilkan putaran turbin. Dimana pada turbin darrieus menghasilkan putaran yang lebih tinggi dibandingkan dengan putaran yang dihasilkan oleh turbin kombinasi. Hal ini disebabkan karena gerak dari partikel air yang horisontal sehingga dapat ditangkap oleh bilah vertikal dari turbin darrieus, sedangkan wells rotor menjadi suatu resisten.

Adapun data putaran yang diperoleh dari hasil pengujian turbin kombinasi *wells dan darrieus (konfigurasi 1)* dengan perbedaan kecepatan arus adalah sebagai berikut (tabel 4.4), pada kecepatan arus $v=0,2\text{m/s}$ menghasilkan putaran turbin $n=1,7\text{rpm}$, kecepatan arus $v=0,4\text{m/s}$ menghasilkan putaran turbin $n=6,4\text{rpm}$, kecepatan arus $v=0,6\text{m/s}$ menghasilkan putaran turbin $n=20,8\text{rpm}$, kecepatan arus $v=0,8\text{m/s}$ menghasilkan putaran turbin $n=31,8\text{rpm}$, kecepatan arus $v=1,0\text{m/s}$ menghasilkan putaran turbin $n=41,5\text{rpm}$, kecepatan arus $v=1,2\text{m/s}$ menghasilkan putaran turbin $n=49,1\text{rpm}$, dan kecepatan arus $v=1,4\text{m/s}$ menghasilkan putaran turbin $n=58,7\text{rpm}$.



Gambar 4.11 Grafik putaran turbin yang dihasilkan turbin dengan kecepatan arus

Sedangkan data putaran yang diperoleh dari hasil pengujian turbin *darrieus (konfigurasi 3)* dengan perbedaan kecepatan arus adalah sebagai berikut (tabel 4.4), pada kecepatan arus $v=0,2\text{m/s}$ menghasilkan putaran turbin $n=2,3\text{rpm}$, kecepatan arus $v=0,4\text{m/s}$ menghasilkan putaran turbin $n=14,5\text{rpm}$, kecepatan arus $v=0,6\text{m/s}$ menghasilkan putaran turbin $n=27,3\text{rpm}$, kecepatan arus $v=0,8\text{m/s}$ menghasilkan putaran turbin $n=37,8\text{rpm}$, kecepatan arus $v=1,0\text{m/s}$ menghasilkan putaran turbin $n=47,2\text{rpm}$, kecepatan arus $v=1,2\text{m/s}$ menghasilkan putaran turbin $n=56,1\text{rpm}$, dan pada kecepatan arus $v=1,4\text{m/s}$ menghasilkan putaran turbin $n=64,3\text{rpm}$.

Fenomena yang terjadi pada wells rotor adalah tidak dapat berputar sama sekali, hal ini dikarenakan bilah wells rotor terpasang pada posisi horisontal

dengan angel attack 0° sejajar dengan arah aliran, sehingga kecepatan dan tekanan yang diterima oleh bilah wells rotor adalah sama.

4.2.5 Menentukan potensi daya turbin sebenarnya

Hasil validasi generator jenis PMG 1000 watt digunakan untuk mengetahui hubungan antara putaran generator, tegangan dan daya yang dihasilkan pada keadaan yang sebenarnya, Sehingga dengan data tersebut dapat diketahui pula daya dan tegangan yang dihasilkan dari putaran turbin yang diperoleh saat pengujian.

Tabel 4.5 Tegangan, daya dan kuat arus aktual dengan inputan putaran dan perbedaan tinggi gelombang pada wells rotor

<i>tinggi gelombang H, (m)</i>	<i>putaran, n (rpm)</i>	<i>tegangan, v (volt)</i>	<i>arus, I (ampere)</i>	<i>daya, p(watt)</i>
0,081	4,4	3,5	0,1	1,1
0,104	8,3	6,6	0,1	2,08
0,123	10,7	8,2	0,2	2,70
0,141	11,4	8,4	0,2	2,88
0,163	12,3	8,7	0,2	3,12
0,182	13	8,9	0,2	3,30

Tabel 4.6 Tegangan, daya dan kuat arus aktual dengan inputan putaran dan perbedaan tinggi gelombang pada turbin kombinasi

<i>tinggi gelombang H, (m)</i>	<i>putaran, n (rpm)</i>	<i>tegangan, v (volt)</i>	<i>arus, I (ampere)</i>	<i>daya, p(watt)</i>
0,081	3,6	2,9	0,1	0,9
0,104	5,6	4,5	0,1	1,4
0,123	8,6	6,9	0,1	2,2
0,141	10	8	0,2	2,5
0,163	11,2	8,4	0,2	2,81
0,182	12	8,6	0,2	3,02

Dalam pengujian yang telah dilakukan diketahui data putaran yang dihasilkan oleh turbin kombinasi dan wells akibat masukan energi gelombang maka dapat divalidasikan dengan putaran generator secara langsung. Sehingga dapat diketahui listrik yang dihasilkan, adapun data-data tersebut seperti pada tabel 4.5 untuk wells rotor dan tabel 4.6 untuk turbin kombinasi.

4.2.6 Menentukan kapasitas daya turbin dan daya turbin akibat torsi

Untuk menentukan besarnya potensi energi yang dihasilkan dari arus laut tersebut dapat menggunakan persamaan dibawah ini. Secara teori terdapat batas Betz (*Betz limit*) yang merupakan efisiensi maksimum, adapun angka konstanta tersebut $16/27$ (59,3%). Nilai Betz tersebut dicapai oleh rotor turbin dalam menyerap energi, karena pada keadaan sebenarnya terdapat berbagai macam kerugian, baik kerugian gesekan, kerugian diujung bilah dan lain-lain.

$$P = 0,5 \quad \rho A v^3$$

Dimana: P = daya listrik (watt)
= efisiensi turbin
 ρ = density air laut (1000 kG/m³)
 A = luas penampang (m²)
 V = kecepatan arus (m/s)

Yang mana nilai gaya dorong jika dikalikan dengan radius dari turbin akan menghasilkan nilai torsi turbin Darrieus yang dinyatakan dengan:

$$T = F \cdot R$$

Dimana, T = Torsi
 F = gaya dorong
 R = jari-jari turbin

Sehingga besar daya yang dimiliki oleh turbin Darrieus dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$P_T = \omega \cdot T$$

Dimana, P_T = daya turbin
 T = torsi
 ω = kecepatan sudut

Efisiensi turbin merupakan perbandingan antara daya turbin yang dihasilkan dengan daya yang dimiliki oleh aliran air. Hubungan ini dinyatakan dalam persamaan:

$$T = \frac{P_T}{P_N}$$

Dimana, T = efisiensi turbin

P_N = daya turbin

P_T = daya mesin

Tabel 4.7 Daya yang dihasilkan wells rotor dari hasil perhitungan dengan masukan kecepatan

Tinggi gelombang, H (m)	kec. partikel, v (m/s)	potensi daya, P_n (watt)	daya turbin, P_t (watt)	efisiensi wells,
0,081	0,17	1,58	0,18	0,116
0,104	0,22	3,35	0,67	0,199
0,123	0,26	5,55	1,20	0,216
0,141	0,30	8,36	1,58	0,188
0,163	0,34	12,91	1,87	0,145
0,182	0,38	17,97	2,19	0,122

Dari data (tabel 4.7) yang didapat maka diketahui dengan meningkatnya daya yang dihasilkan oleh turbin maka meningkat pula masukan energi gelombang dan hal tersebut dipengaruhi oleh kecepatan partikel air yang dipengaruhi oleh tinggi gelombang. Pada tinggi gelombang 0,123 m diperoleh efisiensi maksimal dari wells rotor yaitu sebesar 21,6%.

Tabel 4.8 Daya yang dihasilkan turbin kombinasi dari hasil perhitungan dengan masukan kecepatan

Tinggi gelombang, H (m)	kec. partikel, v (m/s)	potensi daya, P_n (watt)	daya turbin, P_t (watt)	Efisiensi turbin,
0,081	0,17	1,58	0,19	0,119
0,104	0,22	3,35	0,55	0,163
0,123	0,26	5,55	1,15	0,208
0,141	0,30	8,36	1,55	0,185
0,163	0,34	12,91	1,92	0,149
0,182	0,38	17,97	2,10	0,117

Dari data (tabel 4.8) yang didapat maka diketahui dengan meningkatnya daya yang dihasilkan oleh turbin maka meningkat pula masukan energi gelombang dan hal tersebut dipengaruhi oleh kecepatan partikel air yang dipengaruhi oleh tinggi gelombang. Pada tinggi gelombang 0,123 m diperoleh

efisiensi daya maksimal yang dihasilkan oleh turbin kombinasi wells dan darrieus adalah sebesar 20,8%.

