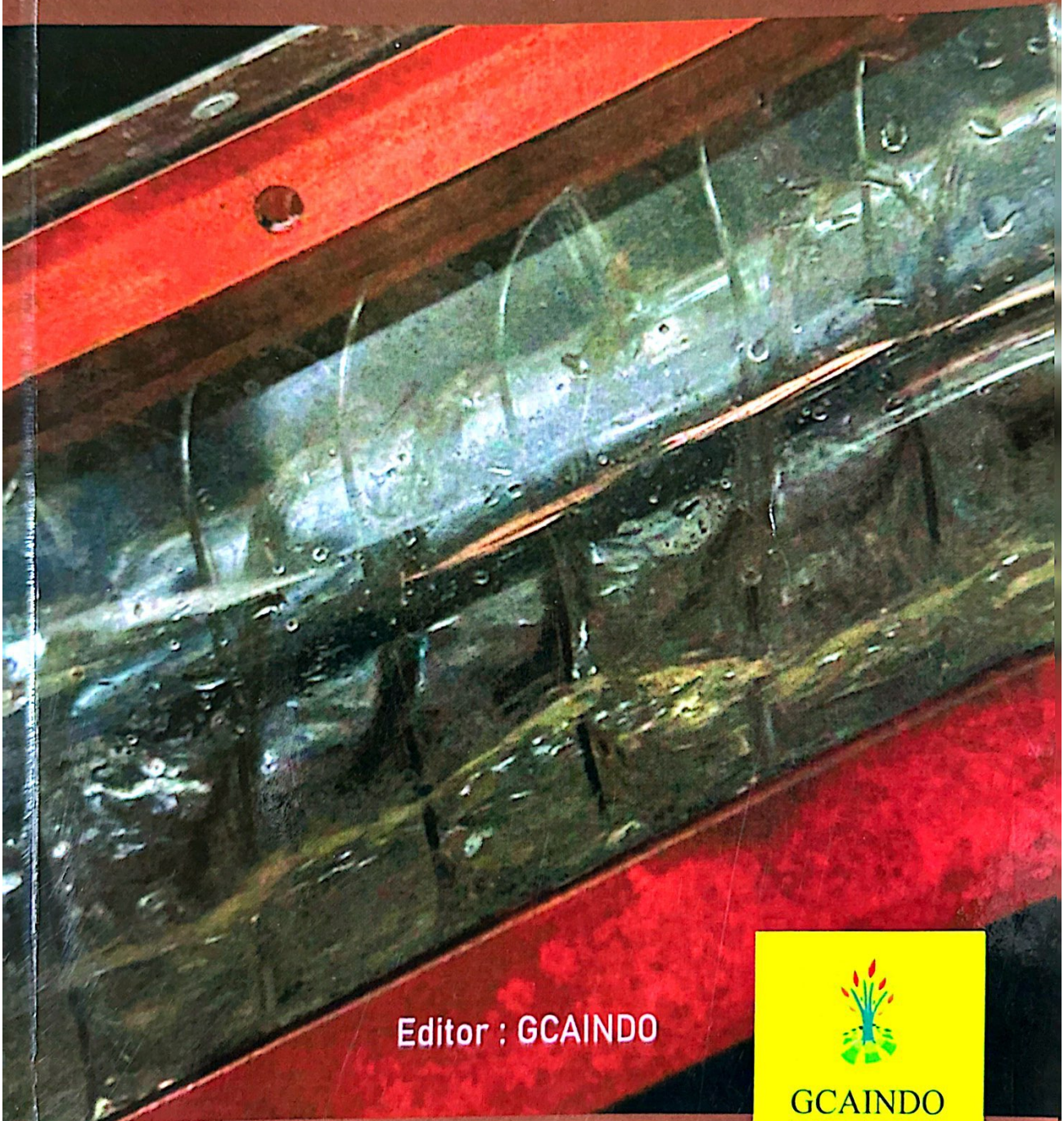


Dr. Tineke Saroinsong, S.S.T., M.Eng.

# **ALIRAN FLUIDA**

pada

## **TURBIN ULIR ARCHIMEDES TIGA SUDU**



Editor : GCAINDO



**GCAINDO**  
inspiring and empowering

## Kata Pengantar

Masalah krisis energi listrik yang terjadi di dunia saat ini menjadi perhatian untuk meneliti energi alternatif (*renewable energy*), karena masih banyak desa-desa terpencil di Indonesia sampai saat ini belum dijangkau listrik dari PLN. Buku ini membahas analisis eksperimental turbin ulir Archimedes yang diaplikasikan sebagai pembangkit listrik tenaga mikrohidro untuk *head* rendah difokuskan pada aliran fluidanya.

Aliran fluida turbin ulir adalah aliran yang tidak terisi penuh, terdapat permukaan bebas antara fluida air dan udara atmosfer. Selain geometri ulir, permukaan bebas pada turbin ulir memungkinkan terjadinya fenomena aliran yang penting pada proses pembangkitan daya turbin ulir. Gaya penggerak utama dari turbin ulir Archimedes adalah berat fluida—gaya gravitasi dipengaruhi oleh kedalaman aliran masuk dan kecepatan aliran masuk serta kemiringan poros turbin. Parameter tak berdimensi bilangan Froude ( $Fr$ ) dipakai untuk analisis dihubungkan dengan efisiensi turbin ulir.

Tujuan penulisan buku ini adalah agar pembaca dapat mengerti fenomena aliran fluida saat pembangkitan daya turbin ulir Archimedes tiga sudu diamati dari visualisasi aliran, putaran turbin, dan torsi. Parameter yang diamati divariasikan pada kedalaman aliran masuk sebagai panjang karakteristik  $y$  bilangan Froude, kecepatan aliran masuk  $c_0$ , dan kemiringan poros turbin  $\alpha$ .

Pembahasan meliputi fenomena aliran fluida di antara sudu-sudu ulir terjadi gelombang pusaran air atau *vortex* akibat momentum linear berupa gaya hidrostatis terhadap sudu ulir yang terjadi pada dua arah berlawanan dan efek dari momentum angular dari poros turbin. Model turbin ulir dibuat skala laboratorium menggunakan material *acrylic*. Bentuk geometrinya tiga sudu dengan masing-masing tujuh ulir, jumlah lilitan ulir 21, sudut sudu ulir  $30^\circ$ , rasio radius 0,54 dengan jarak kisar  $2,4 R_0$ .

*Vortex* mempengaruhi proses pembangkitan daya turbin ulir karena sebagian energi kinetik yang masuk ke turbin ulir tersedot pada *vortex* di antara sudu-sudu ulir, namun fenomena ini dapat berkurang jika kemiringan poros turbin diperkecil. Jika bilangan Froude naik, aliran di antara sudu terjadi gelombang *vortex* yang

## Summary

Electrical energy crisis is occurring in the world today to be attentive to investigate alternative energy (renewable energy). Because there are many isolated villages in Indonesia has yet to reach electricity. Experimental study Archimedes screw turbine that is applied as micro hydro power plant for low head focused on the flow of the fluid. Fluid flow screw turbine flow is not fully charged, there is a free surface between the fluid water and atmospheric air. In addition to the screw geometry, the free surface of the turbine screw allows the flow phenomena that are important in the process of power generation turbine screw. The main driving force of the Archimedes screw turbine is the weight of the fluid-gravity is affected by the depth of the inflow and inflow velocity and the slope of the turbine shaft. Parameter dimensionless Froude number ( $Fr$ ) is used for the analysis associated with screw turbine efficiency. The purpose of this study is to reveal the fluid flow phenomena when Archimedes screw turbine power generation observed three blades of flow visualization, a turbine wheel and torque. The parameters were observed to vary in depth inflows as the characteristic length  $y$  Froude number, inflows velocity  $co$ , and the slope of the turbine shaft  $\alpha$ . Screw turbine models were made at laboratory scale using acrylic material. The geometric form of three blades with each of the seven screws, the number of helix turn is 21, the angle of screw blade of 300, radius ratio 0.54 with  $2.4 R_o$  of pitch. The results of this study revealed the phenomenon of fluid flow between the blades of the screw which occur whirlpool or vortex wave of momentum due to the linear form of the hydrostatic force against the blade screw that occurs in two opposite directions and the effect of the angular momentum of the turbine shaft. Vortex affect screw turbine power generation process for most of the kinetic energy that goes into the turbine screw sucked in the vortex between the blades of the screw, but this phenomenon can be reduced if the slope of the turbine's shaft is minimized. If the Froude number rises, the flow between the blade vortex large waves occurs, then the efficiency of the turbine will go down. The effect of gravity on the Froude number as a result of the tilt axis affects efficiency. The highest efficiency of 89% occurred at an inclination of 250 axis and the flow velocity of 0.5 m/s and the characteristic length of  $1 R_o$  with 0.15 of Froude number.

# Daftar Isi

Kata Pengantar .....	iii
Summary.....	v
Daftar Isi .....	iv
Daftar Gambar.....	viii
Daftar Tabel .....	x
Daftar Simbol.....	xi
Profil Penulis .....	xii
<b>1 Pendahuluan.....</b>	<b>1</b>
1.1 Latar belakang .....	2
1.2 Lingkup bahasan .....	4
1.3 Batasan pembahasan.....	5
1.4 Tujuan pemahaman.....	5
1.5 Manfaat setelah membaca buku .....	5
<b>2 Kajian Pustaka.....</b>	<b>7</b>
2.1 Reviu jurnal.....	8
2.2 Kerangka teori .....	16
2.2.1 <i>Ulir Archimedes</i> .....	16
2.2.2 <i>Turbin ulir Archimedes</i> .....	16
2.2.3 <i>Persamaan momentum</i> .....	18
2.2.4 <i>Aliran saluran terbuka</i> .....	19
2.2.5 <i>Bilangan Froude (Fr)</i> .....	20
2.2.6 <i>Gaya hidrostatis</i> .....	20
2.2.7 <i>Model aliran fluida pada turbin ulir Archimedes</i> ..	22
2.2.8 <i>Debit aliran</i> .....	23
2.2.9 <i>Daya hidrolis turbin ulir Archimedes</i> .....	24
2.2.10 <i>Daya turbin ulir Archimedes</i> .....	25
2.2.11 <i>Efisiensi turbin ulir Archimedes</i> .....	26
<b>3 Konteks Pembahasan .....</b>	<b>29</b>
3.1 Konsep dasar .....	30
3.2 Kerangka konsep.....	31
<b>4 Metode Analisis .....</b>	<b>37</b>
4.1 Deskripsi eksperimental.....	38
4.2 Parameter analisis .....	41
4.3 Prosedur pengujian.....	43

<b>5</b>	<b>Analisis dan Pembahasan .....</b>	<b>51</b>
5.1	Analisis data .....	52
5.1.1	<i>Torsi turbin ulir Archimedes tiga sudu .....</i>	<i>53</i>
5.1.2	<i>Daya turbin ulir Archimedes tiga sudu .....</i>	<i>54</i>
5.1.3	<i>Daya hidrolis turbin ulir Archimedes tiga sudu ....</i>	<i>54</i>
5.1.4	<i>Efisiensi riil turbin ulir Archimedes tiga sudu .....</i>	<i>56</i>
5.1.5	<i>Efisiensi teoritis turbin ulir archimedes tiga sudu</i>	<i>58</i>
5.1.6	<i>Bilangan Froude (Fr) .....</i>	<i>59</i>
5.2	Pembahasan dan diskusi .....	60
5.2.1	<i>Hubungan putaran dan daya turbin ulir archimedes tiga sudu .....</i>	<i>60</i>
5.2.2	<i>Hubungan putaran turbin dan efisiensi turbin ulir Archimedes tiga sudu .....</i>	<i>63</i>
5.2.3	<i>Hubungan kemiringan poros dan efisiensi turbin ulir Archimedes tiga sudu .....</i>	<i>68</i>
5.2.4	<i>Pengaruh kecepatan aliran terhadap efisiensi Archimedes tiga sudu .....</i>	<i>72</i>
5.2.5	<i>Fenomena aliran dan efek bilangan Froude pada turbin ulir Archimedes tiga sudu .....</i>	<i>76</i>
<b>6</b>	<b>Kesimpulan.....</b>	<b>85</b>
	Lampiran.....	87
	Daftar Pustaka .....	95
	Glosarium .....	97
	Indeks.....	99

## Daftar Gambar

Gambar 2.1	Tampilan profil bagian dari ulir Archimedes dua-sudu .....	10
Gambar 2.2	Grafik dari rasio kisar ulir dengan radius luar vs. kemiringan ulir .....	11
Gambar 2.3	Nilai-nilai $\lambda v$ rasio volume tiap lilitan dari ulir dengan ( $N = 3$ ) .....	12
Gambar 2.4	Hubungan antara efisiensi dan $d_1/R$ .....	13
Gambar 2.5	Efisiensi fungsi dari sudut dan jumlah lilitan ulir, $\eta = f(\alpha, m)$ .....	14
Gambar 2.6	Efek rasio kisar terhadap efisiensi turbin ulir Archimedes.....	15
Gambar 2.7	Ulir Archimedes .....	16
Gambar 2.8	Sketsa turbin ulir Archimedes .....	17
Gambar 2.9	Gaya hidrostatis pada dua sisi dinding.....	21
Gambar 2.10	Prinsip pembangkitan daya.....	22
Gambar 2.11	Model aliran fluida pada turbin ulir Archimedes.....	23
Gambar 3.1	Model aliran dan gaya hidrostatis pada sudu turbin ulir Archimedes .....	33
Gambar 4.1	Instalasi pengujian turbin ulir .....	39
Gambar 4.2	Model dan geometri turbin ulir Archimedes tiga sudu .....	40
Gambar 4.3	<i>Tachometer</i> .....	42
Gambar 4.4	<i>Velocitymeter</i> .....	42
Gambar 4.5	Neraca pegas .....	43
Gambar 4.6	Foto turbin ulir tiga sudu yang dibuat .....	44
Gambar 4.7	Foto instalasi pengujian turbin ulir Archimedes .....	45
Gambar 4.8	Foto pengambilan data putaran turbin .....	46
Gambar 4.9	Foto pengukuran torsi.....	46
Gambar 4.10	Foto visualisasi aliran .....	47
Gambar 4.11	Foto pengaturan posisi kemiringan poros turbin ulir .....	47
Gambar 4.12	Foto <i>setting</i> instalasi.....	48
Gambar 5.1	Model pengukuran torsi menggunakan neraca pegas.....	53
Gambar 5.2	Hubungan putaran dengan daya output turbin ulir pada $y = 1 R_o$ dan $c_o = 0,5$ m/s .....	61
Gambar 5.3	Hubungan putaran dengan daya hidrolis pada $y = 1 R_o$ dan $c_o = 0,5$ m/s.....	62
Gambar 5.4	Hubungan putaran dan pada $y = 1 R_o$ .....	65

Gambar 5.5	Hubungan putaran dan $\eta_{real}$ pada $y = 2/3 R_o$ .....	65
Gambar 5.6	Hubungan putaran dan $\eta_{real}$ pada $y = 1/2 R_o$ .....	66
Gambar 5.7	Hubungan kemiringan poros dan $\eta_{real}$ pada $y = 1 R_o$ .....	69
Gambar 5.8	Hubungan kemiringan poros dan $\eta_{real}$ pada $y = 2/3 R_o$ .....	70
Gambar 5.9	Hubungan kemiringan poros dan $\eta_{real}$ pada $y = 1/2 R_o$ .....	71
Gambar 5.10	Pengaruh kecepatan aliran $c_o$ terhadap efisiensi pada $\alpha = 45^\circ$ .....	73
Gambar 5.11	Pengaruh kecepatan aliran $c_o$ terhadap efisiensi pada $\alpha = 35^\circ$ .....	74
Gambar 5.12	Pengaruh kecepatan aliran $c_o$ terhadap efisiensi pada $\alpha = 25^\circ$ .....	75
Gambar 5.13	Efek kemiringan poros terhadap Fr dan $\eta_{real}$ pada $y = 1 R_o$ .....	77
Gambar 5.14	Efek kemiringan poros terhadap Fr dan $\eta_{real}$ pada $y = 2/3 R_o$ .....	78
Gambar 5.15	Visualisasi aliran pada $y = 1 R_o$ dan $V_{ax} = 0,11$ m/s .....	79
Gambar 5.16	Visualisasi aliran pada $y = 2/3 R_o$ dan $V_{ax} = 0,11$ m/s .....	80
Gambar 5.17	Visualisasi aliran pada $y = 1/2 R_o$ dan $V_{ax} = 0,11$ m/s .....	80
Gambar 5.18	Efek kemiringan poros terhadap Fr dan $\eta_{real}$ turbin pada $y = 1/2 R_o$ .....	81
Gambar 5.19	Hasil eksperimen dan hasil analisis.....	84