4.2.7 Menentukan Tip speed Ratio (TSR)

Tip speed ratio adalah perbandingan antara kecepatan rotor dan kecepatan aliran.

$$TSR () = \frac{\omega R}{v}$$

Dimana, λ = tip speed ratio
 ω = kecepatan sudut
 R = jari-jari turbin
 v = kecepatan

Tabel 4.9 Tip Speed Ratio pada turbin wells rotor

tinggi gel. H (m)	putaran, n (rpm)	kecepatan, v (m/s)	jari-jari, r (m)	TSR
0,081	4,4	0,17	0,52	1,41
0,104	8,3	0,22	0,52	2,08
0,123	10,7	0,26	0,52	2,26
0,141	11,4	0,30	0,52	2,10
0,163	12,3	0,34	0,52	1,96
0,182	13	0,38	0,52	1,86

Tabel 4.10 Tip Speed Ratio pada wells rotor dan darrieus

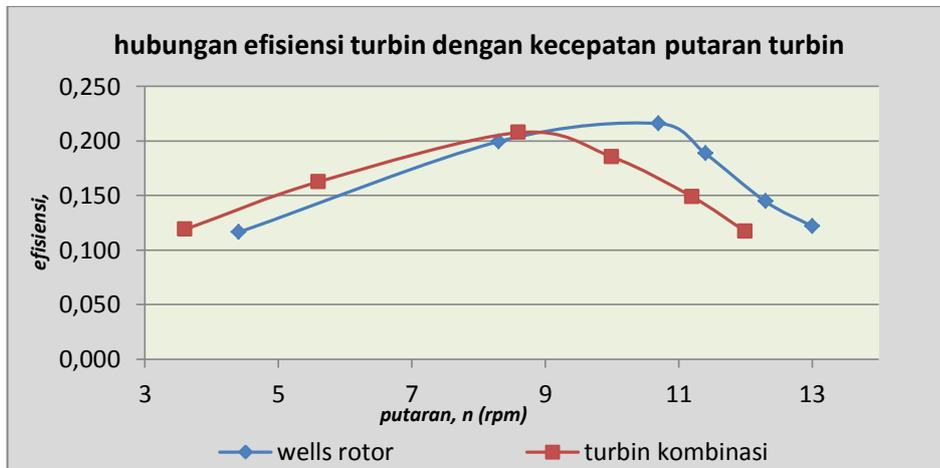
tinggi gel. H (m)	putaran, n (rpm)	kecepatan, v (m/s)	jari-jari, r (m)	TSR
0,081	3,6	0,17	0,52	1,16
0,104	5,6	0,22	0,52	1,40
0,123	8,6	0,26	0,52	1,82
0,141	10	0,30	0,52	1,84
0,163	11,2	0,34	0,52	1,79
0,182	12	0,38	0,52	1,71

Dari data tabel 4.9 dan tabel 4.10 diketahui masing-masing *tip speed ratio* (TSR) dengan perbedaan tinggi gelombang, putaran turbin yang dihasilkan dan kecepatan partikel air maka diketahui hasil *tip speed ratio* (TSR) maksimal 2,26 pada putaran 10,7 rpm dan tinggi gelombang 0,123 m untuk turbin kombinasi,

sedangkan *tip speed ratio* (TSR) maksimal 1,84 pada putaran 8,6 rpm dan tinggi gelombang 0,123 m untuk wells rotor.

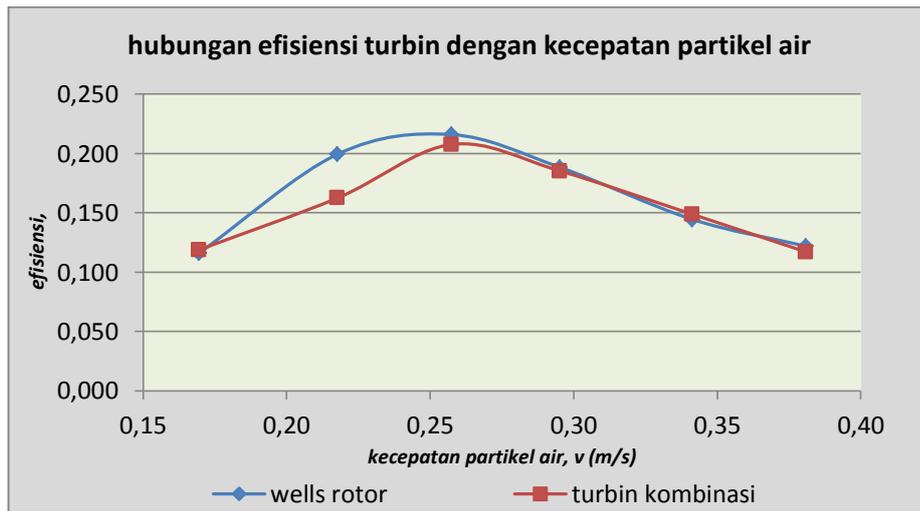
4.2.8 Hubungan efisiensi dengan kecepatan dan daya turbin

Hubungan efisiensi dengan putaran rotor (gambar 4.12) dimana efisiensi maksimal wells rotor terus meningkat sampai pada puncaknya sebesar 0,216 pada kecepatan putaran rotor 10,7 rpm, kemudian mengalami penurunan. Sedangkan efisiensi pada turbin kombinasi antara wells dandarrieus juga meningkat dari awalnya sampai pada puncaknya sebesar 0,208 pada kecepatan putaran rotor 10 rpm dan kemudian juga mengalami penurunan.



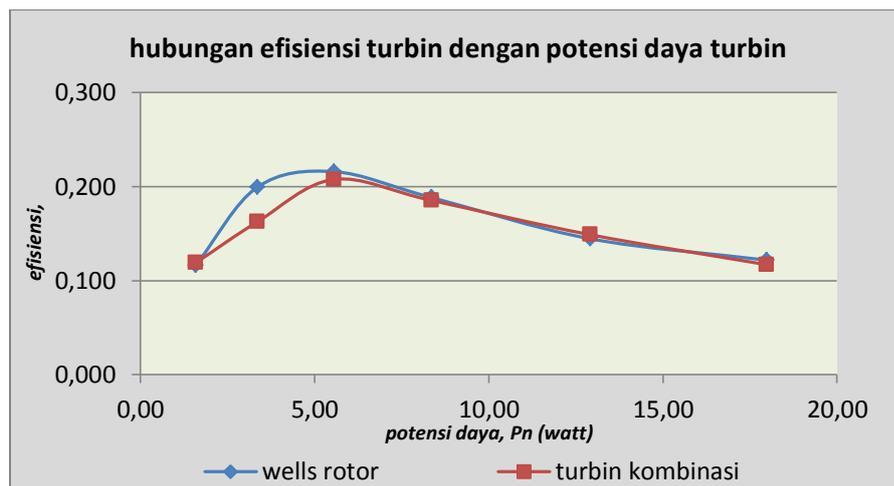
Gambar 4.12 Grafik hubungan efisiensi daya turbin dan kecepatan putaran turbin

Hubungan efisiensi dengan kecepatan partikel air (gambar 4.13), dimana efisiensi maksimal wells rotor terus meningkat sampai pada puncaknya sebesar 0,216 pada kecepatan partikel air 0,26 m/s dan tinggi gelombang 0,123 m, kemudian mengalami penurunan. Sedangkan efisiensi pada turbin kombinasi antara wells dandarrieus juga meningkat dari awalnya sampai pada puncaknya sebesar 0,208 pada kecepatan partikel air 0,26 m/s dan pada tinggi gelombang 0,123 m dan kemudian juga mengalami penurunan.



Gambar 4.13 Grafik hubungan efisiensi daya turbin dan kecepatan partikel air

Pada potensi daya turbin (gambar 4.14) yang dihasilkan efisiensi tertinggi pada daya sebesar 5,55 w baik untuk efisiensi wells dan kombinasi wells dan darrieus.

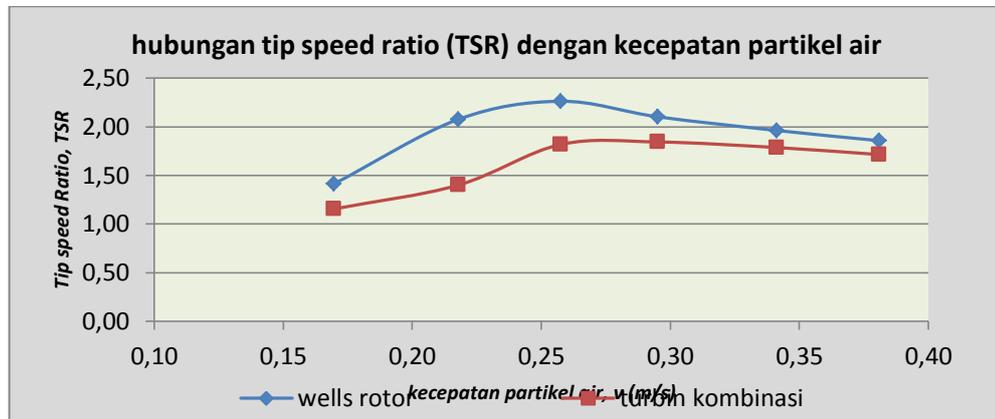


Gambar 4.14 Grafik hubungan efisiensi daya turbin dan potensi daya turbin

4.2.9 Hubungan tip speed ratio (TSR) dengan efisiensi

Perbandingan antara kecepatan putaran dan kecepatan aliran dengan kecepatan partikel air pada puncaknya 0,30 m/s dengan TSR sebesar 2,26 untuk wells rotor dan 1,84 untuk turbin darrieus. Diawal TSR kedua konfigurasi tersebut

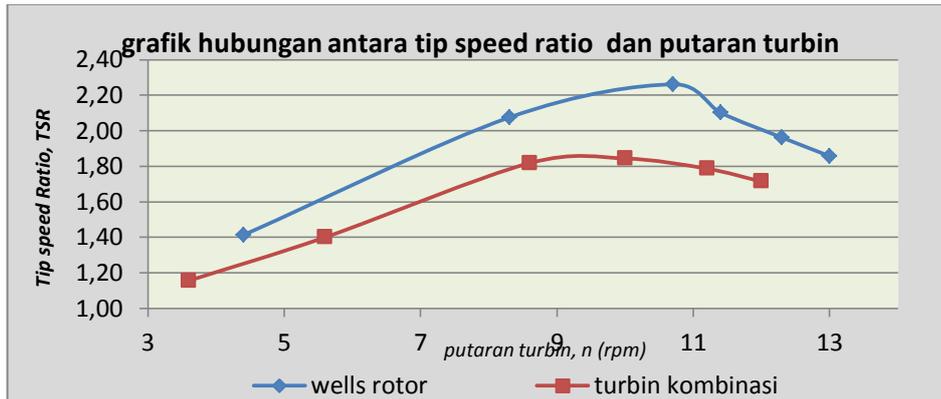
mengalami peningkatan dan pada puncaknya mengalami penurunan (gambar 4.15). Nilai TSR dari wells rotor lebih besar daripada turbin kombinasi.



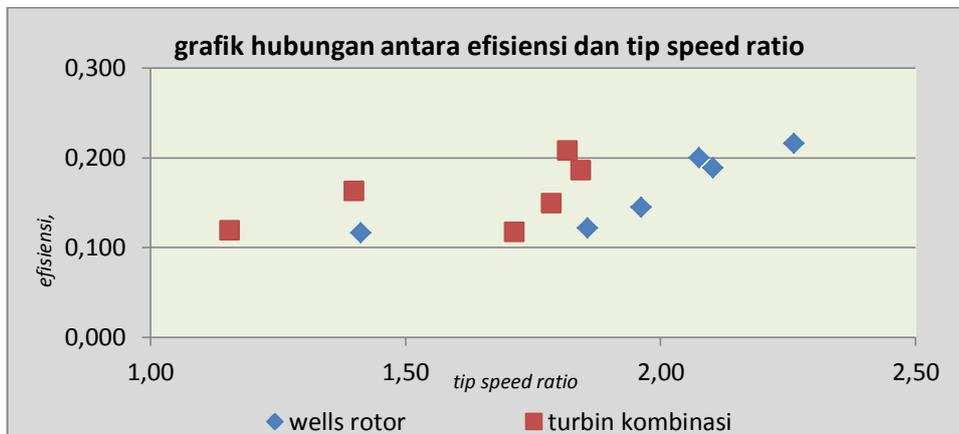
Gambar 4.15 Grafik hubungan (TSR) dengan kecepatan partikel air

Hubungan TSR dengan putaran turbin dari hasil pengujian diketahui bahwa nilai TSR dari wells rotor lebih tinggi daripada turbin kombinasi. Nilai TSR masing-masing konfigurasi meningkat sampai pada putaran 10,7 rpm pada wells rotor dan 10 rpm pada turbin kombinasi kemudian menurun dengan bertambahnya putaran turbin gambar 4.16. dengan peningkatan kecepatan air pada tinggi gelombang yang berbeda belum tentu menghasilkan TSR yang meningkat pula, hal ini karena TSR berhubungan dengan putaran turbin dimana putaran turbin yang terjadi pada titik tertentu akan mengalami kenaikan yang significant jika tinggi gelombang ditambahkan terus kemungkinan akan drop atau stall.

Pada gambar 4.17 hubungan antara TSR dan efisiensi dimana pada wells rotor pada awalnya akan terus meningkat dengan sampai pada puncak efisiensi yaitu 0,216 dan TSR tertinggi 2,26 kemudian keduanya mengalami penurunan. Sedangkan pada turbin kombinasi wells dan darrieus mempunyai trendline yang sama dimana pada efisiensi puncaknya 0,28 dan TSR tertinggi 1,84 dan kemudian juga mengalami penurunan efisiensi disertai dengan penurunan TSR. Hal ini disebabkan oleh karena putaran dan torsi yang dihasilkan oleh turbin pada tinggi gelombang 0,14 m sampai dengan 0,18 m tidak mengalami peningkatan yang significant (peningkatan tidak linier) sehingga kecepatan partikel air mengalami peningkatan secara linier seiring dengan peningkatan tinggi gelombang.



Gambar 4.16 Grafik hubungan tip speed ratio (TSR) dengan putaran turbin



Gambar 4.17 Grafik hubungan efisiensi daya turbin dengan tip speed ratio (TSR)

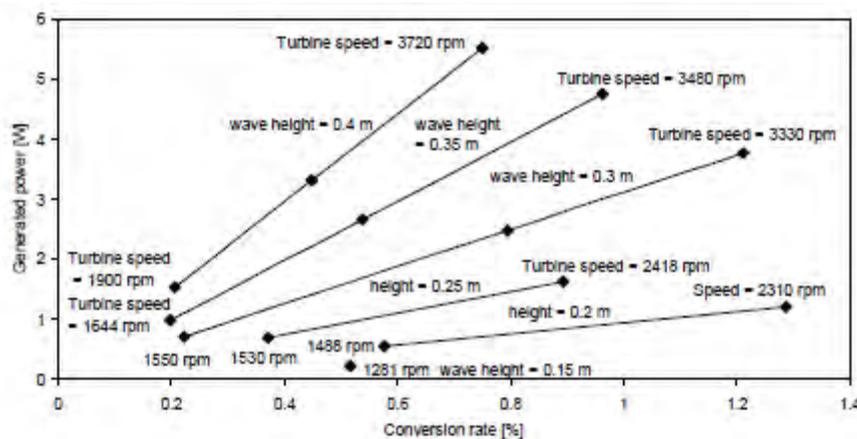
4.2.10 Data dari peneliti lain

David G. Dorrell et.al., 2008, telah melakukan studi eksperimental performance wells rotor dengan sistem *Oscilataing Water Column* (OWC). Dimana dalam uji eksperimental tersebut menggunakan turbin type ganda (double stage), sudu-sudu menggunakan aerofoil NACA 0015 dengan diameter luar rotor 132 mm dan diameter hub 74 mm.



Gambar 4.18 Wells rotor double stage dan pengujiannya
(David G. Dorrell et.al., 2008)

Sistem diuji dengan tinggi gelombang yang bervariasi. Perkiraan daya yang dihasilkan akan memberi perbedaan akibat gelombang. Pada periode 2,8 s dan tinggi gelombang 0,4 m akan menghasilkan daya sebesar 440 w/m yang mana pada OWC memungkinkan untuk menghasilkan daya sebesar 735 w. Pada periode 4 s dan ketinggian gelombang 0,12 m energi yang dihasilkan 56 w/m dan daya yang dihasilkan oleh turbin 30 w. Periode gelombang yang optimum sesuai dengan performance turbin ini dalam menghasilkan energi adalah 2 s.



Gambar 4.19 Wells rotor double stage dan pengujiannya
(David G. Dorrell et.al., 2008)

Dalam sistem OWC putaran yang dibutuhkan dalam menghasilkan listrik memang cukup besar, hal ini disebabkan perbedaan densitas antara air dan udara. Dimana jika membutuhkan power yang sama dan torsi yang meningkat maka

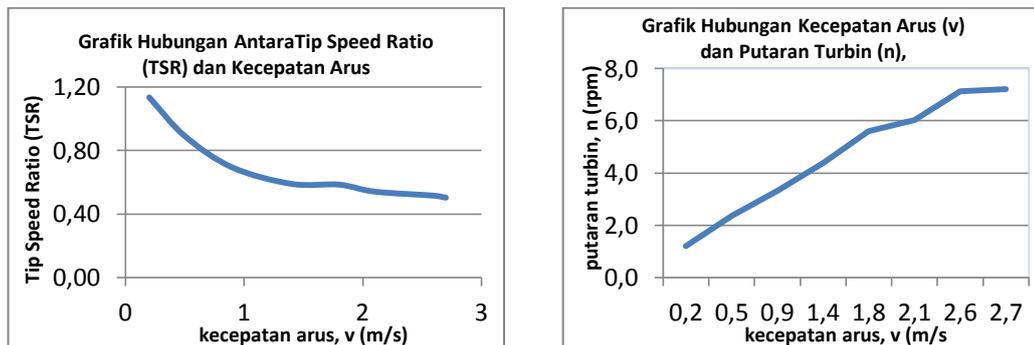
putaran turun dan jika torsi kecil maka putaran harus lebih besar, torsi itu sendiri dipengaruhi oleh gaya luar yang menggerakkan turbin.