## Daftar Tabel

Tabel 5.1	Data pengukuran pada variabel kemiringan poros $\alpha = 25^\circ$ .....	52
Tabel 5.2	Data hasil perhitungan pada variabel kemiringan poros $\alpha = 25^\circ$ .....	57



## Daftar Simbol

$\alpha$	kemiringan poros turbin ( $^{\circ}$ )
$H$	head (m)
$\eta$	efisiensi turbin (%)
$\Delta h$	perbedaan head diantara sudu (m)
$\omega$	kecepatan sudut (rad/s)
$g$	gravitasi ( $m/s^2$ )
$\rho$	massa jenis air ( $kg/m^3$ )
$P_{hyd}$	daya hidrolis (watt)
$\gamma$	berat jenis air ( $N/m^3$ )
$y$	panjang karakteristik (m)
$T$	torsi (Nm)
$h_0$	kedalaman aliran masuk (m)
$P$	daya poros turbin (watt)
$Fr$	bilangan Froude
$V_{ax}$	kecepatan transport aksial aliran (m/s)
$S$	kisar (m)
$F$	gaya hidrostatik (N)
$n$	putaran turbin (rpm)
$r_m$	rata-rata jari-jari aritmatik (m)
$R_0$	radius luar (m)
$Q$	debit ( $m^3$ )
$R_i$	radius dalam (m)
$Q_w$	debit yang menghasilkan torsi ( $m^3/s$ )
$N$	jumlah sudu
$Q_G$	debit yang melewati celah antara ulir dan casing ( $m^3/s$ )
$\beta$	sudut ulir ( $^{\circ}$ )
$V_b$	volume bucket ( $m^3$ )
$\lambda_v$	rasio volume tiap putaran
$V_u$	volume tiap bucket $N \times V_b$ ( $m^3$ )
$m$	jumlah lilitan

# PENDAHULUAN

## 1.1 Latar belakang

Penelitian energi terbarukan sekarang ini dikembangkan antara lain pembangkit listrik tenaga mikrohidro yang memanfaatkan energi aliran air sungai. Jenis-jenis turbin yang banyak dikenal dan diaplikasikan pada pembangkit listrik tenaga mikrohidro adalah turbin *crossflow*, turbin kaplan, turbin *propeller*, turbin turgo, turbin Francis dan turbin Pelton. Turbin ulir merupakan jenis turbin yang baru diteliti satu dekade ini, dan cocok digunakan pada *head* rendah ( $H < 10$  m). Turbin ulir diadopsi dari teori Archimedean *screw* yang digunakan sebagai pompa. Melihat potensi aliran sungai yang ada di Indonesia rata-rata memiliki *head* rendah, karena itu turbin ulir sangat cocok untuk pembangkit listrik tenaga mikrohidro di Indonesia. Selain sungai, bisa memanfaatkan potensi saluran irigasi. Turbin ulir memiliki beberapa keunggulan dibandingkan dengan jenis turbin lainnya. Turbin ulir tidak membutuhkan pipa pesat dan sistem kendali khusus, peralatan dan generator standar, mudah dalam pemasangan, mudah perawatan, dan tidak merusak ekologi sungai atau *fish-friendly* (Okot, 2013).

Dalam waktu satu dekade ini beberapa peneliti mengembangkan penelitian turbin ulir baik dari segi perancangan teoritis maupun eksperimental yang berhubungan dengan efisiensi turbin ulir. Optimasi perancangan numerik bentuk geometri ulir oleh (Rorres, 2000) menyatakan bahwa rasio kisar bergantung pada jumlah sudu dan rasio radius ( $R_1/R_0$ ) sama dengan 0,54. kemudian (Müller & Senior, 2009) menyederhanakan teori ulir Archimedes berdasarkan parameter-parameter geometris dan proses konversi energi ideal untuk satu putaran heliks. Hasil penelitiannya

menyatakan bahwa efisiensi turbin ulir dipengaruhi oleh bentuk geometri dan rugi aliran. Selanjutnya Nuembergk dan Rorres (2013) memperkenalkan model analitis aliran masuk turbin ulir dengan memperhitungkan kemungkinan aliran bocor pada celah antara ulir dan silinder luar (*casing*) dan juga kelebihan air pada pusat pipa. Simulasi MATLAB turbin ulir untuk pembangkit listrik tenaga air pada *head* rendah sudah dilakukan oleh (Ali *et al.*, 2013). Modeling dan toritis dari (Müller & Senior, 2009), (Nuembergk & Rorres, 2013), dan (Raza *et al.*, 2013) ini mereka bandingkan dengan eksperimen dari Brada (1996a) dan Brada (1996b).

Hasil-hasil penelitian turbin ulir tersebut di atas secara garis besar adalah perancangan geometris mengenai jarak kisar, jumlah sudu, sudut ulir. Hal yang menarik dari Müller dan Senior (2009) bahwa efisiensi turbin ulir adalah fungsi dari geometri dan rugi-rugi aliran yang belum diidentifikasi. Sama halnya dengan Nuembergk dan Rorres (2013) yang membuat model aliran masuk turbin dengan memperhitungkan kemungkinan aliran bocor pada celah antara silinder luar (*casing*) dan ulir, tapi belum mengidentifikasi karakteristik aliran di antara sudu-sudu akibat kemiringan poros turbin. Berdasarkan hasil-hasil penelitian di atas, perlu dibahas mengenai fenomena aliran fluida pada proses pembangkitan daya turbin ulir.

Kajian turbin ulir secara eksperimental ini, untuk mendapatkan informasi riil agar turbin ulir dapat diaplikasikan atau digunakan secara baik. Turbin ulir Archimedes diaplikasikan pada aliran sungai, saluran irigasi yang merupakan aliran dengan permukaan bebas atau terbuka. Gaya penggerak utama dari aliran

terbuka adalah berat fluida yang dipengaruhi oleh gravitasi, dan distribusi tekanannya adalah hidrostatis. Karakter aliran terbuka dapat diketahui melalui parameter bilangan tak berdimensi, yaitu bilangan Froude ( $Fr$ ). Fokus pembahasan dari buku ini adalah mengenai studi aliran fluida di antara sudu-sudu ulir yang dipengaruhi oleh panjang karakteristik bilangan Froude ( $Fr$ ) dalam hal ini sama dengan kedalaman aliran masuk turbin, kecepatan aliran masuk dan kemiringan poros turbin. Pembahasan dalam buku ini sangat penting dilakukan karena selain bentuk geometri, kinerja turbin ulir Archimedes dipengaruhi oleh aliran fluida sebagai sumber energi kinetik dan energi potensial dalam pembangkitan daya turbin ulir. Pembahasan dalam buku ini bertujuan untuk menjelaskan fakta dan fenomena aliran fluida dalam turbin ulir dan menganalisis kinerjanya. Fakta dan fenomena aliran fluida pada turbin ulir dianalisis dengan konsep persamaan bilangan Froude ( $Fr$ ), persamaan empiris Müller dan Senior (2009) dan Nuembergk dan Rorres (2013).

## 1.2 Lingkup bahasan

Dari latar belakang di atas berikut adalah lingkup bahasan yang dibahas dalam buku ini, yaitu:

1. Pembahasan bagaimana fenomena aliran fluida di antara sudu-sudu turbin ulir Archimedes tiga sudu diberbagai variasi panjang karakteristik ( $y$ ) bilangan Froude ( $Fr$ ), kecepatan aliran masuk ( $c_0$ ) dan kemiringan poros turbin ( $\alpha$ ).
2. Pembahasan bagaimana pengaruh panjang karakteristik ( $y$ ) bilangan Froude ( $Fr$ ), kecepatan aliran masuk ( $c_0$ ) dan

kemiringan poros turbin ( $\alpha$ ) terhadap kinerja turbin ulir Archimedes tiga sudu.

### 1.3 Batasan pembahasan

Kondisi-kondisi yang dibatasi dalam pembahasan buku ini adalah:

- kinerja turbin ulir adalah daya dan efisiensinya;
- aliran fluida dianggap tunak atau *steady*;
- aliran fluida seragam pada semua lilitan ulir; dan
- bentuk geometri berdasarkan parameter ulir archimedes tiga sudu.

### 1.4 Tujuan pemahaman

Buku ini ditulis agar pembaca dapat memahami hal-hal berikut:

1. Fenomena aliran fluida di antara sudu-sudu turbin ulir Archimedes tiga sudu dengan variasi panjang karakteristik ( $y$ ) bilangan Froude ( $Fr$ ), kecepatan aliran masuk ( $c_0$ ) dan kemiringan poros turbin ( $\alpha$ ).
2. Pengaruh panjang karakteristik ( $y$ ) bilangan Froude ( $Fr$ ), kecepatan aliran masuk ( $c_0$ ) dan kemiringan poros turbin ( $\alpha$ ) terhadap kinerja turbin ulir Archimedes tiga sudu.

### 1.5 Manfaat setelah membaca buku

Dua manfaat setelah membaca buku ini adalah:

1. Pembaca menemukan kebaruan dalam turbin ulir Archimedes sebagai pembangkit listrik tenaga mikrohidro, yaitu fenomena

aliran terbuka di antara sudu ulir dengan konsep bilangan Froude ( $Fr$ ) berkaitan dengan kinerja turbin ulir Archimedes tiga sudu.

2. Pembaca menerima informasi dan referensi bagi para peneliti yang ingin mengembangkan pemanfaatan energi terbarukan khususnya pembangkit listrik tenaga mikrohidro jenis turbin ulir Archimedes tiga sudu.

## KAJIAN PUSTAKA

The following text is extremely faint and illegible. It appears to be a list of references or a detailed literature review, but the content cannot be transcribed accurately due to the low contrast and blurriness of the scan.



## 2.1 Reviu jurnal

Nuermbergk dan Rorres (2013), dan Müller dan Senior (2009) menyatakan ulir Archimedes sejak 2000 tahun yang lalu telah digunakan untuk pengairan, drainase air di kapal, dan pertambangan. Saat ini telah ditemukan penggunaan lain dari ulir Archimedes, seperti:

- fasilitas pengolahan air limbah (Nagel & Radlik, 1988);
- stasiun pemompaan air untuk dataran rendah (Rorres, 2000);
- sistem irigasi;
- dam-dam penahan air hujan;
- sistem konveyor; dan
- olahraga air dan fasilitas rekreasi.

Dilihat dari sejarahnya, evolusi ulir Archimedes dan teorinya, seperti yang dibahas oleh Rorres Chris (2000) dan Müller dan Senior (2009). Penggunaan ulir Archimedes sebagai pembangkit listrik tenaga air merupakan hal baru di Eropa (Lashofer *et al.*, 2011).

Rorres Chris (2000) menyatakan dalam penelitian mengenai ulir Archimedes yang digunakan sebagai pompa bahwa bentuk geometri dari ulir Archimedes (*Archimedean screw*) ditentukan oleh beberapa parameter eksternal, yaitu radius luar ulir, panjang total ulir, dan kemiringan peletakan ulir (*slope*). Parameter lain yang mempengaruhi adalah parameter internal, yaitu radius dalam, jumlah sudu dan kisar sudu ulir. Parameter eksternal biasanya ditentukan oleh penempatan letak dari ulir dan seberapa banyak air yang akan diangkat. Jumlah air terangkat tiap satuan waktu dapat juga dinaikkan dengan menaikkan kecepatan putar ulir. Akan tetapi

terdapat batas praktis untuk seberapa cepat dapat memutar ulir, Nagel (1968) menetapkan bahwa kecepatan putar dari ulir dalam putaran per menit harus tidak lebih besar dari  $50/D^{2/3}$ , di mana  $D$  adalah diameter luar silinder dalam meter. Ulir dengan diameter luar 1 meter akan memiliki kecepatan putar 50 rpm. Jika ulir berputar cepat maka akan terjadi turbulensi yang akan mengakibatkan air sulit terangkat. Namun parameter internal bebas dipilih untuk mengoptimalkan kinerja dari ulir. Penelitian Rorres Chris (2000) fokus pada radius dalam dan kisar (*pitch*) untuk memaksimalkan volume air yang diangkat pada satu lilitan ulir. Pada Gambar 2.1, Rorres Chris mendefinisikan tiga parameter eksternal, yaitu:

$R_0$  = radius silinder luar ulir (m),

$L$  = panjang total ulir (m), dan

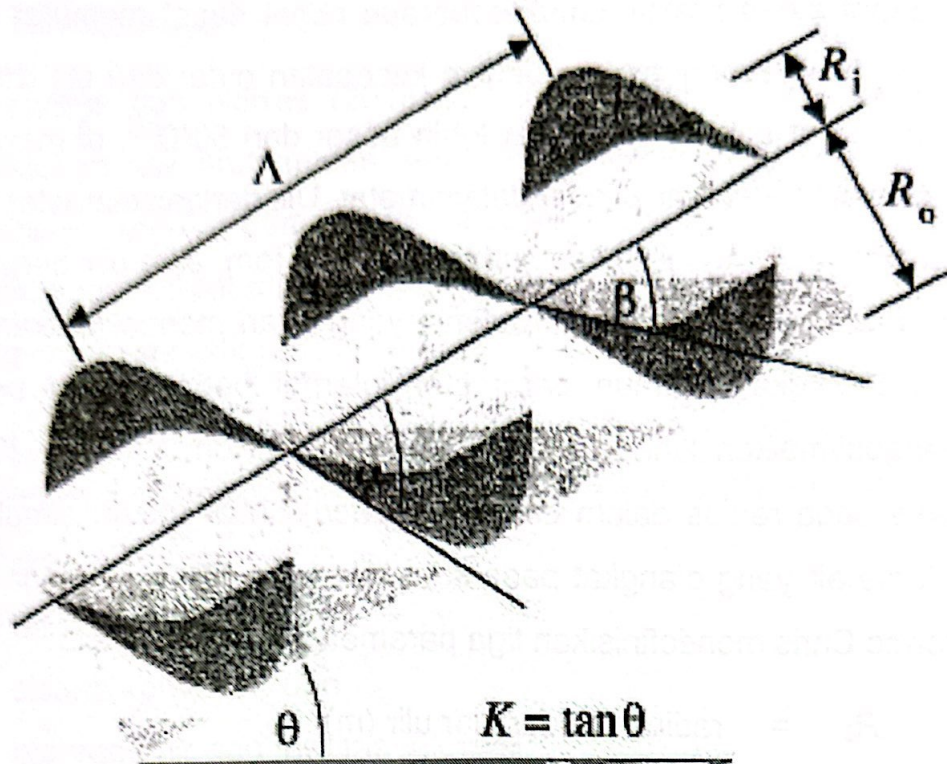
$K$  = kemiringan ulir (tak bersatuan)

Parameter internal untuk melengkapi bentuk geometri ulir, yaitu:

$R_i$  = radius silinder dalam ulir (m),

$A$  = kisar (*pitch*) dari sudu (m), dan

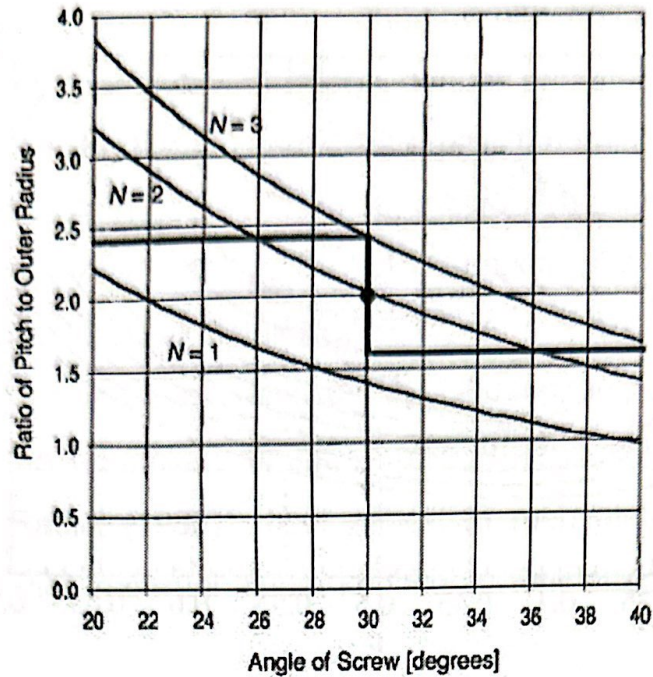
$N$  = jumlah sudu (tak bersatuan).