PLTAL LHI-BPPT, 2013, telah melakukan uji prototype di bawah jembatan Suramadu, prototype turbin yang menggunakan type darrieus. Data spesifikasi turbin :

- Jumlah bilah : 3 buah
- Panjang bilah : 2 m
- Type foil : naca 018
- diameter : 3,6 m



Gambar 4.20 Prototype turbin arus laut type darrieus
(*PLTAL LHI-BPPT, 2013*)



Gambar 4.21 Grafik hubungan TSR dan putaran turbin dengan kecepatan arus
(*PLTAL LHI-BPPT, 2013*)

Putaran yang dihasilkan oleh prototype turbin terus meningkat pada setiap kenaikan kecepatan arus. Tetapi hal tersebut berbanding terbalik dengan tip speed ratio yang dihasilkan. Kenaikan dari putaran turbin tidak terlalu signifikan, sehingga prototype turbin ini mempunyai performance low speed. Dan untuk

memperoleh daya listrik yang dihasilkan maka harus dihubungkan dengan gearbox type increaser untuk meningkatkan putaran.

Scheijgrond dkk, 2008, telah mematenkan hasil penelitiannya di *international patent classification* dan di publikasikan pada tahun 2010. Adapun penelitian yang dilakukan tersebut adalah untuk mengetahui keefektifan turbin dalam penyerapan energi gelombang dan arus dengan menggabungkan dua type turbin yaitu darrieus dan wells rotor.

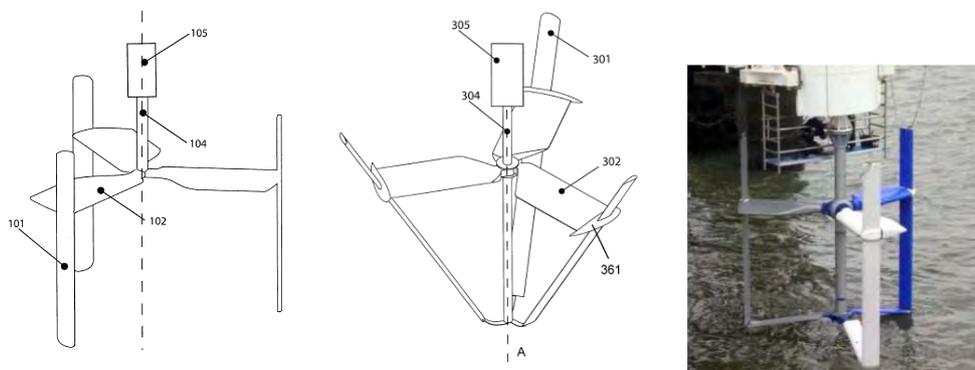
Adapun spesifikasi dari turbin tersebut adalah sebagai berikut:

a. wells rotor

- ~ Diameter poros 8 cm
- ~ Panjang wells rotor 1,16 m ditambah flange dari darrieus sehingga diameternya menjadi 2,4 m.
- ~ Lebar bilah 60 cm
- ~ Tebal bilah 80 cm

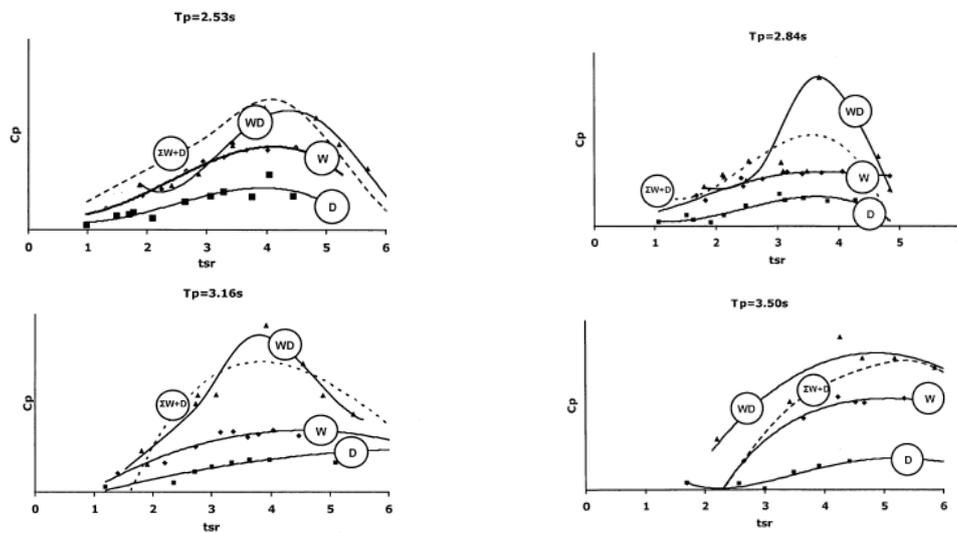
b. darrieus turbine

- ~ Lebar bilah 180 cm
- ~ Panjang bilah 2,4 m
- ~ Tebal bilah 3,3 cm
- ~ Diameter 2,4 m
- ~ Sudut 30°



Gambar 4.22 Turbin kombinasi wells dan darrieus
(*Scheijgrond et.al. International Patent Classification WO 2010/011133, 2010*)

Pengujian turbin ini dilakukan di laut dengan gelombang dan arus yang terjadi sebenarnya, adapun kesimpulan dari pengujian ini adalah efisiensi dari darrieus masih rendah dibandingkan dengan wells rotor dalam konversi energi gelombang, efisiensi tersebut akan meningkat jika darrieus dikombinasikan dengan wells rotor dalam satu shaft axis. Jika darrieus dibuat sudut belum tentu lebih baik efisiensinya masih tergantung dari dari periode gelombang yang ada (gambar 4.23). Perubahan sudut pada darrieus adalah untuk meningkat tekanan, karena dengan meningkatnya tekanan pada bilah diharapkan akan meningkat putaran turbin dalam penyerapan energi gelombang.



Gambar 4.23 Grafik hubungan efisiensi daya turbin dengan tip speed ratio (TSR) (Scheijgrond et.al. *International Patent Classification WO 2010/011133, 2010*)

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

4.1.2	Data putaran turbin yang dihasilkan dengan variasi periode ...	Error! Bookmark not defined.
4.1.3	Data putaran turbin dan torsi pada pengujian gelombang.....	Error! Bookmark not defined.
4.1.4	Data hasil validasi uji turbin dengan arus	Error! Bookmark not defined.
4.1.5	Data validasi generator.....	Error! Bookmark not defined.
4.2	Pembahasan Data Hasil Penelitian	Error! Bookmark not defined.
4.2.1	Pembahasan parameter-parameter pada gelombang pengujian	Error! Bookmark not defined.
4.2.2	Pembahasan penentuan periode yang optimum	Error! Bookmark not defined.
4.2.3	Menentukan kecepatan horisontal dan vertikal dari partikel air	Error! Bookmark not defined.
4.2.4	Putaran dan torsi turbin yang dihasilkan	Error! Bookmark not defined.
4.2.5	Menentukan potensi daya turbin sebenarnya .	Error! Bookmark not defined.
4.2.6	Menentukan kapasitas daya turbin dan daya turbin akibat torsi	Error! Bookmark not defined.
4.2.7	Menentukan Tip speed Ratio (TSR)	Error! Bookmark not defined.
4.2.8	Hubungan efisiensi dengan kecepatan dan daya turbin	Error! Bookmark not defined.
4.2.9	Hubungan tip speed ratio (TSR) dengan efisiensi.	Error! Bookmark not defined.
4.2.10	Data dari peneliti lain	Error! Bookmark not defined.
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....		23
5.1	Kesimpulan.....	23
5.2	Saran-saran	23
DAFTAR PUSTAKA		
LAMPIRAN		
BIOGRAFI		

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR GAMBAR

- Gambar 1.1 Penjalaran gelombang dan arus di pantai **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 1.2 Konsep design Darrieus turbine vertical axis **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 1.3 Wells rotor pada system OWC **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 2.1 Gelombang pada laut dalam dan laut dangkal **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 2.2 Gelombang sinusoidal **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 2.3 Geometri blade dan diagram kecepatan **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 2.4 Permukaan panel distribusi..... **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 2.5 Tingkat konversi terhadap koefisien aliran **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 2.6 Model finite elemen pada garrieus dan wells **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 2.7 Validasi pada model komputasi pengukuran data **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 3.1 Diagram alir penelitian **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 3.2 Bentuk kontur aerofoil naca 0021 **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 3.3 *Wells rotor blade* type aerofoil naca 0021 **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 3.4 *Darrieus turbine blade* type aerofoil naca 0021 **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 3.5 *Hub* turbin..... **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 3.6 Poros turbin **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 3.7 Frame dan Poros turbin **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 3.8 Bearing **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 3.9 *Radial arm* **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 3.10 Penumpu blade **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 3.11 *Darrieus turbine dan wells rotor*.. **Error! Bookmark not defined.**