**Gambar 2.1** Tampilan profil bagian dari ulir Archimedes dua-sudu (Rorres, 2000)

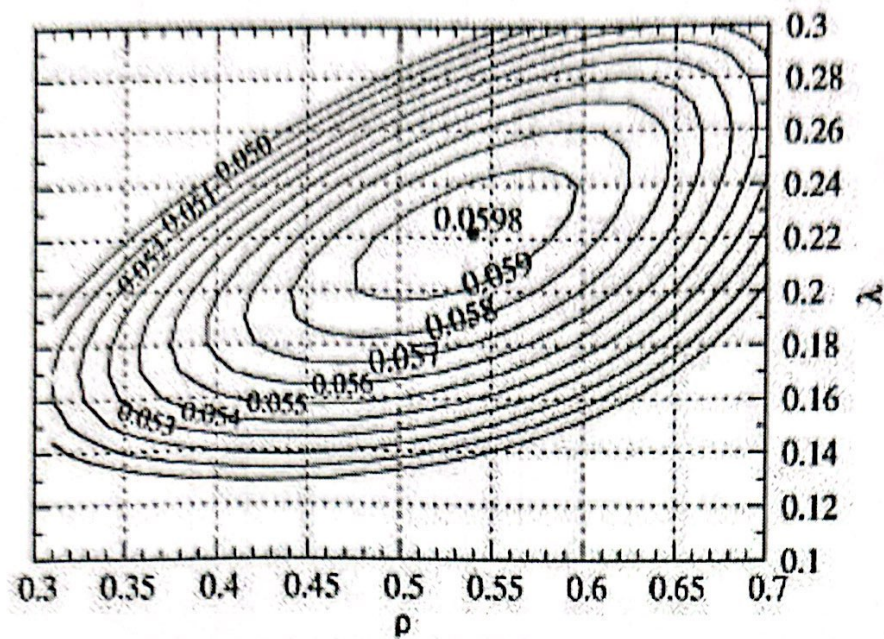
Hasil penelitiannya melaporkan bahwa nilai numerik dari  $\lambda$  (*pitch ratio*) bergantung pada jumlah sudu, dan rasio dari radius dalam dan radius luar adalah 0,54 ketika kisar optimal dipakai.

Hasil penelitiannya melaporkan bahwa nilai numerik dari  $\lambda$  (*pitch ratio*) bergantung pada jumlah sudu, dan rasio dari radius dalam dan radius luar adalah 0,54 ketika kisar optimal dipakai.



**Gambar 2.2** Grafik dari rasio kisar ulir dengan radius luar vs. kemiringan ulir (Rorres, 2000)

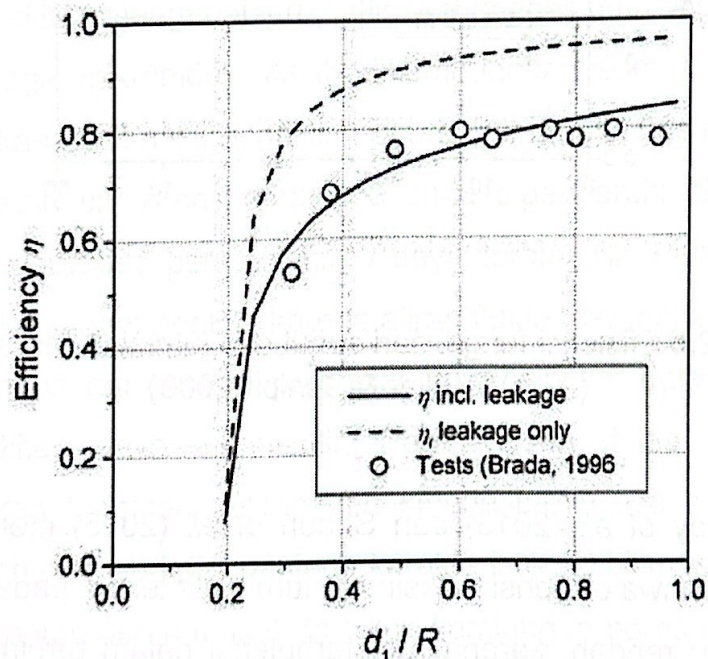
Gambar 2.2 menunjukkan cara sederhana memilih satu, dua dan tiga sudu ulir untuk sudut  $30^\circ$ . Hal yang penting dari optimasi rancangan ulir Archimedes dari (Rorres 2000) adalah rasio volume tiap lilitan ulir tergantung pada jumlah sudu  $N$ , rasio radius  $\rho$ , dan rasio kisar  $\lambda$ . Hasil optimasi nilai-nilai  $\lambda$  v rasio volume tiap putaran atau lilitan ulir untuk  $N = 3$  ditunjukkan Gambar 2.3.



**Gambar 2.3** Nilai-nilai  $\lambda_v$  rasio volume tiap lilitan dari ulir dengan ( $N = 3$ ) (Rorres, 2000)

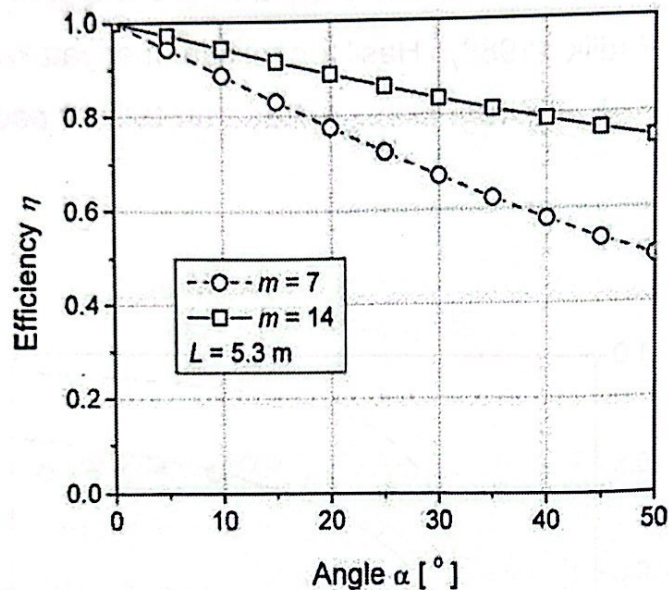
Model analitis aliran air masuk ulir Archimedes dan nilai optimal dari parameter-parameter aliran masuk dilaporkan oleh Nuernbergk dan Rorres (2013). Model ini memperhitungkan kemungkinan aliran bocor yang terjadi karena adanya celah antara ulir dan silinder luar dan juga kelebihan air pada pusat pipa atau tabung ketika ulir diisi air. Hal ini sama seperti yang dilaporkan oleh Müller dan Senior (2009) bahwa efisiensi turbin ulir sangat dipengaruhi oleh rugi-rugi kebocoran yang belum dapat diidentifikasi dan bentuk geometri sudu. Penyederhanakan teori ulir Archimedes berdasarkan parameter-parameter geometris dan proses konversi energi ideal untuk satu putaran dari heliks dan membandingkannya dengan hasil eksperimen yang dilakukan oleh Brada (1999).

Pengujian Brada (1999) terhadap ulir Archimedes yang bekerja sebagai pengkonversi energi, dengan parameter-parameter berikut ini: Panjang  $L = 5,340$  m, Sudut  $\alpha = 26$  derajat, Diameter  $D = 1,050$ , Perbedaan *head*,  $h = 2,350$ , banyaknya lilitan heliks  $m = 14$ , ke dalam aliran masuk  $d_0 = 0,15$  sampai  $0,5$  m. Laju aliran bervariasi dari  $60$  l/detik untuk  $d_0 = 0,15$ , sampai  $320$  l/detik untuk  $d_0 = 0,5$  m. Di mana  $d_1$  adalah  $(\Delta d + d_0)$ , sedangkan  $\Delta d = (L/m) \tan \alpha$ . Dengan menggunakan rumus empiris efisiensi kebocoran dari Nagel dan Radlik (1988). Hasil penelitian menyatakan efisiensi dipengaruhi oleh rugi-rugi akibat kebocoran terlihat pada Gambar 2.4.



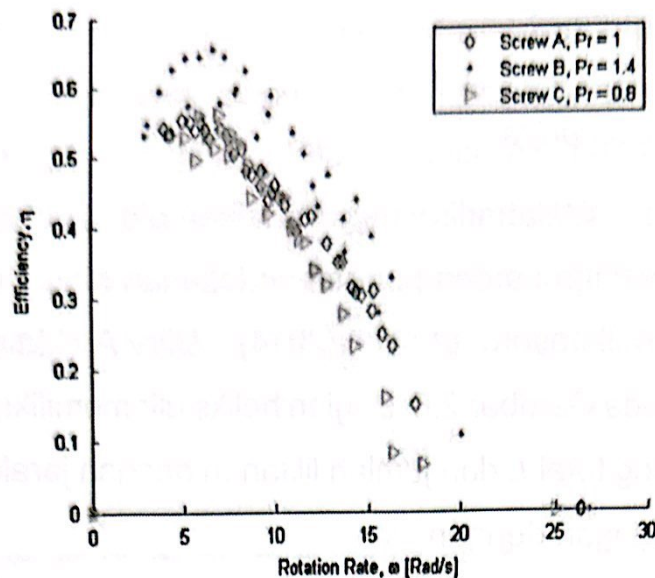
Gambar 2.4 Hubungan antara efisiensi dan  $d_1/R$

Menurut Müller dan Senior (2009), Gambar 2.5 menunjukkan efisiensi sebagai fungsi dari sudut ulir dan banyaknya lilitan yang mengindikasikan bahwa efisiensi naik dengan turunnya sudut dan naiknya jumlah lilitan. Hal ini menunjukkan bahwa khususnya untuk sudut curam jumlah yang lebih tinggi dari putaran atau lilitan yang diinginkan.



**Gambar 2.5** Efisiensi fungsi dari sudut dan jumlah lilitan ulir,  $\eta = f(\alpha, m)$  (Müller & Senior, 2009)

Murray *et al.* (2013) dan Shaun *et al.* (2015) memberikan informasi bahwa efisiensi maksimum turbin ulir terjadi pada putaran turbin yang rendah, karena rugi turbulensi dalam turbin rendah. Gambar 2.6 menunjukkan hubungan kecepatan sudut rata-rata  $\omega$  terhadap efisiensi turbin pada variabel rasio kisar. Hasil penelitiannya rasio kisar 1,4 memberikan efisiensi tertinggi sebesar 67 %.



**Gambar 2.6** Efek rasio kisar terhadap efisiensi turbin ulir Archimedes (Murray *et al.*, 2013; Shaun *et al.*, 2015)

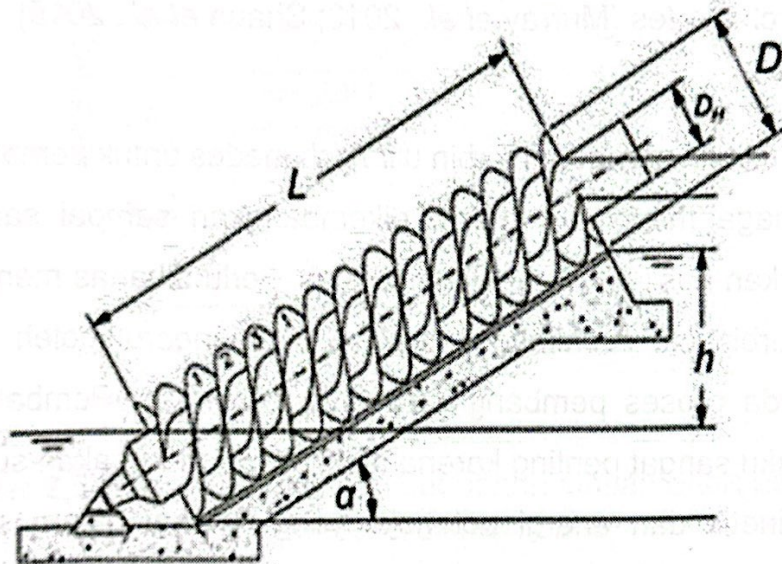
Penelitian mengenai turbin ulir Archimedes untuk pembangkit listrik tenaga mikrohidro masih dikembangkan sampai saat ini. Berdasarkan hasil-hasil penelitian di atas, perlu dibahas mengenai kinerja turbin ulir Archimedes tiga sudu dipengaruhi oleh aliran fluida pada proses pembangkitan daya turbin ulir. Pembahasan dalam buku sangat penting karena aliran fluida merupakan sumber energi kinetik dan energi potensial yang dipakai dalam sistem pembangkitan daya turbin ulir. Pembahasan dalam buku ini menjelaskan fenomena aliran dan kinerja turbin tiga sudu yang disebabkan oleh variabel panjang karakteristik ( $y$ ) bilangan Froude ( $Fr$ ), kecepatan aliran masuk ( $c_0$ ) dan kemiringan poros turbin ( $\alpha$ ). Fakta dan fenomena aliran fluida pada turbin ulir dianalisis dengan konsep persamaan bilangan Froude ( $Fr$ ), persamaan empiris Müller dan Senior (2009) dan Nuembergk dan Rorres (2013).



## 2.2 Kerangka teori

### 2.2.1 Ulir Archimedes

Ulir Archimedes adalah ulir yang ditemukan oleh Archimedes. Ulir Archimedes bekerja karena perbedaan tekanan hidrostatik melalui sudu-sudu, Williamson *et al.* (2014). Ulir Archimedes ideal ditunjukkan pada Gambar 2.6. Bagian heliks ulir memiliki perbedaan *head*  $h$ , panjang total  $L$  dan jumlah lilitan  $m$  dengan jarak horizontal  $l$  yang berhubungan dengan air.

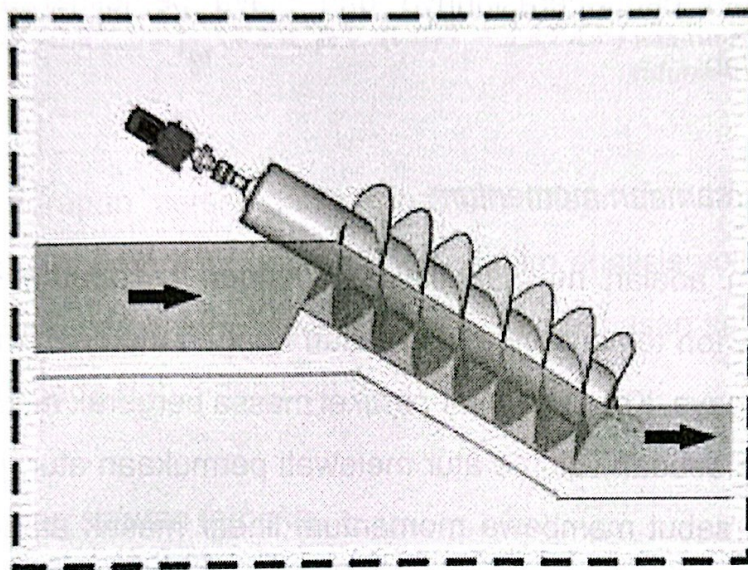


Gambar 2.7 Ulir Archimedes (Müller & Senior, 2009)

### 2.2.2 Turbin ulir Archimedes

Turbin ulir merupakan salah satu turbin yang sangat spesial karena dapat beroperasi pada daerah yang memiliki *head* rendah ( $H < 10$  meter). Energi kinetik dan energi potensial dari aliran air diubah

bentuknya menjadi energi mekanik pada sudu ulir menghasilkan putaran poros turbin yang dapat diubah menjadi energi listrik pada generator melalui transmisi. Berat jenis air pada sudu yang menyebabkan ulir berputar. Dengan asumsi tidak ada rugi-rugi semua energi potensial pada aliran dapat menghasilkan efisiensi maksimum 100 %, (Müller & Senior, 2009). Sketsa turbin ulir seperti Gambar 2.8.



**Gambar 2.8** Sketsa turbin ulir Archimedes (Adly & Arnif (2010))

Menurut Okot (2013), beberapa keunggulan dari turbin ulir Archimedes dibandingkan dengan jenis turbin air lainnya adalah:

- persyaratan teknik atau bangunan sipil relatif rendah;
- tekanan air yang terjadi pada turbin tidak merusak ekologi sungai, yaitu ikan (*fish-friendly*);
- umur turbin lebih tahan lama jika dioperasikan dengan putaran rendah;

- mudah untuk melakukan perawatan dan inspeksi pada turbin;
- tidak memerlukan sistem kontrol yang sangat rumit, seperti turbin lainnya;
- tidak membutuhkan *draft tube*, sehingga dapat mengurangi pengeluaran untuk penggalian pemasangan *draft tube*;
- penggunaan unit peralatan standar dan generator standar dengan biaya yang rendah;
- efisiensi tinggi; dan
- mudah pengoperasiannya dan biaya pemeliharaan yang rendah.

### 2.2.3 Persamaan momentum

Momentum adalah massa dikalikan dengan kecepatan. Hukum kedua Newton tentang gerak berkaitan dengan momentum sistem dan gaya-gaya. Ketika partikel-partikel massa bergerak masuk atau keluar dari sebuah volume atur melewati permukaan atur, partikel-partikel tersebut membawa momentum linear masuk atau keluar. Untuk volume atur yang tetap dan tidak berdeformasi, maka persamaan momentum linear (Munson *et al.*, 2004) adalah:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{cv} V \rho \, dV + \int_{cs} V \rho V \cdot \hat{n} \, dA = \sum F_{\text{kandungan volume atur}} \quad (1)$$

Persamaan momentum linear dapat digunakan untuk menyelesaikan masalah yang menyangkut torsi. Caranya, dengan membentuk momen dari momentum linear dan gaya resultan yang berkaitan dengan setiap partikel fluida terhadap sebuah titik dalam

sebuah sistem koordinat yang inersial sehingga mendapatkan persamaan momen dari momentum yang menghubungkan torsi dan aliran momentum anguler pada sebuah volume atur. Asumsi aliran satu dimensi (terdistribusi seragam dengan kecepatan rata-rata pada tiap bagian), *steady* dalam siklus rata-rata, untuk volume atur yang tetap dan tidak berdeformasi, persamaan momen dari momentum (Munson *et al.*, 2004) adalah:

$$\frac{\partial y}{\partial x} \int_{cv} (rxV) \rho dV + \int_{cs} (rxV) \rho V \hat{n} dA = \sum (rxF)_{\text{kandungan volume atur}} \quad (2)$$

Penerapan persamaan momentum linear dan persamaan momen dari momentum dapat dipakai dalam analisis volume atur pada aliran fluida dalam sudu turbin ulir. Pembahasan selanjutnya dijelaskan pada Bab 3 dan Bab 5.

#### 2.2.4 Aliran saluran terbuka

Aliran saluran terbuka adalah aliran dari suatu cairan dalam wadah dengan permukaan bebas atau saluran yang tidak terisi sepenuhnya. Terdapat permukaan bebas antara fluida yang mengalir (biasanya air) dan fluida di atasnya (biasanya udara atmosfer). Gaya penggerak utama dari aliran ini adalah berat fluida yang dipengaruhi oleh gaya gravitasi fluida untuk mengalir. Aliran saluran terbuka memungkinkan terjadinya fenomena penting di dalam aliran yang tidak mungkin terjadi pada aliran pipa.

Aliran terbuka, baik gravitasi dan inersia cukup penting sehingga bilangan Froude menjadi parameter dalam analisis.

### 2.2.5 Bilangan Froude (*Fr*)

Bilangan Froude merupakan kelompok tak berdimensi yang umum digunakan dalam mekanika fluida. Bilangan Froude adalah indeks rasio antara gaya inersia pada suatu elemen terhadap gaya akibat gravitasi (berat) elemen, persamaannya (Munson *et al.*, 2004) adalah:

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{g \cdot l}} = \frac{\text{gaya inersia}}{\text{gaya gravitasi}} \quad (3)$$

Dengan *Fr* adalah bilangan Froude, *V* adalah kecepatan karakteristik (m/s), *l* = panjang karakteristik (m), dan *g* adalah gravitasi (m/s<sup>2</sup>).

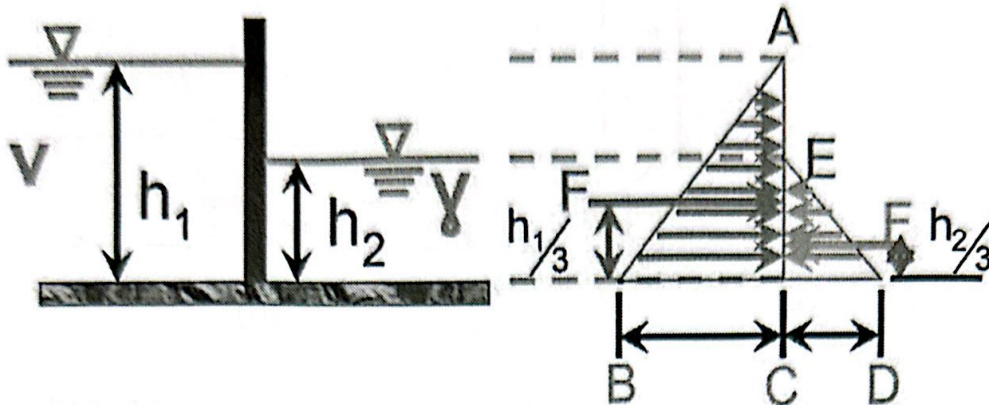
Interpretasi dari bilangan Froude adalah sesuatu yang diukur, atau sesuatu yang ditunjukkan oleh nilai relatif yang penting dari gaya inersia yang bekerja pada partikel fluida terhadap berat partikel. Ini akan menjadi sesuatu hal umum yang penting dalam suatu persoalan aliran dengan permukaan bebas, karena gravitasi secara prinsip mempengaruhi tipe aliran permukaan bebas.

### 2.2.6 Gaya hidrostatik

Gaya hidrostatik adalah gaya yang diakibatkan oleh tekanan fluida statis pada suatu bidang, di mana permukaan bidang berada di dalam cairan. Gambar 2.9 adalah gaya hidrostatik bekerja pada titik berat segitiga ABC dan titik berat segitiga CDE.

Titik berat pada segitiga ABC adalah:  $h_1 = \frac{h_1}{3}$

Titik berat pada segitiga CDE adalah:  $h_2' = \frac{h_2}{3}$



Gambar 2.9 Gaya hidrostatik pada dua sisi dinding (Munson *et al.*, 2004)

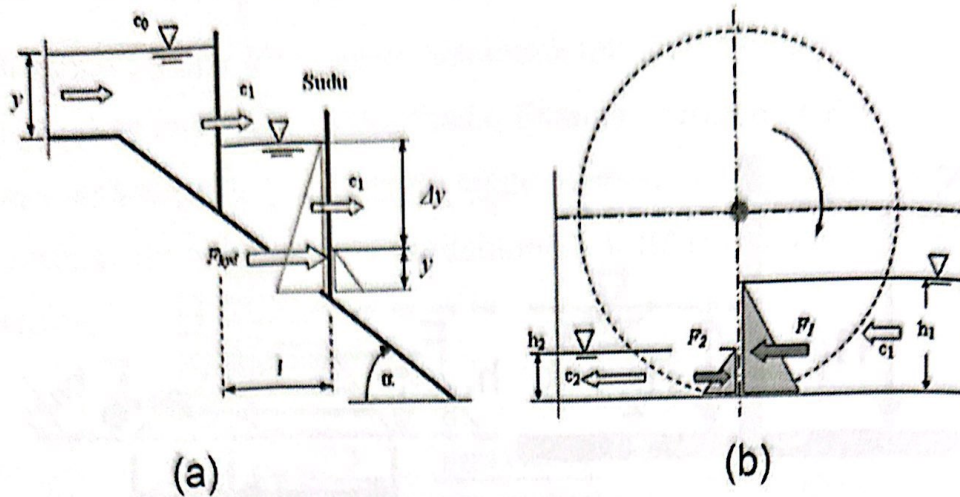
dengan  $h$  adalah tinggi cairan,  $\gamma$  adalah berat jenis dan  $F$  adalah gaya hidrostatik yang bekerja pada dinding (gaya yang menumbuk sudut).

$$\begin{aligned} F_1 &= \text{luas } \Delta ABC \\ &= \frac{1}{2} \gamma_1 h_1 \cdot h_1 = \frac{1}{2} \cdot \gamma_1 h_1^2 \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} F_2 &= \text{luas } \Delta CDE \\ &= \frac{1}{2} \gamma_2 h_2 \cdot h_2 = \frac{1}{2} \cdot \gamma_2 h_2^2 \end{aligned} \quad (8)$$

Besar resultan gaya adalah:  $|F| = |F_1| - |F_2|$

Model analitis dari Müller dan Senior (2009) mengenai sistem pembangkitan daya pada turbin ulir, seperti pada Gambar 2.10.

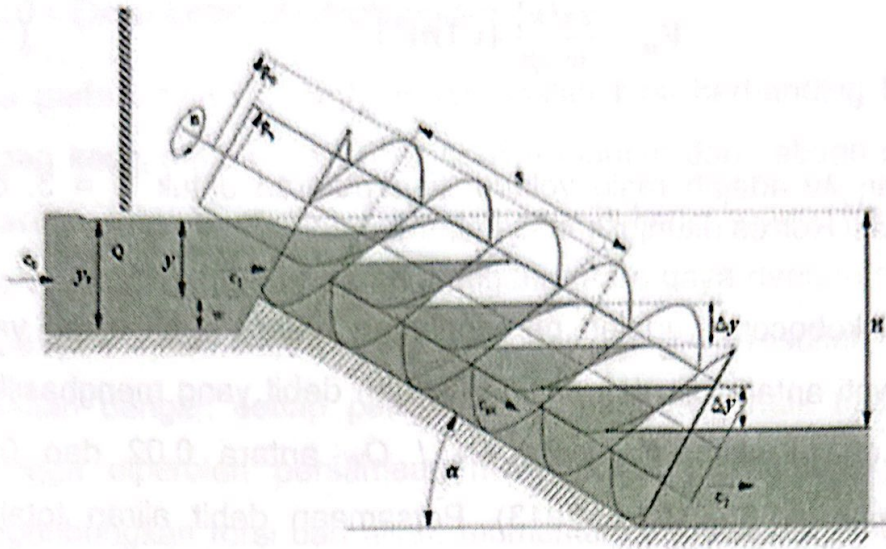


**Gambar 2.10** Prinsip pembangkitan daya: (a) gaya yang bekerja pada sudu; dan (b) tekanan hidrostatik roda (Müller & Senior, 2009)

### 2.2.7 Model aliran fluida pada turbin ulir Archimedes

Aliran fluida pada turbin ulir Archimedes adalah aliran air sungai atau saluran irigasi sebagai sumber energi kinetik dan energi potensial kemudian dikonversi menjadi energi mekanik pada turbin ulir Archimedes. Model aliran fluida pada turbin uir Archimedes ditunjukkan oleh Gambar 2.11.

Secara umum diasumsikan bahwa berat jenis air pada sudu yang menggerakkan ulir berputar (Nagel & Radlick, 1988). Sudu-sudu ulir akan menerima tekanan hidrostatik dari air (Müller & Senior, 2009).



**Gambar 2.11** Model aliran fluida pada turbin ulir Archimedes (Nuembergk & Rorres, 2013)

### 2.2.8 Debit aliran

Energi hidrolis yang dapat dikonversikan menjadi energi putaran ulir Archimedes adalah air dalam volume tiap *bucket*  $V_b$ . Debit aliran yang masuk ke turbin ulir ada yang masuk menumbuk sudu  $Q_w$  dan ada yang melewati celah antara ulir dan *casing*  $Q_g$ . Aliran  $Q_w$  yang menghasilkan torsi dinyatakan oleh (Nuembergk & Rorres, 2013), yaitu:

$$Q_w = V_u \frac{n}{60} \left( \frac{m^3}{s} \right) \quad (13)$$

Dengan  $V_u$  adalah volume setiap  $N$   $V_b$  *bucket*.  $V_u$  tergantung pada jumlah sudu, rasio radius dan rasio kisar.



$$V_u = \frac{2\pi^2 R_0^3}{\tan \beta} \lambda v \quad (\text{m}^3) \quad (14)$$

dengan  $\lambda v$  adalah rasio volume tiap putaran untuk  $N = 3$ , dari optimasi Rorres ditunjukkan Gambar 2.3.

Fraksi kebocoran adalah perbandingan antara debit aliran yang melewati antara ulir dan casing  $Q_G$  dan debit yang menghasilkan torsi  $Q_W$ . Fraksi kebocoran  $Q_G / Q_W$  antara 0,02 dan 0,06 (Nuembergk & Rorres, 2013). Persamaan debit aliran total  $Q$  adalah:

$$Q = Q_W + Q_G \quad (15)$$

### 2.2.9 Daya hidrolis turbin ulir Archimedes

Daya hidrolis ( $P_{\text{hyd}}$ ) adalah daya input yang dibutuhkan oleh turbin ulir Archimedes. Mengacu pada Gambar 2.10, persamaan umum daya hidrolis adalah:

$$P_{\text{hyd}} = \rho * g * Q * H \quad (16)$$

dengan  $P_{\text{hyd}}$  adalah daya hidrolis (watt),  $Q$  adalah debit aliran ( $\text{m}^3/\text{detik}$ ),  $\rho$  adalah massa jenis air ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ),  $g$  adalah percepatan gravitasi ( $9,8 \text{ m}/\text{s}^2$ ),  $H$  adalah *head* turbin (m).

### 2.2.10 Daya turbin ulir Archimedes

Daya pada turbin ulir Archimedes adalah torsi berbanding lurus dengan kecepatan sudut. Torsi adalah momen dari sebuah gaya terhadap sebuah sumbu. Berdasarkan hukum kedua Newton tentang gerak menghasilkan hubungan antara gaya dengan aliran momentum linear. Dari momentum linear dan gaya resultan yang berkaitan dengan setiap partikel fluida dapat dibentuk momen. Sehingga diperoleh persamaan momen dari momentum yang menghubungkan torsi dan aliran momentum angular dari sebuah volume atur. Dengan asumsi kondisi aliran satu dimensi (terdistribusi seragam dengan kecepatan rata-rata pada setiap bagian, dan kondisi aliran *steady*. Persamaannya adalah (Munson *et al.*, 2004):

$$\Sigma(\mathbf{r} * \mathbf{F}) = \int_{cs} (\mathbf{r} * \mathbf{V}) \rho V \hat{\mathbf{n}} * d\mathbf{A} \quad (17)$$

Untuk perhitungan data pengujian dari putaran poros dan pembebanan melalui pengereman pada poros, besarnya torsi dapat dihitung dengan persamaan:

$$T = F * r \quad (18)$$

dengan  $T$  adalah torsi (Nm),  $F$  adalah gaya pengereman melalui neraca pegas ( $N$ ), dan  $r$  adalah jari-jari katrol (m).

Daya poros turbin berhubungan dengan momen puntir poros dan kecepatan sudut  $\omega = 2\pi n/60$ . Sehingga daya turbin ulir dapat dihitung dengan persamaan:

$$P = T * \omega \quad (19)$$

dengan  $P$  adalah daya output turbin ulir Archimedes (watt),  $T$  adalah torsi (Nm), dan  $\omega$  adalah kecepatan sudut (rad/s).

### 2.2.11 Efisiensi turbin ulir Archimedes

Efisiensi teoritis ( $\eta_{th}$ ) turbin ulir Archimedes dapat di hitung menggunakan persamaan:

$$\eta_{th} = \frac{P_t}{P_{hyd}} * 100\% \quad (20)$$

dengan  $\eta_{th}$  adalah efisiensi teoritis turbin ulir Archimedes (%),  $P_t$  adalah daya turbin ulir Archimedes (watt) yang diperoleh secara teoritis,  $P_{hyd}$  adalah daya hidrolis (watt).

Efisiensi riil ( $\eta_{real}$ ) turbin ulir Archimedes adalah perbandingan antara daya *output* (daya turbin ulir) terhadap daya input (daya hidrolis). Persamaan efisiensi riil adalah:

$$\eta_{real} = \frac{P}{P_{hyd}} * 100\% \quad (21)$$

dengan ( $\eta_{real}$ ) adalah efisiensi riil turbin ulir Archimedes (%),  $P$  adalah daya *output* turbin ulir Archimedes (watt) yang diperoleh dari

data pengukuran secara riil, dan  $P_{hyd}$  adalah daya hidrolis atau daya input (watt).