DAFTAR GAMBAR

- Gambar 1.1 Penjalaran gelombang dan arus di pantai **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 1.2 Konsep design Darrieus turbine vertical axis **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 1.3 Wells rotor pada system OWC **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 2.1 Gelombang pada laut dalam dan laut dangkal **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 2.2 Gelombang sinusoidal **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 2.3 Geometri blade dan diagram kecepatan **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 2.4 Permukaan panel distribusi..... **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 2.5 Tingkat konversi terhadap koefisien aliran **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 2.6 Model finite elemen pada garrieus dan wells **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 2.7 Validasi pada model komputasi pengukuran data **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 3.1 Diagram alir penelitian **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 3.2 Bentuk kontur aerofoil naca 0021 **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 3.3 *Wells rotor blade* type aerofoil naca 0021 **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 3.4 *Darrieus turbine blade* type aerofoil naca 0021 **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 3.5 *Hub* turbin..... **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 3.6 Poros turbin **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 3.7 Frame dan Poros turbin **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 3.8 Bearing **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 3.9 *Radial arm* **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 3.10 Penumpu blade **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 3.11 *Darrieus turbine dan wells rotor*.. **Error! Bookmark not defined.**

- Gambar 3.12 Proses penimbangan masing-masing komponen turbin **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 3.13 *Torquemeter* dan proese kalibrasi **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 3.14 *Wave High pectrumS sensor*.....**Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 3.15 *Tachometer***Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 3.16 *Currentmeter***Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 3.17 Persiapan pengujian pemasangan alat ukur**Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 3.18 pengujian wells rotor**Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 3.19 Pengujian konfigurasi 1 wells rotor dan arah putaran **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 3.20 Posisi water level saat pengujian konfigurasi 1**Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 3.21 Pengujian turbin kombinasi wells dan darrieus**Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 3.22 arah putaran kombinasi wells rotor dan turbin darrieus **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 3.23 konfigurasi 2 saat pengujian kombinasi wells rotor dan turbin darrieus.....**Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 3.24 konfigurasi 3 saat pengujian turbin darrieus**Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 3.25 konfigurasi 1 saat pengujian wells rotor dengan arus **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 3.26 konfigurasi 2 saat pengujian wells rotor dan turbin darrieus dengan arus.....**Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 3.27 Validasi generator.....**Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 4.1 Grafik hasil validasi antara putaran dan daya**Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 4.2 Grafik hasil validasi antara putaran dan tegangan..... **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 4.3 Grafik sinusoidal gelombang pengujian**Error! Bookmark not defined.**

- Gambar 4.4 Grafik sinusoidal gelombang pengujian **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 4.5 Grafik hubungan antara perbedaan periode gelombang dan putaran turbin **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 4.6 Grafik hubungan antara kecepatan horisontal air dan perbedaan kedalaman **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 4.7 Grafik hubungan antara kecepatan vertikal air dan perbedaan kedalaman **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 4.8 Grafik hubungan antara kecepatan partikel air dan tinggi gelombang..... **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 4.9 Grafik putaran yang dihasilkan turbin dengan tinggi gelombang **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 4.10 Grafik torsi turbin yang dihasilkan turbin dengan tinggi gelombang..... **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 4.11 Grafik putaran turbin yang dihasilkan turbin dengan kecepatan arus **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 4.12 Grafik hubungan efisiensi daya turbin dan kecepatan putaran turbin **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 4.13 Grafik hubungan efisiensi daya turbin dan kecepatan partikel air **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 4.14 Grafik hubungan efisiensi daya turbin dan potensi daya turbin **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 4.15 Grafik hubungan (TSR) dengan kecepatan partikel air..... **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 4.16 Grafik hubungan tip speed ratio (TSR) dengan putaran turbin **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 4.17 Grafik hubungan efisiensi daya turbin dengan tip speed ratio (TSR)..... **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 4.18 Wells rotor double stage dan pengujiannya **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 4.19 Wells rotor double stage dan pengujiannya **Error! Bookmark not defined.**

- Gambar 4.20 Prototype turbin arus laut type darrieus **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 4.21 Grafik hubungan TSR dan putaran turbin dengan kecepatan arus
..... **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 4.22 Turbin kombinasi wells dan darrieus **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 4.23 Grafik hubungan efisiensi daya turbin dengan tip speed ratio (TSR)..... **Error! Bookmark not defined.**

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR TABEL

- Tabel 2.1 Geometric utama pada airofoil NACA 0018 **Error! Bookmark not defined.**
- Tabel 4.1 Hasil validasi gelombang pengujian **Error! Bookmark not defined.**
- Tabel 4.2 Putaran yang dihasilkan turbin dengan variasi tinggi dan periode gelombang..... **Error! Bookmark not defined.**
- Tabel 4.3 Putaran dan torsi yang dihasilkan dengan perbedaan tinggi gelombang..... **Error! Bookmark not defined.**
- Tabel 4.4 Putaran yang dihasilkan dengan kecepatan arus **Error! Bookmark not defined.**
- Tabel 4.5 Tegangan, daya dan kuat arus aktual dengan inputan putaran . **Error! Bookmark not defined.**
- Tabel 4.6 Tegangan, daya dan kuat arus aktual dengan inputan putaran . **Error! Bookmark not defined.**
- Tabel 4.7 Daya yang dihasilkan wells rotor dari hasil perhitungan dengan masukan kecepatan **Error! Bookmark not defined.**
- Tabel 4.8 Daya yang dihasilkan turbin kombinasi dari hasil perhitungan dengan masukan kecepatan..... **Error! Bookmark not defined.**
- Tabel 4.9 Tip Speed Ratio pada turbin wells rotor **Error! Bookmark not defined.**
- Tabel 4.10 Tip Speed Ratio pada wells rotor dan darrieus **Error! Bookmark not defined.**

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

1.1 Kesimpulan

1. Wells rotor yang terpasang horisontal hanya mampu menerima energi gelombang akibat adanya gerakan orbital dari partikel-partikel air dan tidak efektif dalam menerima energi arus air karena sejajar dengan arah aliran partikel air, sedangkan turbin darrieus yang terpasang vertikal sangat efektif dalam menerima energi arus dan tidak efektif dalam menerima energi gelombang. Sehingga penggunaan turbin kombinasi wells dan darrieus sangat efektif dalam menyerap kedua energi baik gelombang maupun energi arus.
2. Pada tinggi gelombang lebih tinggi akan menghasilkan energi yang lebih besar pada periode yang sama. Pada turbin kombinasi dan wells rotor pada pengujian ini dihasilkan putaran turbin yang maksimal pada periode gelombang sebesar 1,5s. Efisiensi maksimal yang diperoleh dari turbin kombinasi wells dan darrieus adalah sebesar 21,6% dan pada wells rotor sebesar 20,8% dengan ketinggian gelombang 0,123 m.
3. Dengan perbedaan tinggi gelombang, putaran turbin yang dihasilkan dan kecepatan partikel air maka diketahui hasil *tip speed ratio* (TSR) pada turbin kombinasi wells rotor dan darrieus sebesar 1,84 dan pada wells rotor sebesar 2,26.

1.2 Saran-saran

- ~ Perlu adanya pengembangan yang lebih lanjut dalam penelitian tentang turbin kombinasi antara wells dan darrieus untuk mendapatkan efisiensi yang lebih baik.
- ~ Lebih banyak inovasi pada sisi aerofoil dengan penambahan sudut serang untuk meningkatkan tekanan pada bilah turbin sehingga dapat meningkatkan penyerapan energi yang lebih baik.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR PUSTAKA

- Bambang Triatmodjo, (1999), “*Teknik Pantai*”, edisi pertama, BETA, Yogyakarta
- John Twidell, Tony weir, (2006), “*Renwable Energy Resources*”, 2nd edition, Taylor & Francis, London .
- Bernard Le Mehaute, (1976), “*An Introduction hydrodynamics & water waves*”, Springer-Verlag, New York .
- R, Bhattacharyya, M.E. Mc Cormick, 2003, “*Wave Energy Conversion*”, volume 6, series edition, Elseveir Ocean Engineering, New York.
- Herald Vervoorn, 1997, *Wave Energy Conversion*, Thesis, Delf University.
- David G. Dorrell and Min-Fu Hsieh, (2008), “Performance of Wells Turbines for use in Small-Scale Oscillating Water Columns”, ISOPE,.
- Katsuya Takasaki, Manabu Takao, Toshiaki setoguchi, 2014, “Effect Of Blade Shape on the Performance of Wells Turbine for Wave Energy Conversion”, International Scholarly and Scientific Research & Innovation.
- Z. Carija, L. kranjcevic, V. Banic, M. Cavrak, (2012), “Numerical Analysis of Wells Turbine for Wave Power Conversion”, Article Faculty of Engineering, Univirsity of Rijeka.
- Thakker, A., Abdulhadi, R., 2008 : “The performance of Wells turbine under bi-directional airflow, *Renewable Energy*”, 33, 11, 2467–2474.
- Thakker, A., Frawley, P. i Sheik Bajeeet, E., 2001 : “Numerical Analysis of Wells Turbine Perfor- mance Using a 3D Navier-Stokes Explicit Sol ver”. Proceedings of the Eleventh International Offshore and Polar Engineering Conference. Stavanger, Norway, 604-608.
- Gato, L. M. C., and Henriques, J. C. C., 1994, “*Optimization of Symmetrical Blades for Wells Turbine*”, *Air Turbine Development and Assessment for Wave Power Plants*, contract JOU2-CT93-0333, Progress Report, Instituto Superior Técnico, Lisbon.
- Erwandi, 2009, “ The Research On Vertical Axis Marine Current Proceeding Of Ocean Sciene”, *Technology, And Policy Syposium, World Ocean Conference*”, Manado
- Erwandi, 2011, “The Development Of Indonesian Vertical Axis Marine Current Turbine For The Tidal Power Generation”, Indonesia Marine

- El-Sayed, A.F dan Abdel Azim. 1995. "Dynamics of Vertical Axis Wind Turbines (Darrieus Type)". Zagazig University.
- Ion NILA, Radu BOGATEANU, Marcel STERE, 2012, "Small Power Wind Turbine (Type Darrieus)", Romania.
- Hantoro, R., Utama, IK AP., Erwandi, 2009, "Flow Visualization And Shape Mode In The Study Of Vortex Induced Vibration (VIV) And Torsional Vibration (TV) On Vertical Axis Ocean Current Turbine (VAOCT)", *Procedding Of Ocean Sciene, Technology, And Policy*" syposium, world ocean conference, Manado.
- Turaj Ashuri, Gerrard van Bussel, Stefan Mieras, 2012, "Development and Validation of a Computational Model For Design Analysis of a Novel Marine Turbine" Delft The Netherlands.
- Tapan H. Barot, Hitesh Jarwala, Mayur Kevadiya, May 2015, "a Review on Straight Bladed Vertical Axis H-Type Darrieus Wind Turbine", Gujarat, India.
- E. J. Soons, 2007, "Improving the Hydrodynamic Performance of a Combined Wells-Darrieus Rotor", Thesis Master, Delft University of Technology, Delft - Netherlands.
- International Application Published Under Patent Cooperation Treaty (PCT) WO 2010/011133 A1, 2010, "*a Device for the Utilisation of Wave Energy and a Method*".
- International Application Published Under Patent Cooperation Treaty (PCT) WO 2010/062170 A1, 2010, "*an Apparatus for Harvesting Energy from a Body of Water and a Method*"

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BIOGRAFI



Daif Rahuna, dilahirkan di Surabaya pada tanggal 01 Agustus 1974 dari pasangan W. Setiawan (Alm) dan S. Nikmah, merupakan anak pertama dari 2 bersaudara, yang saat ini tinggal di Pagesangan IV Utara Lapangan Blok C no. 6 Surabaya.

Jenjang pendidikan dasar di tempuh selama 6 tahun (tahun 1980-1986) di SDN Ngagel I Surabaya, dan berikutnya melanjutkan pendidikan di SMPN 12 Surabaya (tahun 1986-1989), sedangkan pendidikan menengah di Pendidikan dan Latihan Kejuruan Teknik (DLKT) PT PAL. Indonesia di Ujung Surabaya (tahun 1989-1993). Setelah lulus pada tahun yang sama langsung bekerja di PT PAL. Indonesia di divisi Direktorat Teknologi dan ditempatkan di Laboratorium Hidrodinamika Indonesia yang merupakan kerjasama antara PT. PAL Indonesia dan BPPT. Sambil bekerja melanjutkan kuliah S1 jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik bdi Universitas tujuh belas Agustus 1945 Surabaya (tahun 1994-2001). Pada pertengahan kuliah S1 mengikuti kuliah yang lain di Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya program studi Teknik Bangunan Kapal jenjang pendidikan D3 (tahun 1998-2000).

Pada tahun 1998 hingga sekarang bergabung dengan UPT Balai Teknologi Hidrodinamika BPP Teknologi di Surabaya. Melakukan penelitian dan pengembangan dengan team Pembangkit Listrik Tenaga Arus Laut (PLTAL) sejak tahun 2009 hingga sekarang.

Pada tahun 2014 mendapat kesempatan untuk melanjutkan studi S2 di Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya pada fakultas Teknik Kelautan Jurusan Teknik Sistem dan Pengendalian Kelautan.

- Gambar 3.12 Proses penimbangan masing-masing komponen turbin **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 3.13 *Torquemeter* dan proese kalibrasi **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 3.14 *Wave High pectrumS sensor*.....**Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 3.15 *Tachometer***Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 3.16 *Currentmeter***Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 3.17 Persiapan pengujian pemasangan alat ukur**Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 3.18 pengujian wells rotor**Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 3.19 Pengujian konfigurasi 1 wells rotor dan arah putaran **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 3.20 Posisi water level saat pengujian konfigurasi 1**Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 3.21 Pengujian turbin kombinasi wells dan darrieus**Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 3.22 arah putaran kombinasi wells rotor dan turbin darrieus **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 3.23 konfigurasi 2 saat pengujian kombinasi wells rotor dan turbin darrieus.....**Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 3.24 konfigurasi 3 saat pengujian turbin darrieus**Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 3.25 konfigurasi 1 saat pengujian wells rotor dengan arus **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 3.26 konfigurasi 2 saat pengujian wells rotor dan turbin darrieus dengan arus.....**Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 3.27 Validasi generator.....**Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 4.1 Grafik hasil validasi antara putaran dan daya**Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 4.2 Grafik hasil validasi antara putaran dan tegangan..... **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 4.3 Grafik sinusoidal gelombang pengujian**Error! Bookmark not defined.**

- Gambar 4.4 Grafik sinusoidal gelombang pengujian **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 4.5 Grafik hubungan antara perbedaan periode gelombang dan putaran turbin **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 4.6 Grafik hubungan antara kecepatan horisontal air dan perbedaan kedalaman **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 4.7 Grafik hubungan antara kecepatan vertikal air dan perbedaan kedalaman **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 4.8 Grafik hubungan antara kecepatan partikel air dan tinggi gelombang..... **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 4.9 Grafik putaran yang dihasilkan turbin dengan tinggi gelombang **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 4.10 Grafik torsi turbin yang dihasilkan turbin dengan tinggi gelombang..... **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 4.11 Grafik putaran turbin yang dihasilkan turbin dengan kecepatan arus **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 4.12 Grafik hubungan efisiensi daya turbin dan kecepatan putaran turbin **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 4.13 Grafik hubungan efisiensi daya turbin dan kecepatan partikel air **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 4.14 Grafik hubungan efisiensi daya turbin dan potensi daya turbin **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 4.15 Grafik hubungan (TSR) dengan kecepatan partikel air..... **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 4.16 Grafik hubungan tip speed ratio (TSR) dengan putaran turbin **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 4.17 Grafik hubungan efisiensi daya turbin dengan tip speed ratio (TSR)..... **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 4.18 Wells rotor double stage dan pengujiannya **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 4.19 Wells rotor double stage dan pengujiannya **Error! Bookmark not defined.**

- Gambar 4.20 Prototype turbin arus laut type darrieus **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 4.21 Grafik hubungan TSR dan putaran turbin dengan kecepatan arus
..... **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 4.22 Turbin kombinasi wells dan darrieus **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 4.23 Grafik hubungan efisiensi daya turbin dengan tip speed ratio (TSR)..... **Error! Bookmark not defined.**

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR TABEL

- Tabel 2.1 Geometric utama pada airofoil NACA 0018 **Error! Bookmark not defined.**
- Tabel 4.1 Hasil validasi gelombang pengujian **Error! Bookmark not defined.**
- Tabel 4.2 Putaran yang dihasilkan turbin dengan variasi tinggi dan periode gelombang..... **Error! Bookmark not defined.**
- Tabel 4.3 Putaran dan torsi yang dihasilkan dengan perbedaan tinggi gelombang..... **Error! Bookmark not defined.**
- Tabel 4.4 Putaran yang dihasilkan dengan kecepatan arus **Error! Bookmark not defined.**
- Tabel 4.5 Tegangan, daya dan kuat arus aktual dengan inputan putaran . **Error! Bookmark not defined.**
- Tabel 4.6 Tegangan, daya dan kuat arus aktual dengan inputan putaran . **Error! Bookmark not defined.**
- Tabel 4.7 Daya yang dihasilkan wells rotor dari hasil perhitungan dengan masukan kecepatan **Error! Bookmark not defined.**
- Tabel 4.8 Daya yang dihasilkan turbin kombinasi dari hasil perhitungan dengan masukan kecepatan..... **Error! Bookmark not defined.**
- Tabel 4.9 Tip Speed Ratio pada turbin wells rotor **Error! Bookmark not defined.**
- Tabel 4.10 Tip Speed Ratio pada wells rotor dan darrieus **Error! Bookmark not defined.**

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

1.1 Kesimpulan

1. Wells rotor yang terpasang horisontal hanya mampu menerima energi gelombang akibat adanya gerakan orbital dari partikel-partikel air dan tidak efektif dalam menerima energi arus air karena sejajar dengan arah aliran partikel air, sedangkan turbin darrieus yang terpasang vertikal sangat efektif dalam menerima energi arus dan tidak efektif dalam menerima energi gelombang. Sehingga penggunaan turbin kombinasi wells dan darrieus sangat efektif dalam menyerap kedua energi baik gelombang maupun energi arus.
2. Pada tinggi gelombang lebih tinggi akan menghasilkan energi yang lebih besar pada periode yang sama. Pada turbin kombinasi dan wells rotor pada pengujian ini dihasilkan putaran turbin yang maksimal pada periode gelombang sebesar 1,5s. Efisiensi maksimal yang diperoleh dari turbin kombinasi wells dan darrieus adalah sebesar 21,6% dan pada wells rotor sebesar 20,8% dengan ketinggian gelombang 0,123 m.
3. Dengan perbedaan tinggi gelombang, putaran turbin yang dihasilkan dan kecepatan partikel air maka diketahui hasil *tip speed ratio* (TSR) pada turbin kombinasi wells rotor dan darrieus sebesar 1,84 dan pada wells rotor sebesar 2,26.