## KONTEKS PEMBAHASAN

### 3.1 Konsep dasar

Turbin ulir diadopsi dari teori Archimedes *screw* baru dikembangkan pada satu dekade ini. Pembahasan turbin ulir Archimedes adalah penerapan ilmu dan teknologi tepat guna yang sangat bermanfaat untuk membantu memecahkan masalah krisis energi listrik dengan memanfaatkan energi terbarukan aliran sungai atau saluran irigasi. Turbin ulir Archimedes diaplikasikan pada aliran sungai, saluran irigasi yang merupakan aliran dengan permukaan bebas atau terbuka. Gaya penggerak utama dari aliran terbuka adalah berat fluida yang dipengaruhi oleh gravitasi, dan distribusi tekanannya adalah hidrostatis. Karakter aliran terbuka dapat diketahui melalui parameter bilangan tak berdimensi, yaitu bilangan Froude ( $Fr$ ). Hal penting yang perlu dikaji adalah fenomena aliran di dalam sudu ulir dihubungkan dengan kinerja turbin ulir. Fokus pembahasan buku ini adalah mengenai studi aliran fluida di antara sudu-sudu ulir yang dipengaruhi oleh panjang karakteristik bilangan Froude ( $Fr$ ) dalam hal ini sama dengan kedalaman aliran masuk turbin, kecepatan aliran masuk dan kemiringan poros turbin. Turbin ulir Archimedes merupakan turbin yang bekerja pada tekanan hidrostatis sehingga tidak dikategorikan sebagai turbin reaksi ataupun turbin impuls.

Pembahasan dalam buku ini sangat penting dilakukan karena selain bentuk geometri, kinerja turbin ulir Archimedes dipengaruhi juga oleh aliran fluida. Dalam pembangkitan daya turbin ulir Archimedes, aliran fluida merupakan sumber energi kinetik dan energi potensial. Buku ini bertujuan untuk menemukan fakta dan fenomena aliran fluida dalam turbin ulir dan menganalisis kinerjanya. Fakta dan fenomena aliran fluida pada turbin ulir

dianalisis dengan konsep persamaan bilangan Froude ( $Fr$ ), persamaan empiris Müller dan Senior (2009) dan Nuembergk dan Rorres (2013).

Buku ini didasarkan dari penelitian yang dilakukan pada skala laboratorium, geometri ulir Archimedes ditentukan berdasarkan parameter dari penelitian Rorres (2000), yaitu jumlah sudu turbin tiga sudu, jarak kisar  $2,4 R_o$ , sudut ulir  $\beta = 30^\circ$ , dan rasio radius 0,54. Metode yang digunakan adalah metode eksperimen skala laboratorium.

### 3.2 Kerangka konsep

Daya turbin ulir Archimedes adalah torsi berbanding lurus dengan kecepatan sudut. Torsi adalah momen dari sebuah gaya terhadap sebuah sumbu. Berdasarkan hukum kedua Newton tentang gerak menghasilkan hubungan antara gaya dengan aliran momentum linear. Dari persamaan momentum linear dapat dikembangkan persamaan momen dari momentum dengan menghubungkan torsi dan aliran momentum angular dari sebuah volume atur. Dengan asumsi kondisi aliran satu dimensi (terdistribusi seragam dengan kecepatan rata-rata pada setiap bagian, dan kondisi aliran *steady*, persamaan momentum linear sama dengan Persamaan (1).

Persamaan momen dari momentum untuk sebuah volume atur yang tetap dan tidak berdeformasi, *steady* dalam siklus rata-rata sama dengan Persamaan (2).

Penerapan persamaan aliran momentum linear (1) pada kandungan volume atur satu dimensi sudu turbin ulir adalah gaya hidrostatis terhadap sudu ulir, ditunjukkan pada Gambar 3.1. Gaya hidrostatis turbin ulir, yaitu resultan gaya hidrostatis sepanjang poros turbin dengan jumlah lilitan ulir  $m$  dan  $S/N$  (kisar per jumlah sudu). Mengacu pada konsep Persamaan (7) dan (8) yang dimasukkan ke Persamaan (1), maka persamaan momentum sebagai gaya hidrostatis aliran pada sudu ulir Archimedes adalah:

$$\int_{cs} V \rho V \hat{n} dA = \sum F_{hyd} = \frac{(y + \Delta y)^2 - y^2}{2} \gamma \left(\frac{S}{3}\right) \cdot m \quad (22)$$

Torsi poros (momen) yang bekerja pada volume atur sama dengan laju aliran momen-momentum (momentum sudut) yang melalui permukaan atur, sama dengan Persamaan (17). Torsi poros turbin ulir adalah resultan gaya hidrostatis (momentum linear) terhadap sudu-sudu turbin ulir menimbulkan reaksi tangensial dari poros turbin sehingga poros berputar berbanding lurus dengan  $r_m$  rata-rata jari-jari aritmatik ( $R_0/2$ ). Sehingga persamaan torsi adalah:

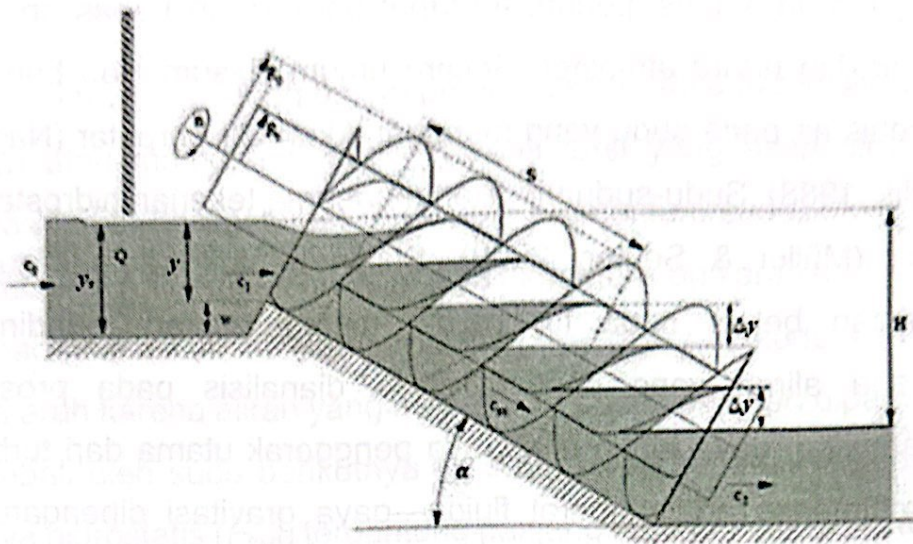
$$T = r_m \cdot \sum F_{hyd} \quad (23)$$

Daya poros turbin berhubungan dengan momen puntir poros (torsi) dan kecepatan sudut  $\omega$ . Persamaan daya turbin ulir sama dengan Persamaan (19) namun untuk torsi diperoleh dari Persamaan (23). Maka persamaan daya turbin ulir secara teoritis ( $P_t$ ) adalah:



$$P_t = T * \omega$$

$$P_t = r_m \sum F_{hyd} * \omega \quad (\text{watt}) \quad (24)$$



**Gambar 3.1** Model aliran dan gaya hidrostatik pada sudu turbin ulir Archimedes

Daya hidrolis ( $P_{hyd}$ ) aliran air adalah daya yang dibutuhkan oleh turbin ulir Archimedes untuk diubah menjadi daya mekanis melalui putaran poros turbin, sehingga daya mekanis ini dapat diubah menjadi daya listrik pada generator melalui transmisi. Dari Persamaan (13), (14) dan (15) dimasukkan ke Persamaan (16) maka persamaan daya hidrolis ( $P_{hyd}$ ) turbin ulir Archimedes adalah:

$$P_{hyd} = \rho \times g \times Q \times H = \rho \times g \times Q \times m \times \Delta y \quad (25)$$

dengan  $m$  adalah jumlah lilitan ulir, dan  $\Delta y$  adalah  $H/m$  atau perbedaan tinggi aliran di antara sudu ( $m$ ). Konsep awal bahwa jika debit ( $Q$ ) dan head ( $H$ ) besar, maka daya hidrolis yang masuk ke turbin ulir akan besar sehingga daya mekanisnya besar.

Aliran fluida yang mengalir pada turbin ulir Archimedes adalah aliran yang tidak terisi penuh, terdapat permukaan bebas antara fluida air dan udara atmosfer. Secara umum diasumsikan bahwa berat jenis air pada sudu yang menggerakkan ulir berputar (Nagel & Radlik, 1988). Sudu-sudu ulir akan menerima tekanan hidrostatik dari air (Müller & Senior, 2009). Selain bentuk geometri ulir, permukaan bebas pada turbin ulir memungkinkan terjadinya fenomena aliran yang penting untuk dianalisis pada proses pembangkitan daya turbin ulir. Gaya penggerak utama dari turbin ulir Archimedes adalah berat fluida—gaya gravitasi dipengaruhi oleh kedalaman aliran masuk sebagai panjang karakteristik ( $y$ ) bilangan Froude ( $Fr$ ) dan kecepatan aliran masuk serta kemiringan poros turbin. Gaya gravitasi akibat posisi kemiringan poros turbin menjadi variabel penting karena secara prinsip mempengaruhi pembangkitan daya turbin ulir. Interpretasi fisik dari bilangan Froude ( $Fr$ ) adalah sesuatu yang diukur, atau sesuatu yang ditunjukkan oleh nilai relatif yang penting dari gaya inersia yang bekerja pada partikel fluida terhadap berat partikel (Munson *et al.*, 2004). Nilai relatif dari gaya inersia yang terukur adalah kecepatan transpor aksial aliran fluida ( $V_{ax}$ ) diperoleh dari putaran turbin ( $n$ ) berbanding lurus terhadap jarak kisar ( $s$ ). Nilai dari kecepatan transpor aksial yang terukur adalah  $V_{ax} = S \times (n/60)$ . Dari Persamaan (3) variabel panjang karakteristik ( $y$ ) adalah merupakan kedalaman aliran masuk turbin dan kecepatan karakteristik adalah kecepatan

transpor aksial ( $V_{ax}$ ). Sehingga persamaan bilangan Froude ( $Fr$ ) menjadi:

$$Fr = \frac{V_{ax}}{\sqrt{g \cdot y}} = \frac{\text{ gaya inersia }}{\text{ gaya gravitasi }} \quad (26)$$

Hal yang penting dalam pembangkitan daya turbin ulir adalah gaya atau momentum sudu. Karena torsi yang akan dihasilkan poros turbin berdasarkan gaya atau momentum sudu. Momentum pada turbin ulir adalah berupa gaya hidrostatis dua arah berlawanan terhadap sudu ulir. Gaya hidrostatis ( $F_{hyd}$ ) di antara sudu ulir terjadi dua arah karena aliran yang menumbuk sudu sebagian dipantulkan kembali oleh sudu berikutnya ke sudu awal, seperti Gambar 3.1. Gaya hidrostatis ( $F_{hyd}$ ) tergantung panjang karakteristik ( $y$ ) bilangan Froude ( $Fr$ ) dan berat jenis fluida air ( $\gamma$ ). Efisiensi teoritis ( $\eta_{th}$ ) turbin ulir diperoleh melalui perbandingan antara daya turbin (daya tiap sudu dikalikan dengan banyaknya lilitan ulir) dan daya hidrolis. Sedangkan efisiensi riil ( $\eta$ ) diperoleh dari perbandingan antara daya *output* turbin (torsi dikalikan dengan kecepatan anguler) dan daya input (daya hidrolis). Pembangkitan daya turbin ulir dengan parameter kecepatan aliran masuk turbin ( $c_o$ ), panjang karakteristik ( $y$ ) bilangan Froude ( $Fr$ ), dan kemiringan poros turbin ( $\alpha$ ) akan mempengaruhi kinerja turbin ulir Archimedes tiga sudu.

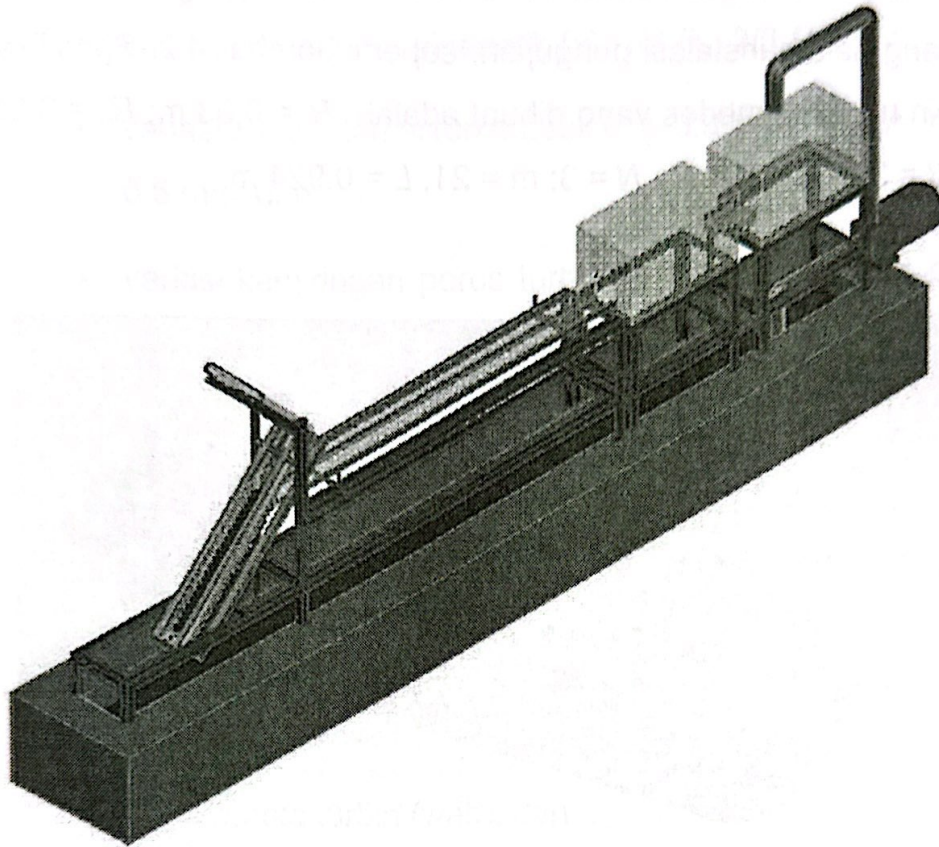
# 4

## METODE ANALISIS

#### 4.1 Deskripsi eksperimental

Dalam eksperimen, dibuat instalasi pengujian turbin ulir tiga sudu skala laboratorium seperti Gambar 4.1. Fluida kerjanya adalah air. Bahan ulir dibuat dari *flexyglass* dengan ukuran pipa untuk poros 60 mm, tinggi sudu 25 mm, jarak kisar  $2,4 R_o$ , rasio radius ( $R_1/R_o$ ) adalah 0,54, jumlah lilitan ulir 21, dan sudut ulir  $30^\circ$ . Model turbin ulir ditunjukkan pada Gambar 4.2. Cara pengambilan data adalah pertama setting instalasi sesuai parameter yang ditentukan dan alat ukur dikalibrasi. *Running test* aliran air dari bak penampung (13) dialirkan melalui pompa (11) dengan spesifikasi  $H_{max}$  22 m, daya 0,75 kW,  $n$  2850 rpm,  $Q_{max}$  600 L/min, ke tangki penampung (8) dengan pengaturan debit melalui katup (10) dan kecepatan aliran diatur melalui elevasi pada tangki penenang (7) dan kontrol elevasi dengan mistar ukur pada pintu keluar tangki (6). Selanjutnya aliran air masuk ke saluran persegi panjang (5) yang berukuran panjang 210 cm dan lebar 12 cm, yang diatur kedalaman aliran masuk turbin sebagai panjang karakteristik  $y$  (4) dengan mistar ukur. Aliran air kemudian masuk ke turbin ulir (1) kemudian ditampung pada bak penampung (13) dan aliran kembali dialirkan ke tangki penampung (8) melalui pompa (11) secara kontinu. Setelah itu mulai proses pengambilan data dengan mengatur posisi kemiringan poros turbin  $\alpha$ , mengatur variabel panjang karakteristik  $y$  dengan cara kontrol pintu air (6) keluar tangki dan kedalaman air pada tangki (7) sampai kondisi *steady*. Data pengukuran diambil, yaitu putaran turbin menggunakan *tachometer*, visualisasi aliran menggunakan kamera digital, dan beban pengereman putaran (torsi) menggunakan neraca pegas (3) yang dihubungkan melalui katrol dan sabuk (2). Data pengukuran diambil masing-masing pada variasi panjang

karakteristik ( $y$ )  $1 R_0$ ,  $2/3 R_0$ ,  $1/2 R_0$  dengan variasi kecepatan aliran ( $c_0$ ) 0,3 m/s, 0,4 m/s, 0,5 m/s pada setiap variasi kemiringan poros ( $\alpha$ )  $25^\circ$ ,  $35^\circ$ ,  $45^\circ$ . Data pengukuran diulang sebanyak tiga kali pada masing-masing variabel.