1.2 Saran-saran

- ~ Perlu adanya pengembangan yang lebih lanjut dalam penelitian tentang turbin kombinasi antara wells dan darrieus untuk mendapatkan efisiensi yang lebih baik.
- ~ Lebih banyak inovasi pada sisi aerofoil dengan penambahan sudut serang untuk meningkatkan tekanan pada bilah turbin sehingga dapat meningkatkan penyerapan energi yang lebih baik.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR PUSTAKA

- Bambang Triatmodjo, (1999), “*Teknik Pantai*”, edisi pertama, BETA, Yogyakarta
- John Twidell, Tony weir, (2006), “*Renwable Energy Resources*”, 2nd edition, Taylor & Francis, London .
- Bernard Le Mehaute, (1976), “*An Introduction hydrodynamics & water waves*”, Springer-Verlag, New York .
- R, Bhattacharyya, M.E. Mc Cormick, 2003, “*Wave Energy Conversion*”, volume 6, series edition, Elseveir Ocean Engineering, New York.
- Herald Vervoorn, 1997, *Wave Energy Conversion*, Thesis, Delf University.
- David G. Dorrell and Min-Fu Hsieh, (2008), “Performance of Wells Turbines for use in Small-Scale Oscillating Water Columns”, ISOPE,.
- Katsuya Takasaki, Manabu Takao, Toshiaki setoguchi, 2014, “Effect Of Blade Shape on the Performance of Wells Turbine for Wave Energy Conversion”, International Scholarly and Scientific Research & Innovation.
- Z. Carija, L. kranjcevic, V. Banic, M. Cavrak, (2012), “Numerical Analysis of Wells Turbine for Wave Power Conversion”, Article Faculty of Engineering, Univirsity of Rijeka.
- Thakker, A., Abdulhadi, R., 2008 : “The performance of Wells turbine under bi-directional airflow, *Renewable Energy*”, 33, 11, 2467–2474.
- Thakker, A., Frawley, P. i Sheik Bajeeet, E., 2001 : “Numerical Analysis of Wells Turbine Perfor- mance Using a 3D Navier-Stokes Explicit Sol ver”. Proceedings of the Eleventh International Offshore and Polar Engineering Conference. Stavanger, Norway, 604-608.
- Gato, L. M. C., and Henriques, J. C. C., 1994, “*Optimization of Symmetrical Blades for Wells Turbine*”, *Air Turbine Development and Assessment for Wave Power Plants*, contract JOU2-CT93-0333, Progress Report, Instituto Superior Técnico, Lisbon.
- Erwandi, 2009, “ The Research On Vertical Axis Marine Current Proceeding Of Ocean Sciene”, *Technology, And Policy Syposium, World Ocean Conference*”, Manado
- Erwandi, 2011, “The Development Of Indonesian Vertical Axis Marine Current Turbine For The Tidal Power Generation”, Indonesia Marine

- El-Sayed, A.F dan Abdel Azim. 1995. "Dynamics of Vertical Axis Wind Turbines (Darrieus Type)". Zagazig University.
- Ion NILA, Radu BOGATEANU, Marcel STERE, 2012, "Small Power Wind Turbine (Type Darrieus)", Romania.
- Hantoro, R., Utama, IK AP., Erwandi, 2009, "Flow Visualization And Shape Mode In The Study Of Vortex Induced Vibration (VIV) And Torsional Vibration (TV) On Vertical Axis Ocean Current Turbine (VAOCT)", *Procedding Of Ocean Sciene, Technology, And Policy*" syposium, world ocean conference, Manado.
- Turaj Ashuri, Gerrard van Bussel, Stefan Mieras, 2012, "Development and Validation of a Computational Model For Design Analysis of a Novel Marine Turbine" Delft The Netherlands.
- Tapan H. Barot, Hitesh Jarwala, Mayur Kevadiya, May 2015, "a Review on Straight Bladed Vertical Axis H-Type Darrieus Wind Turbine", Gujarat, India.
- E. J. Soons, 2007, "Improving the Hydrodynamic Performance of a Combined Wells-Darrieus Rotor", Thesis Master, Delft University of Technology, Delft - Netherlands.
- International Application Published Under Patent Cooperation Treaty (PCT) WO 2010/011133 A1, 2010, "*a Device for the Utilisation of Wave Energy and a Method*".
- International Application Published Under Patent Cooperation Treaty (PCT) WO 2010/062170 A1, 2010, "*an Apparatus for Harvesting Energy from a Body of Water and a Method*"

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BIOGRAFI



Daif Rahuna, dilahirkan di Surabaya pada tanggal 01 Agustus 1974 dari pasangan W. Setiawan (Alm) dan S. Nikmah, merupakan anak pertama dari 2 bersaudara, yang saat ini tinggal di Pagesangan IV Utara Lapangan Blok C no. 6 Surabaya.

Jenjang pendidikan dasar di tempuh selama 6 tahun (tahun 1980-1986) di SDN Ngagel I Surabaya, dan berikutnya melanjutkan pendidikan di SMPN 12 Surabaya (tahun 1986-1989), sedangkan pendidikan menengah di Pendidikan dan Latihan Kejuruan Teknik (DLKT) PT PAL. Indonesia di Ujung Surabaya (tahun 1989-1993). Setelah lulus pada tahun yang sama langsung bekerja di PT PAL. Indonesia di divisi Direktorat Teknologi dan ditempatkan di Laboratorium Hidrodinamika Indonesia yang merupakan kerjasama antara PT. PAL Indonesia dan BPPT. Sambil bekerja melanjutkan kuliah S1 jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik bdi Universitas tujuh belas Agustus 1945 Surabaya (tahun 1994-2001). Pada pertengahan kuliah S1 mengikuti kuliah yang lain di Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya program studi Teknik Bangunan Kapal jenjang pendidikan D3 (tahun 1998-2000).

Pada tahun 1998 hingga sekarang bergabung dengan UPT Balai Teknologi Hidrodinamika BPP Teknologi di Surabaya. Melakukan penelitian dan pengembangan dengan team Pembangkit Listrik Tenaga Arus Laut (PLTAL) sejak tahun 2009 hingga sekarang.

Pada tahun 2014 mendapat kesempatan untuk melanjutkan studi S2 di Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya pada fakultas Teknik Kelautan Jurusan Teknik Sistem dan Pengendalian Kelautan.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

1.1 Kesimpulan

1. Wells rotor yang terpasang horisontal hanya mampu menerima energi gelombang akibat adanya gerakan orbital dari partikel-partikel air dan tidak efektif dalam menerima energi arus air karena sejajar dengan arah aliran partikel air, sedangkan turbin darrieus yang terpasang vertikal sangat efektif dalam menerima energi arus dan tidak efektif dalam menerima energi gelombang. Sehingga penggunaan turbin kombinasi wells dan darrieus sangat efektif dalam menyerap kedua energi baik gelombang maupun energi arus.
2. Pada tinggi gelombang lebih tinggi akan menghasilkan energi yang lebih besar pada periode yang sama. Pada turbin kombinasi dan wells rotor pada pengujian ini dihasilkan putaran turbin yang maksimal pada periode gelombang sebesar 1,5s. Efisiensi maksimal yang diperoleh dari turbin kombinasi wells dan darrieus adalah sebesar 21,6% dan pada wells rotor sebesar 20,8% dengan ketinggian gelombang 0,123 m.
3. Dengan perbedaan tinggi gelombang, putaran turbin yang dihasilkan dan kecepatan partikel air maka diketahui hasil *tip speed ratio* (TSR) pada turbin kombinasi wells rotor dan darrieus sebesar 1,84 dan pada wells rotor sebesar 2,26.