**Gambar 4.1** Instalasi pengujian turbin ulir

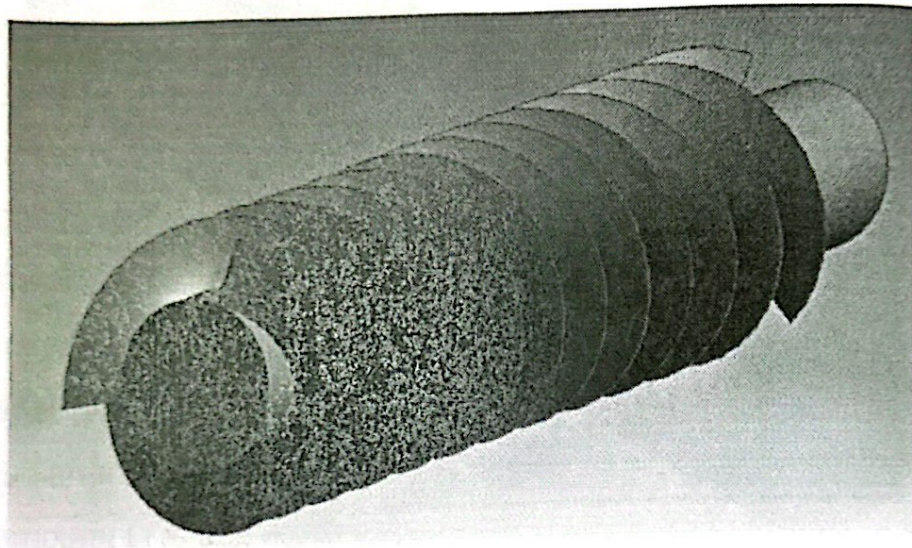
Keterangan gambar instalasi pengujian turbin ulir:

- |                                       |                        |
|---------------------------------------|------------------------|
| 1. Model turbin ulir                  | 2. Tangki penampung    |
| 3. Katrol dan sabuk                   | 4. Pipa                |
| 5. Neraca pegas                       | 6. Katup kontrol debit |
| 7. Mistar ukur kedalaman aliran masuk | 8. Pompa               |

9. Saluran terbuka
11. Pintu air
13. Tangki penenang air

10. Mistar ukur kedalaman di tangki
12. Bak penampung
14. Posisi *tachometer*

Model dan geometri turbin ulir Archimedes yang dibuat dan di pasang dalam instalasi pengujian, seperti Gambar 4.2. Spesifikasi turbin ulir Archimedes yang dibuat adalah:  $R_i = 0,03$  m;  $R_o = 0,055$  m;  $\beta = 30^\circ$ ;  $S = 2,4 R_o$ ;  $N = 3$ ;  $m = 21$ ;  $L = 0,924$  m.



**Gambar 4.2** Model dan geometri turbin ulir Archimedes tiga sudu

## 4.2 Parameter analisis

Parameter analisis ditentukan sesuai variabel bebas, variabel terikat dan variabel terkontrol di bawah ini:

- ✓ Variabel bebas: Variabel yang ditentukan nilainya sebelum melakukan penelitian, yaitu:
  - variasi panjang karakteristik ( $y$ ):  $1/2 R_o$ ,  $2/3 R_o$ ,  $1 R_o$ ;
  - variasi kecepatan aliran masuk ( $c_o$ ): 0,3 m/s, 0,4 m/s, dan 0,5 m/s; dan
  - variasi kemiringan poros turbin ( $\alpha$ ), yaitu:  $25^\circ$ ,  $35^\circ$ , dan  $45^\circ$ .

Ilustrasi variabel ditunjukkan pada Gambar 3.1.

- ✓ Variabel terikat: Variabel yang nilainya sangat tergantung pada variabel bebas, dan merupakan hasil penelitian, yaitu:
  - fenomena aliran (metode visualisasi atau foto),
  - daya hidrolis (watt),
  - daya *output* turbin (watt), dan
  - efisiensi turbin (%).
- ✓ Variasi terkontrol: Variabel yang nilainya dapat di kontrol, yaitu:
  - kemiringan poros  $\alpha$  ( $^\circ$ ).

Alat ukur atau instrumentasi yang akan digunakan adalah:

1. Mistar (mengukur panjang karakteristik ( $y$ ) dan tinggi air di tangki penenang).

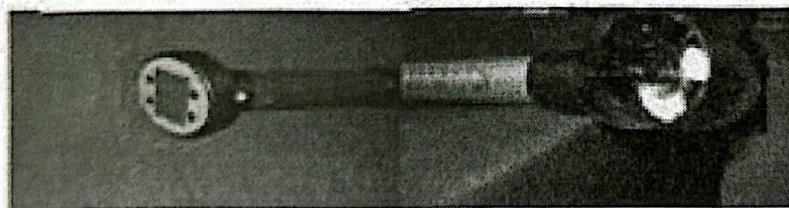


2. *Tachometer* (mengukur putaran turbin) dengan spesifikasi:  
Type: DT-223Y; putaran: 1 – 10.000 rpm.



**Gambar 4.3** *Tachometer*

3. *Velocitymeter* (mengukur kecepatan aliran masuk turbin)

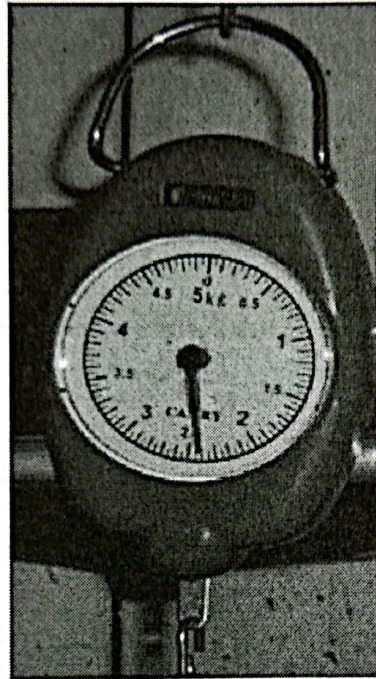


**Gambar 4.4** *Velocitymeter*

4. Kamera digital (visualisasi aliran) dengan spesifikasi: Nikon 90D.

5. Alat ukur torsi menggunakan beban pengereman melalui neraca pegas dihubungkan dengan sabuk dan katrol dari poros turbin. Spesifikasi neraca pegas adalah:

Merek: Camry; kapasitas: 0 – 5 kg



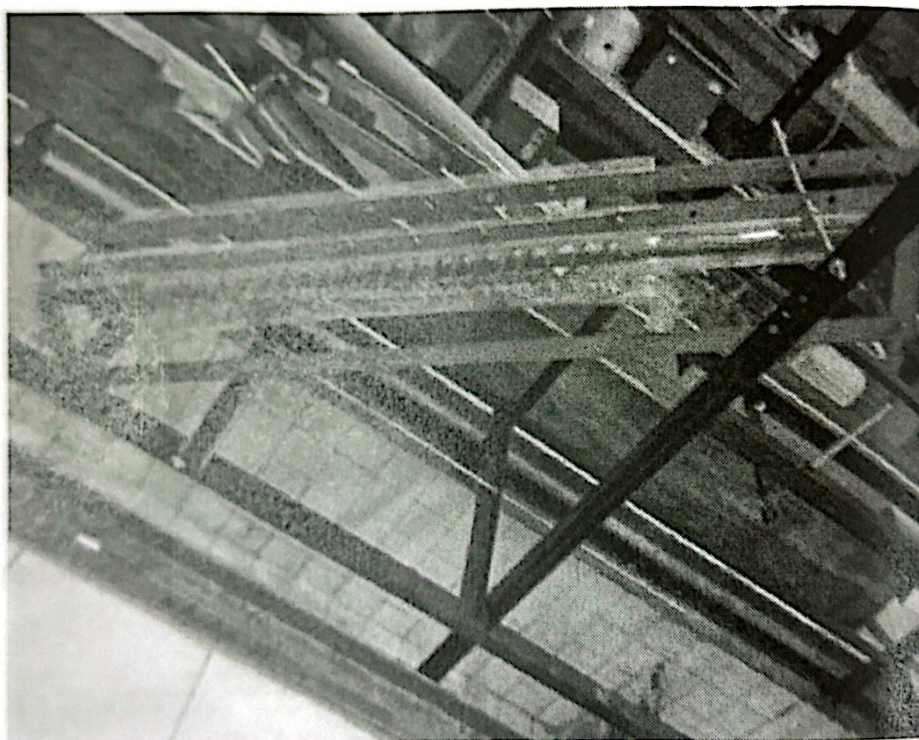
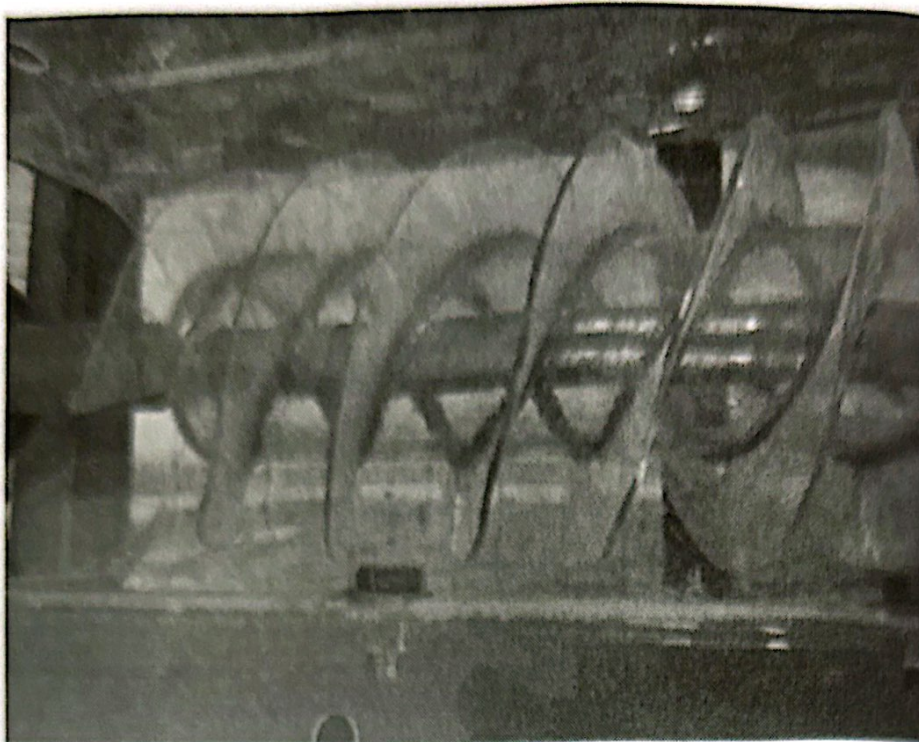
**Gambar 4.5** Neraca pegas

### 4.3 Prosedur pengujian

Prosedur pengujian yang dilakukan dalam analisis adalah sebagai berikut:

#### (A) Persiapan

1. Pembuatan model turbin ulir tiga sudu skala laboratorium.



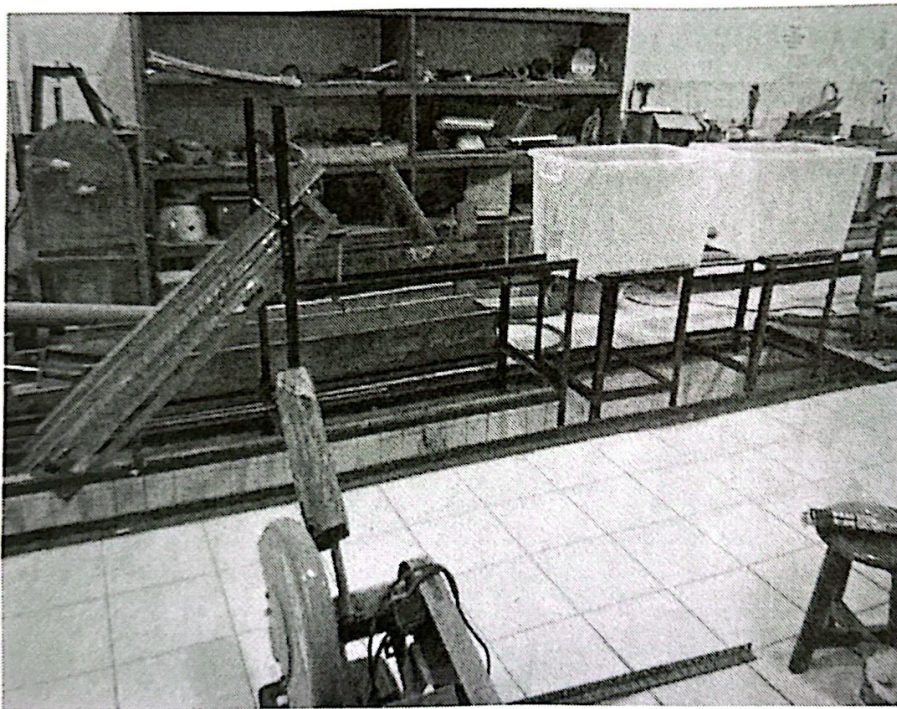
**Gambar 4.6** Foto turbin ulir tiga sudu yang dibuat

2. Pembuatan instalasi.
3. Kalibrasi alat ukur

(B) Pengambilan data

Ada tiga macam data yang diambil, yaitu:

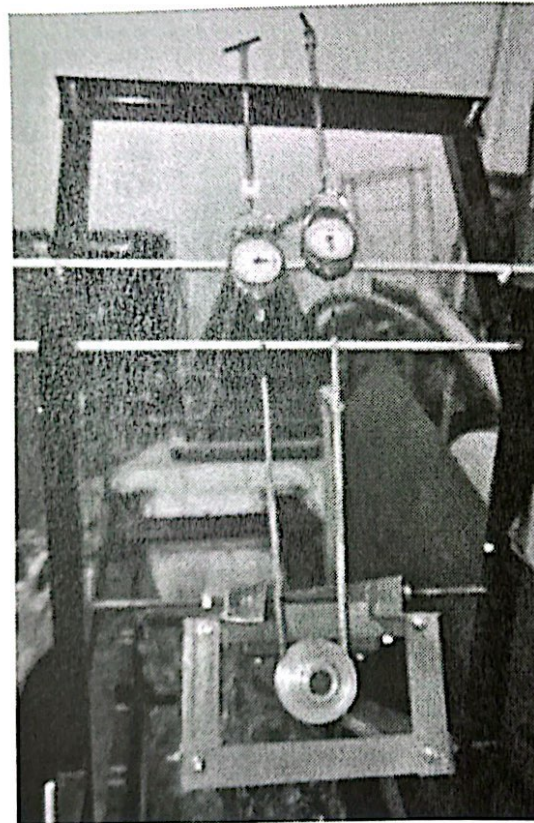
1. Data putaran turbin.
2. Data torsi melalui beban pengereman menggunakan neraca pegas yang dihubungkan pada poros turbin dengan katrol dan sabuk.
3. Data visualisasi aliran menggunakan kamera digital.



**Gambar 4.7** Foto instalasi pengujian turbin ulir Archimedes



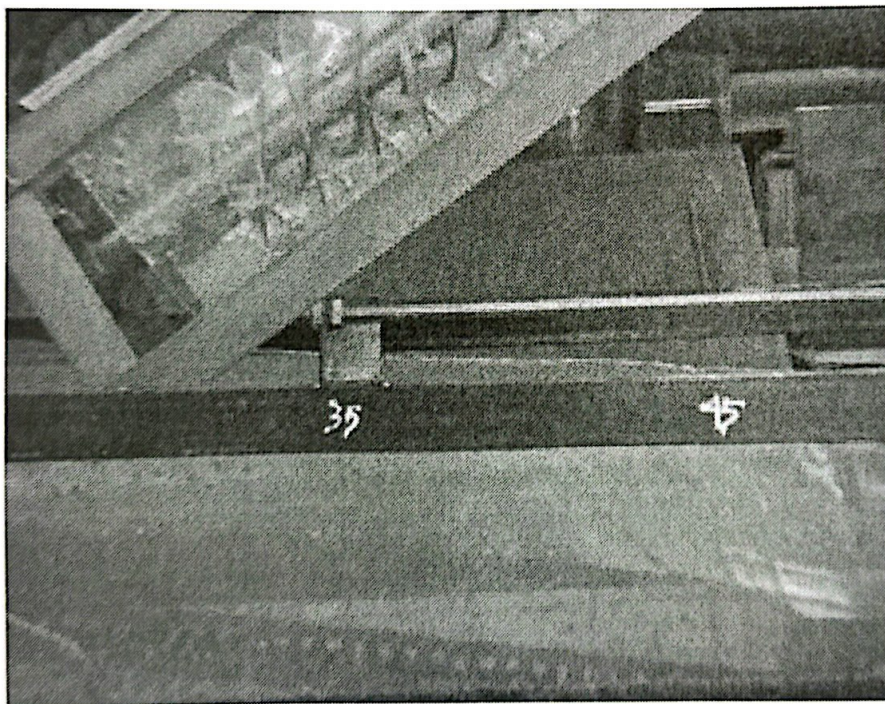
**Gambar 4.8** Foto pengambilan data putaran turbin



**Gambar 4.9** Foto pengukuran torsi



**Gambar 4.10** Foto visualisasi aliran



**Gambar 4.11** Foto pengaturan posisi kemiringan poros turbin ulir



**Gambar 4.12** Foto setting instalasi

Cara pengambilan data adalah sebagai berikut:

1. Mengatur kemiringan poros ( $\alpha$ ) sesuai variabel yang ditentukan;
2. mengatur posisi masing-masing alat ukur dan kamera digital;
3. mengalirkan air dari bak penampung dialirkan melalui pompa (11) dengan spesifikasi  $H_{\max}$  22 m, daya 0,75 kW,  $n$  2850 rpm,  $Q_{\max}$  600 L/min, ke tangki penampung (8) dengan pengaturan debit pada katup (10). Kemudian aliran air mengalir ke tangki penenang (7) dan dikontrol *head* tangki dengan mistar ukur pada pintu air (6). Selanjutnya aliran air masuk ke saluran persegi panjang (5) yang berukuran panjang 210 cm dan lebar 12 cm, kemudian diatur kecepatan aliran ( $c_0$ ) dan panjang karakteristik ( $y$ ) bilangan Froude ( $Fr$ ) pada bagian (4) melalui pintu air (6) dari tangki penenang (7) sampai mencapai kondisi *steady*. Aliran air kemudian masuk ke turbin ulir (1) sehingga turbin ulir berputar dan aliran masuk di bak penampung (13) kemudian kembali dialirkan ke tangki penampung (8) melalui pompa (11) secara kontinu;
4. mulai mengambil data putaran dan beban pengereman putaran (torsi) pada variasi panjang karakteristik ( $y$ ) bilangan Froude ( $Fr$ ) dan kecepatan aliran masuk ( $c_0$ ) pada masing-masing kemiringan poros ( $\alpha$ ) sesuai parameter yang ditentukan;



5. mengukur putaran dengan *tachometer* (14) mulai dengan tanpa pembebanan kemudian mengukur beban pengereman putaran (3) dengan pembebanan setiap penurunan putaran 50 rpm;
6. mencatat data-data pengukuran yang dihasilkan setiap variasi pengukuran;
7. melakukan pengulangan sebanyak tiga kali di setiap variabel analisis;
8. menganalisis data pengukuran yang dihasilkan; dan
9. menarik kesimpulan.

# ANALISIS DAN PEMBAHASAN

No	Uraian	Luas (m <sup>2</sup> )	Tinggi (m)	Volume (m <sup>3</sup> )
1	...	...	...	...
2	...	...	...	...
3	...	...	...	...
4	...	...	...	...
5	...	...	...	...
6	...	...	...	...
7	...	...	...	...
8	...	...	...	...
9	...	...	...	...
10	...	...	...	...
11	...	...	...	...
12	...	...	...	...
13	...	...	...	...
14	...	...	...	...
15	...	...	...	...
16	...	...	...	...
17	...	...	...	...
18	...	...	...	...
19	...	...	...	...
20	...	...	...	...
21	...	...	...	...
22	...	...	...	...
23	...	...	...	...
24	...	...	...	...
25	...	...	...	...
26	...	...	...	...
27	...	...	...	...
28	...	...	...	...
29	...	...	...	...
30	...	...	...	...
31	...	...	...	...
32	...	...	...	...
33	...	...	...	...
34	...	...	...	...
35	...	...	...	...
36	...	...	...	...
37	...	...	...	...
38	...	...	...	...
39	...	...	...	...
40	...	...	...	...
41	...	...	...	...
42	...	...	...	...
43	...	...	...	...
44	...	...	...	...
45	...	...	...	...
46	...	...	...	...
47	...	...	...	...
48	...	...	...	...
49	...	...	...	...
50	...	...	...	...

## 5.1 Analisis data

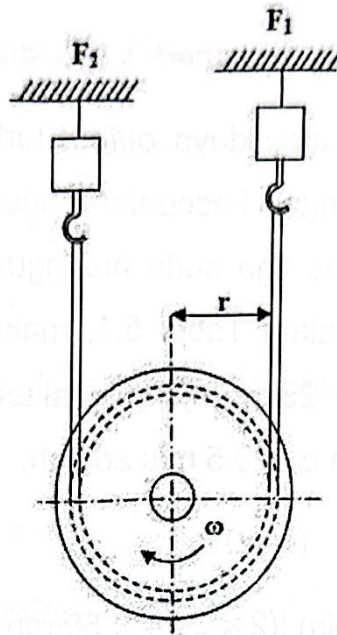
Data yang diperoleh dari variabel pengukuran, seperti Tabel 5.1. Data lengkap dapat dilihat pada Lampiran 1.

Tabel 5.1 Data pengukuran pada variabel kemiringan poros  $\alpha = 25^\circ$

$\alpha$ ( $^\circ$ )	$y$ (m)	$co$ (m/s)	$n$ (Rpm)	$m_2$ (Kg)	$m_1$ (Kg)
25°	0,028	0,3	134	0,00	0,00
25°	0,028	0,3	100	0,07	0,17
25°	0,028	0,3	84	0,10	0,25
25°	0,028	0,3	50	0,22	0,53
25°	0,028	0,3	0	0,40	0,95
25°	0,037	0,4	222	0,00	0,00
25°	0,037	0,4	200	0,02	0,11
25°	0,037	0,4	172	0,05	0,25
25°	0,037	0,4	150	0,09	0,36
25°	0,037	0,4	122	0,15	0,50
25°	0,037	0,4	100	0,22	0,65
25°	0,037	0,4	72	0,30	0,85
25°	0,037	0,4	50	0,39	1,09
25°	0,037	0,4	0	0,60	1,65
25°	0,055	0,5	290	0,00	0,00
25°	0,055	0,5	250	0,04	0,24
25°	0,055	0,5	240	0,05	0,30
25°	0,055	0,5	200	0,09	0,46
25°	0,055	0,5	190	0,10	0,50
25°	0,055	0,5	150	0,18	0,74
25°	0,055	0,5	140	0,20	0,80
25°	0,055	0,5	100	0,28	1,08
25°	0,055	0,5	90	0,30	1,15
25°	0,055	0,5	50	0,54	1,59
25°	0,055	0,5	0	0,85	2,15

### 5.1.1 Torsi turbin ulir Archimedes tiga sudu

Torsi adalah gaya ( $F$ ) berbanding lurus dengan jarak ( $r$ ). Proses pengukuran torsi ditunjukkan Gambar 4.9. Gaya ( $F$ ) diperoleh dari beban pengereman neraca pegas  $F_1$  dan  $F_2$  dan jarak ( $r$ ) diperoleh dari jari-jari katrol yang menghubungkan neraca pegas dengan poros turbin, seperti Gambar 5.1.



**Gambar 5.1** Model pengukuran torsi menggunakan neraca pegas

Jari-jari katrol ( $r$ ) adalah 0,025 m. Menghitung torsi turbin ulir Archimedes tiga sudu menggunakan Persamaan (18). Berdasarkan data dalam Tabel 5.1, maka torsi yang dihasilkan pada kemiringan poros  $\alpha = 25^\circ$ , panjang karakteristik  $y = 1 R_o = 0,055$  m, dan kecepatan aliran  $c_o = 0,5$  m/s adalah:

$$T = F_1 * r - F_2 * r \text{ (Nm)}$$

$$T = (m_1 * g) r - (m_2 * g) r$$

$$T = (1,59 \text{ Kg} * 9,81 \text{ m/s}^2) 0,025 \text{ m} - (0,54 \text{ Kg} * 9,81 \text{ m/s}^2) \times 0,025 \text{ m}$$

$$T = 0,399 - 0,132$$

$$T = 0,267 \text{ Nm}$$

### 5.1.2 Daya turbin ulir Archimedes tiga sudu

Daya turbin ulir ( $P$ ) atau daya *output* turbin ulir adalah torsi ( $T$ ) berbanding lurus dengan kecepatan sudut ( $\omega$ ). Menghitung daya turbin ulir Archimedes tiga sudu menggunakan Persamaan (19). Berdasarkan data dalam Tabel 5.1, maka daya turbin ulir pada kemiringan poros  $\alpha = 25^\circ$ , panjang karakteristik  $y = 1 R_o = 0,055 \text{ m}$ , dan kecepatan aliran  $c_o = 0,5 \text{ m/s}$  adalah:

$$P = T \times \omega \text{ (watt)}$$

$$P = 0,267 \text{ Nm} [(2 \times 3,14 \times 50 \text{ rpm}) / 60]$$

$$P = 1,39 \text{ watt}$$

### 5.1.3 Daya hidrolis turbin ulir Archimedes tiga sudu

Menghitung daya hidrolis ( $P_{\text{hyd}}$ ) atau daya input turbin ulir menggunakan Persamaan (25). Berdasarkan data pengukuran dalam Tabel 5.1, maka daya hidrolis yang dihasilkan pada variabel kemiringan poros  $\alpha = 25^\circ$ , panjang karakteristik  $y = 1 R_o = 0,055 \text{ m}$ , dan kecepatan aliran  $c_o = 0,5 \text{ m/s}$  adalah:

$$P_{\text{hyd}} = \rho \times g \times Q \times H$$

$$= \gamma \times Q \times m \times \Delta y \quad (\text{watt})$$

$$m = \text{jumlah lilitan}$$

$$= 21$$

$$\Delta y = \frac{H}{m}$$

$$H = L \times \sin \alpha$$

$$= 0,924 \text{ m} \times \sin 25^\circ$$

$$= 0,391 \text{ m}$$

$$\Delta y = 0,391 \text{ m} / 21$$

$$= 0,019 \text{ m}$$

Menghitung debit aliran (Q) menggunakan Persamaan (13), (14) dan (15).

$$Q = Q_w + Q_G \text{ (m}^3\text{/s)}$$

$$Q_w = V_u (n/60) \text{ (m}^3\text{/s)}$$

$$Q_G = 0,06 Q_w$$

$$V_u = \frac{2\pi^2 R_o^3}{\tan \beta} \lambda v \text{ (m}^3\text{)}$$

$$= \frac{2(3,14)^2 (0,055)^3}{\tan 30^\circ} 0,059$$

$$= 0,00044 \text{ m}^3$$

$$Q_w = 0,00044 \times (50 \text{ rpm} / 60)$$

$$= 0,00037 \text{ (m}^3\text{/s)}$$

$$\begin{aligned}
 Q &= [V_u \cdot (n / 60)] + (0,06 Q_w) \\
 &= [0,00044 (50 \text{ rpm} / 60)] + (0,06 \times 0,00037) \\
 &= 0,0004 \text{ m}^3/\text{s}
 \end{aligned}$$

Sehingga daya hidrolis ( $P_{\text{hyd}}$ ) diperoleh hasil:

$$\begin{aligned}
 P_{\text{hyd}} &= 1000 \text{ kg/m}^3 \times 9,81 \text{ m/s}^2 \times 0,0004 \text{ m}^3/\text{s} \times 21 \times \\
 &\quad 0,019 \text{ m} \\
 &= 1,56 \text{ watt}
 \end{aligned}$$

#### 5.1.4 Efisiensi riil turbin ulir Archimedes tiga sudu

Menghitung efisiensi riil ( $\eta_{\text{real}}$ ) turbin ulir Archimedes tiga sudu sesuai data yang diperoleh dari pengukuran eksperimental di laboratorium. Dari hasil perhitungan daya hidrolis ( $P_{\text{hyd}}$ ) dan daya *output* turbin ulir Archimedes ( $P$ ) di atas, efisiensi riil ( $\eta_{\text{real}}$ ) turbin ulir Archimedes dapat diketahui dengan menggunakan Persamaan (21). Sehingga, efisiensi riil ( $\eta_{\text{real}}$ ) yang dihasilkan pada variabel kemiringan poros  $\alpha = 25^\circ$ , panjang karakteristik  $y = 1 R_o = 0,055 \text{ m}$ , dan kecepatan aliran  $c_o = 0,5 \text{ m/s}$  adalah:

$$\begin{aligned}
 \eta_{\text{real}} &= \frac{P}{P_{\text{hyd}}} \times 100\% \\
 &= \frac{1,39}{1,56} * 100\% \\
 &= 89,1 \%
 \end{aligned}$$

Data hasil perhitungan torsi ( $T$ ), daya turbin ( $P$ ), daya hidrolis ( $P_{\text{hyd}}$ ) dan efisiensi riil ( $\eta_{\text{real}}$ ) turbin ulir Archimedes tiga sudu pada kemiringan poros  $\alpha = 25^\circ$  dapat dilihat pada Tabel 5.2. Untuk hasil

perhitungan pada variabel  $\alpha = 35^\circ$  dan  $\alpha = 45^\circ$  dan variabel yang ditentukan pada variabel bebas selengkapnya dapat dilihat pada Lampiran 2.

**Tabel 5.2** Data hasil perhitungan pada variabel kemiringan poros  $\alpha = 25^\circ$

$\alpha$ ( $^\circ$ )	$y$ (m)	$c_o$ (m/s)	$n$ (Rpm)	$m_2$ (Kg)	$m_1$ (Kg)	$T$ (Nm)	$P$ (Watt)	$Phyd$ (Watt)	$\eta_{real}$ (%)	$Fr$
25°	0,028	0,3	134	0,00	0,00	0,00	0,00	3,40	0,00	0,52
25°	0,028	0,3	100	0,07	0,17	0,03	0,26	2,54	0,10	0,39
25°	0,028	0,3	84	0,10	0,25	0,04	0,32	2,13	0,15	0,32
25°	0,028	0,3	50	0,22	0,53	0,08	0,40	1,27	0,32	0,19
25°	0,028	0,3	0	0,40	0,95	0,13	0,00	0,00	0,00	0,00
25°	0,037	0,4	222	0,00	0,00	0,00	0,00	5,63	0,00	0,76
25°	0,037	0,4	200	0,02	0,11	0,02	0,45	5,07	0,09	0,69
25°	0,037	0,4	172	0,05	0,25	0,05	0,88	4,36	0,20	0,59
25°	0,037	0,4	150	0,09	0,36	0,07	1,02	3,80	0,27	0,51
25°	0,037	0,4	122	0,15	0,50	0,09	1,10	3,09	0,35	0,42
25°	0,037	0,4	100	0,22	0,65	0,11	1,12	2,54	0,44	0,34
25°	0,037	0,4	72	0,30	0,85	0,13	1,02	1,83	0,56	0,25
25°	0,037	0,4	50	0,39	1,09	0,17	0,90	1,27	0,71	0,17
25°	0,037	0,4	0	0,60	1,65	0,26	0,00	0,00	0,00	0,00
25°	0,055	0,5	290	0,00	0,00	0,00	0,00	8,73	0,00	0,87
25°	0,055	0,5	250	0,04	0,24	0,05	1,28	7,53	0,17	0,75
25°	0,055	0,5	240	0,05	0,30	0,06	1,54	7,23	0,21	0,72
25°	0,055	0,5	200	0,09	0,46	0,09	1,90	6,02	0,32	0,60
25°	0,055	0,5	190	0,10	0,50	0,10	1,95	5,72	0,34	0,57
25°	0,055	0,5	150	0,18	0,74	0,14	2,16	4,52	0,48	0,45
25°	0,055	0,5	140	0,20	0,80	0,15	2,16	4,22	0,51	0,42
25°	0,055	0,5	100	0,28	1,08	0,20	2,05	3,01	0,68	0,30
25°	0,055	0,5	90	0,30	1,15	0,21	1,96	2,71	0,72	0,27
25°	0,055	0,5	50	0,54	1,59	0,27	1,39	1,56	0,89	0,15
25°	0,055	0,5	0	0,85	2,15	0,32	0,00	0,00	0,00	0,00