1.2 Saran-saran

- ~ Perlu adanya pengembangan yang lebih lanjut dalam penelitian tentang turbin kombinasi antara wells dan darrieus untuk mendapatkan efisiensi yang lebih baik.
- ~ Lebih banyak inovasi pada sisi aerofoil dengan penambahan sudut serang untuk meningkatkan tekanan pada bilah turbin sehingga dapat meningkatkan penyerapan energi yang lebih baik.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR PUSTAKA

- Bambang Triatmodjo, (1999), “*Teknik Pantai*”, edisi pertama, BETA, Yogyakarta
- John Twidell, Tony weir, (2006), “*Renwable Energy Resources*”, 2nd edition, Taylor & Francis, London .
- Bernard Le Mehaute, (1976), “*An Introduction hydrodynamics & water waves*”, Springer-Verlag, New York .
- R, Bhattacharyya, M.E. Mc Cormick, 2003, “*Wave Energy Conversion*”, volume 6, series edition, Elseveir Ocean Engineering, New York.
- Herald Vervoorn, 1997, *Wave Energy Conversion*, Thesis, Delf University.
- David G. Dorrell and Min-Fu Hsieh, (2008), “Performance of Wells Turbines for use in Small-Scale Oscillating Water Columns”, ISOPE,.
- Katsuya Takasaki, Manabu Takao, Toshiaki setoguchi, 2014, “Effect Of Blade Shape on the Performance of Wells Turbine for Wave Energy Conversion”, International Scholarly and Scientific Research & Innovation.
- Z. Carija, L. kranjcevic, V. Banic, M. Cavrak, (2012), “Numerical Analysis of Wells Turbine for Wave Power Conversion”, Article Faculty of Engineering, Univirsity of Rijeka.
- Thakker, A., Abdulhadi, R., 2008 : “The performance of Wells turbine under bi-directional airflow, *Renewable Energy*”, 33, 11, 2467–2474.
- Thakker, A., Frawley, P. i Sheik Bajeeet, E., 2001 : “Numerical Analysis of Wells Turbine Perfor- mance Using a 3D Navier-Stokes Explicit Sol ver”. Proceedings of the Eleventh International Offshore and Polar Engineering Conference. Stavanger, Norway, 604-608.
- Gato, L. M. C., and Henriques, J. C. C., 1994, “*Optimization of Symmetrical Blades for Wells Turbine*”, *Air Turbine Development and Assessment for Wave Power Plants*, contract JOU2-CT93-0333, Progress Report, Instituto Superior Técnico, Lisbon.
- Erwandi, 2009, “ The Research On Vertical Axis Marine Current Proceeding Of Ocean Sciene”, *Technology, And Policy Syposium, World Ocean Conference*”, Manado
- Erwandi, 2011, “The Development Of Indonesian Vertical Axis Marine Current Turbine For The Tidal Power Generation”, Indonesia Marine

- El-Sayed, A.F dan Abdel Azim. 1995. "Dynamics of Vertical Axis Wind Turbines (Darrieus Type)". Zagazig University.
- Ion NILA, Radu BOGATEANU, Marcel STERE, 2012, "Small Power Wind Turbine (Type Darrieus)", Romania.
- Hantoro, R., Utama, IK AP., Erwandi, 2009, "Flow Visualization And Shape Mode In The Study Of Vortex Induced Vibration (VIV) And Torsional Vibration (TV) On Vertical Axis Ocean Current Turbine (VAOCT)", *Procededing Of Ocean Sciene, Technology, And Policy*" syposium, world ocean conference, Manado.
- Turaj Ashuri, Gerrard van Bussel, Stefan Mieras, 2012, "Development and Validation of a Computational Model For Design Analysis of a Novel Marine Turbine" Delft The Netherlands.
- Tapan H. Barot, Hitesh Jarwala, Mayur Kevadiya, May 2015, "a Review on Straight Bladed Vertical Axis H-Type Darrieus Wind Turbine", Gujarat, India.
- E. J. Soons, 2007, "Improving the Hydrodynamic Performance of a Combined Wells-Darrieus Rotor", Thesis Master, Delft University of Technology, Delft - Netherlands.
- International Application Published Under Patent Cooperation Treaty (PCT) WO 2010/011133 A1, 2010, "*a Device for the Utilisation of Wave Energy and a Method*".
- International Application Published Under Patent Cooperation Treaty (PCT) WO 2010/062170 A1, 2010, "*an Apparatus for Harvesting Energy from a Body of Water and a Method*"

LAMPIRAN

Spesifikasi alat-alat yang dipergunakan dalam pengambilan data pengujian di kolom uji dan validasi generator, antara lain:

1. Wave probe

No	Name	Type	Manufacture
1	Wave Probe	HRIA-1014 600mm	HR Wallingford
2	Wave Probe Monitor Module (WPMM)	HRIA-1018	
3	Wave Probe Mounting Bracket	HRIA-1012	
4	Wave Probe Case	HRIA-1020	
5	Wave Probe Cable	HRIA-1017	
6	Stick Handler with hole		

No	Name	Type	Function	Manufacture
1	SCXI Front Panel	SCXI 1314	front panel untuk modul strain gauge	National Instrument
2	SCXI Front Panel	SCXI 1304	front panel untuk analog module	
3	SCXI Module	SCXI-1102C	analog input module	
4	SCXI Module	SCXI-1520	strain gauge module	
5	SCXI Module	SCXI-1600	16bit USB digitizer module	
6	SCXI Chassis	SCXI-1001	dilengkapi kabel power supply dan kabel USB	

Software: Labview Full Development System versi 2012

2. Torquemeter

- ~ Merk : KISTLER
- ~ Type : 4501 A 20R
- ~ Manufacture : Kistler group
- ~ Range meas. : 0,2-20 Nm
- ~ Bridge resist., strain gage full bridge : 350 nominal
- ~ Made in Swiss

3. Tachometer

- ~ Merk : ONOSOKKI
- ~ Type : digital tachometer HT-5500
- ~ Manufacture : Ono Sokki Cp. Ltd.
- ~ Made in Japan
- ~ Batas pengukuran maksimal 200000 r/min

4. Currentmeter/flowmeter

- ~ Merk : FLOWWATCH
- ~ Type : FL03
- ~ Made in Swiss
- ~ Kecepatan aliran fluida 0,2-4,0 mph (0,1-18 m/s)
- ~ Keakurasian 2-3%
- ~ Putran impeler 0,3 km/H, 0,1 m/s

5. Permanent Magnet Generator

- ~ Type : GL-PMG-1000
- ~ Merk : GINLONG
- ~ Rate power output : 1000 w
- ~ Rotation : 450 rpm
- ~ DC current output : 6 A
- ~ Generator configuration : 3 phase star connected AC output

6. Avometer

- ~ Type : PC510a Digital Multimeter DMM RMS temperature/Digital Multimeter meter
- ~ Merk : SANWA
- ~ Display : Numeral display 5000, bar graph 52 segments
- ~ Sampling : 5times/sec, 60times/s for bar graph
- ~ AC frequency bandwidth : 40Hz-20kHz
- ~ Battery : Approx.120h (manganese battery) at DCV

7. Tank Current

~ Type	:	DCL 1000
~ Merk	:	SANWA
~ Function	:	AC
~ Display	:	4000
~ AC frequency bandwith	:	40Hz-20kHz
~ Battery	:	R03x2

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BIOGRAFI



Daif Rahuna, dilahirkan di Surabaya pada tanggal 01 Agustus 1974 dari pasangan W. Setiawan (Alm) dan S. Nikmah, merupakan anak pertama dari 2 bersaudara, yang saat ini tinggal di PAGESANGAN IV Utara Lapangan Blok C no. 6 Surabaya.

Jenjang pendidikan dasar di tempuh selama 6 tahun (tahun 1980-1986) di SDN Ngagel I Surabaya, dan berikutnya melanjutkan pendidikan di SMPN 12 Surabaya (tahun 1986-1989), sedangkan pendidikan menengah di Pendidikan dan Latihan Kejuruan Teknik (DLKT) PT PAL. Indonesia di Ujung Surabaya (tahun 1989-1993). Setelah lulus pada tahun yang sama langsung bekerja di PT PAL. Indonesia di divisi Direktorat Teknologi dan ditempatkan di Laboratorium Hidrodinamika Indonesia yang merupakan kerjasama antara PT. PAL Indonesia dan BPPT. Sambil bekerja melanjutkan kuliah S1 jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik bdi Universitas tujuh belas Agustus 1945 Surabaya (tahun 1994-2001). Pada pertengahan kuliah S1 mengikuti kuliah yang lain di Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya program studi Teknik Bangunan Kapal jenjang pendidikan D3 (tahun 1998-2000).

Pada tahun 1998 hingga sekarang bergabung dengan UPT Balai Teknologi Hidrodinamika BPP Teknologi di Surabaya. Melakukan penelitian dan pengembangan dengan team Pembangkit Listrik Tenaga Arus Laut (PLTAL) sejak tahun 2009 hingga sekarang.

Pada tahun 2014 mendapat kesempatan untuk melanjutkan studi S2 di Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya pada fakultas Teknik Kelautan Jurusan Teknik Sistem dan Pengendalian Kelautan.