### 5.1.5 Efisiensi teoritis turbin ulir archimedes tiga sudu

Hasil perhitungan dari data riil yang diperoleh dari pengukuran di laboratorium, dibandingkan dengan perhitungan teoritis sesuai konsep momentum dihubungkan dengan torsi dan aliran pada volume atur. Dengan asumsi aliran satu dimensi, terdistribusi seragam pada semua sudu ulir dan kondisi *steady*. Mengacu pada Persamaan (1) dan Persamaan (22) maka torsi poros turbin ulir merupakan resultan gaya hidrostatis (momentum linear) terhadap sudu-sudu turbin ulir menimbulkan reaksi tangensial dari poros turbin sehingga poros turbin berputar. Berdasarkan Persamaan (23), torsi turbin ulir Archimedes ( $T$ ) dapat dihitung. Contoh menghitung torsi turbin ulir Archimedes secara teoritis pada variabel kemiringan poros  $\alpha = 25^\circ$ , panjang karakteristik  $y = 1 R_o = 0,055$  m, dan kecepatan aliran  $c_o = 0,5$  m/s adalah:

$$T = r_m \sum F_{\text{hyd}} \text{ (watt)}$$

$$\sum F_{\text{hyd}} = \frac{(y + \Delta y)^2 - y^2}{2} \gamma \frac{S}{3} \text{ (m)}$$

$$\sum F_{\text{hyd}} = \frac{(0,055 + 0,019)^2 - 0,055^2}{2} \times 1000 \times 9,81 \times \frac{0,132}{3} \times 21$$
$$\left( \frac{\text{kg m}}{\text{m}^3 \text{ s}^2} \right)$$

$$\sum F_{\text{hyd}} = \frac{0,0022}{2} \times 9810 \times 0,044 \times 21 \left( \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \text{ s}^2} \right)$$

$$\sum F_{\text{hyd}} = 9,97 \text{ N}$$

Jari-jari aritmatik sudu ulir ( $r_m$ ) =  $R_o/2 = 0,0275$  m.

$$T = 0,0275 \text{ m} \times 9,97 \text{ N} = 0,27 \text{ Nm}$$

Dengan menggunakan Persamaan (24), maka daya turbin ulir Archimedes tiga sudu adalah:

$$P_t = T \times \omega$$

$$P_t = 0,27 \text{ Nm} (2 \times 3,14 \times 50 \text{ rpm} / 60)$$

$$P_t = 1,41 \text{ (watt)}$$

$$\text{Daya hidrolis } (P_{hyd}) = 1,56 \text{ (watt)}$$

Maka dengan menggunakan Persamaan (20) efisiensi teoritis turbin ulir Archimedes tiga sudu pada variabel kemiringan poros  $\alpha = 25^\circ$ , panjang karakteristik  $y = 1 R_o = 0,055 \text{ m}$ , dan kecepatan aliran  $c_o = 0,5 \text{ m/s}$  adalah:

$$\eta_{th} = \frac{P_t}{P_{hyd}} \times 100 \%$$

$$\eta_{th} = \frac{1,41}{1,56} \times 100 \% = 90 \%$$

Hasil perhitungan efisiensi teoritis ( $\eta_{th}$ ) adalah 90 % dan hasil perhitungan efisiensi riil ( $\eta_{th}$ ) adalah 88,9%. Hasil ini membuktikan bahwa antara efisiensi turbin ulir secara riil dan secara teoritis menunjukkan kecenderungan yang sama.

#### 5.1.6 Bilangan Froude (Fr)

Bilangan Froude (Fr) merupakan indeks rasio antara gaya inersia fluida (air) pada suatu elemen terhadap gaya akibat gravitasi (berat) elemen, Persamaan (26). Nilai relatif dari gaya inersia yang terukur adalah kecepatan transpor aksial aliran fluida ( $V_{ax}$ ). Kemudian panjang karakteristik ( $y$ ) adalah kedalaman aliran masuk turbin. Contoh menghitung bilangan Froude (Fr) pada variabel kemiringan

poros  $\alpha = 25^\circ$ , panjang karakteristik  $y = 1 R_o = 0,055$  m, putaran turbin  $n = 50$  rpm, jarak kisar  $s = 0,132$  m, adalah:

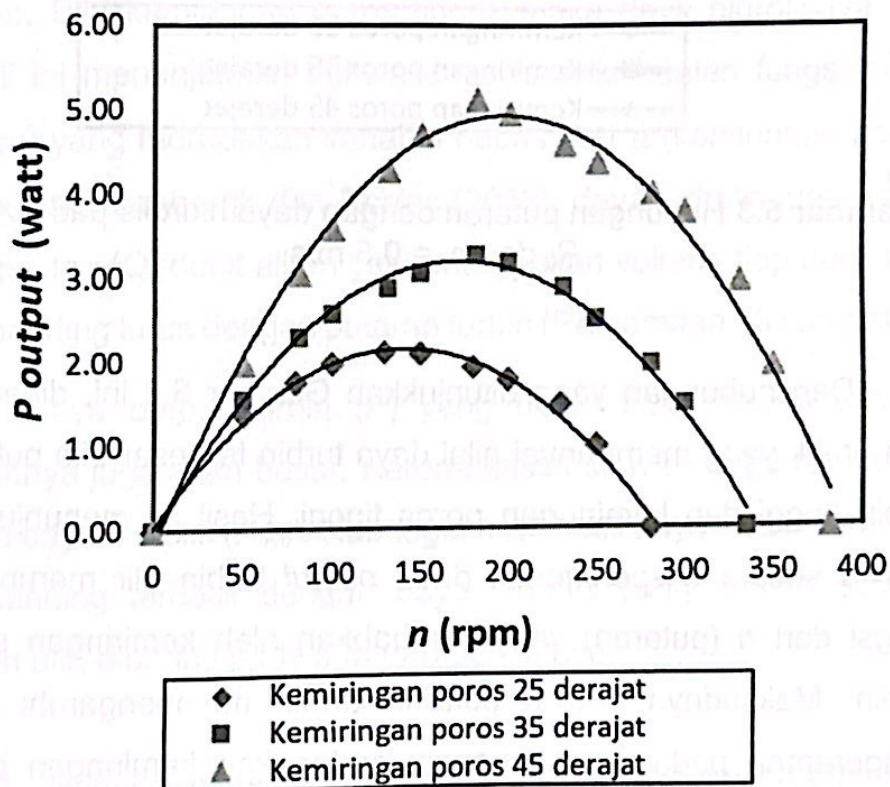
$$\begin{aligned}
 Fr &= \frac{V_{ax}}{\sqrt{g \times y}} \\
 &= \frac{s \left( \frac{n}{60} \right)}{\sqrt{g \times y}} \\
 &= \frac{0,132 \times \left( \frac{50}{60} \right)}{\sqrt{9,81 \times 0,955}} \\
 &= \frac{0,11}{\sqrt{0,54}}
 \end{aligned}$$

## 5.2 Pembahasan dan diskusi

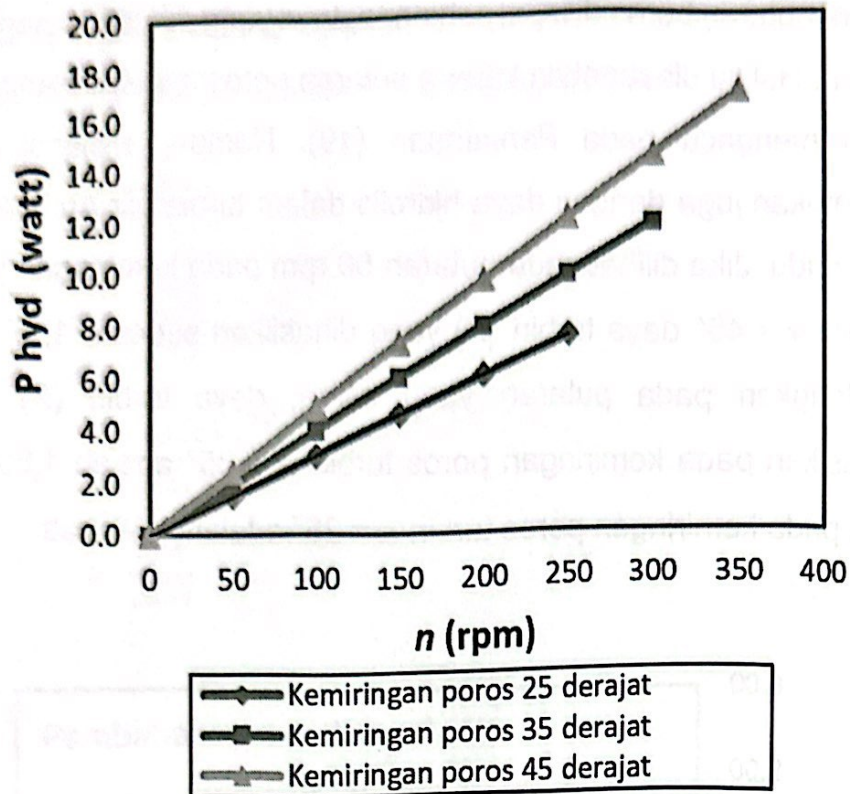
### 5.2.1 Hubungan putaran dan daya turbin ulir archimedes tiga sudu

Daya *output* yang dihasilkan turbin ulir Archimedes tiga sudu berdasarkan hasil pengambilan data dan perhitungan ditunjukkan oleh Gambar 5.2. Hubungan putaran dan daya turbin disajikan pada variabel panjang karakteristik  $y = 1 R_o$  dan kecepatan aliran masuk  $c_o = 0,5$  m/s. Grafik ini menunjukkan kecenderungan titik data putaran poros bergeser kekanan saat kemiringan poros dinaikkan. Dengan kata lain, semakin besar kemiringan poros, semakin tinggi putaran poros. Daya turbin ulir tertinggi pada kemiringan poros  $\alpha = 45^\circ$  sebesar 5,11 watt terjadi pada putaran 182 rpm. Sedangkan pada kemiringan poros  $\alpha = 35^\circ$  mencapai daya sebesar 3,26 watt terjadi pada putaran 182 rpm, dan pada kemiringan poros  $\alpha = 25^\circ$  mencapai daya sebesar 2,11 watt pada putaran 130 rpm. Hasil ini menunjukkan semakin besar kemiringan poros turbin, semakin

besar putaran poros dicapai sehingga daya yang dihasilkan semakin besar. Hal ini disebabkan karena putaran poros menentukan besar torsi mengacu pada Persamaan (19). Namun, efisiensi akan ditentukan juga dengan daya hidrolis dalam turbin ulir Archimedes tiga sudu. Jika dilihat pada putaran 50 rpm pada kemiringan poros turbin  $\alpha = 45^\circ$  daya turbin ( $P$ ) yang dihasilkan sebesar 1,97 watt. Sedangkan pada putaran yang sama, daya turbin ( $P$ ) yang dihasilkan pada kemiringan poros turbin  $\alpha = 35^\circ$  adalah 1,55 watt dan pada kemiringan poros turbin  $\alpha = 25^\circ$  adalah 1,39 watt.



Gambar 5.2 Hubungan putaran dengan daya *output* turbin ulir pada  $y = 1 R_0$  dan  $c_0 = 0,5 \text{ m/s}$



**Gambar 5.3** Hubungan putaran dengan daya hidrolis pada  $y = 1$   
 $R_o$  dan  $c_o = 0,5 \text{ m/s}$

Dari hubungan yang ditunjukkan Gambar 5.2 ini, diperoleh tren grafik yang mempunyai nilai daya turbin terbesar bila putaran turbin tinggi dan kemiringan poros tinggi. Hasil ini menunjukkan bahwa secara eksperimental daya *output* turbin ulir merupakan fungsi dari  $n$  (putaran) yang disebabkan oleh kemiringan poros turbin. Maksudnya adalah putaran turbin mempengaruhi gaya pengereman pada neraca pegas, sedangkan kemiringan poros mempengaruhi besar putaran yang dihasilkan. Secara teoritis, daya turbin ulir merupakan fungsi dari  $n$  (putaran) dan momentum terhadap sudu atau gaya hidrostatis (Persamaan 22 sampai 24). Gambar 3.1 menunjukkan bahwa besar  $\Delta y$  (perbedaan panjang

karakteristik di antara sudu-sudu ulir) dipengaruhi oleh  $\alpha$  (kemiringan poros) sehingga mempengaruhi gaya hidrostatis. Analisis ini juga sama dengan analisis prinsip pembangkitan daya turbin ulir penelitian Müller dan Senior (2009) dalam Gambar 2.9.

Gambar 5.3 menunjukkan hubungan putaran dengan daya hidrolis turbin ulir Archimedes tiga sudu pada variabel panjang karakteristik  $y = 1 R_o$  dan kecepatan airan masuk  $c_o = 0,5$  m/s. Daya hidrolis yang dihasilkan terbesar terjadi pada kemiringan poros turbin  $\alpha = 45^\circ$  sebesar 16, 97 watt terjadi pada putaran 350 rpm. Terlihat daya hidrolis semakin besar jika putaran yang dicapai juga besar. Bila kemiringan poros tinggi, maka daya hidrolisnya naik. Hasil ini menunjukkan bahwa daya hidrolis adalah fungsi dari  $H$  (*head*) yang merupakan variabel bebas dari  $\alpha$  (kemiringan poros). Menurut Nuembergk dan Rorres (2013), daya hidrolis juga adalah fungsi dari ( $Q$ ) debit aliran yang merupakan volume tiap *bucket* ulir berbanding lurus dengan putaran turbin (Persamaan 13 sampai 15).

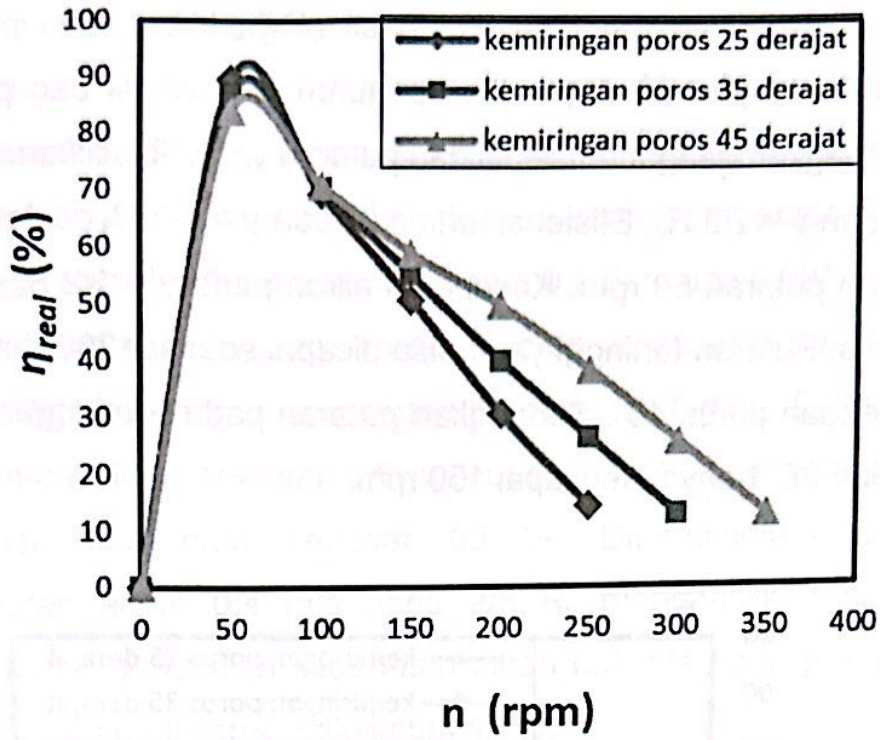
Daya *output* turbin ( $P$ ) yang besar tidak berarti efisiensi turbinnya juga akan besar. Karena efisiensi turbin juga tergantung pada daya hidrolis ( $P_{hyd}$ ). Hubungan dari hasil daya *output* turbin ulir berbanding terbalik dengan daya hidrolis yang adalah efisiensi turbin ulir, dibahas pada sub bab berikutnya.

### 5.2.2 Hubungan putaran turbin dan efisiensi turbin ulir Archimedes tiga sudu

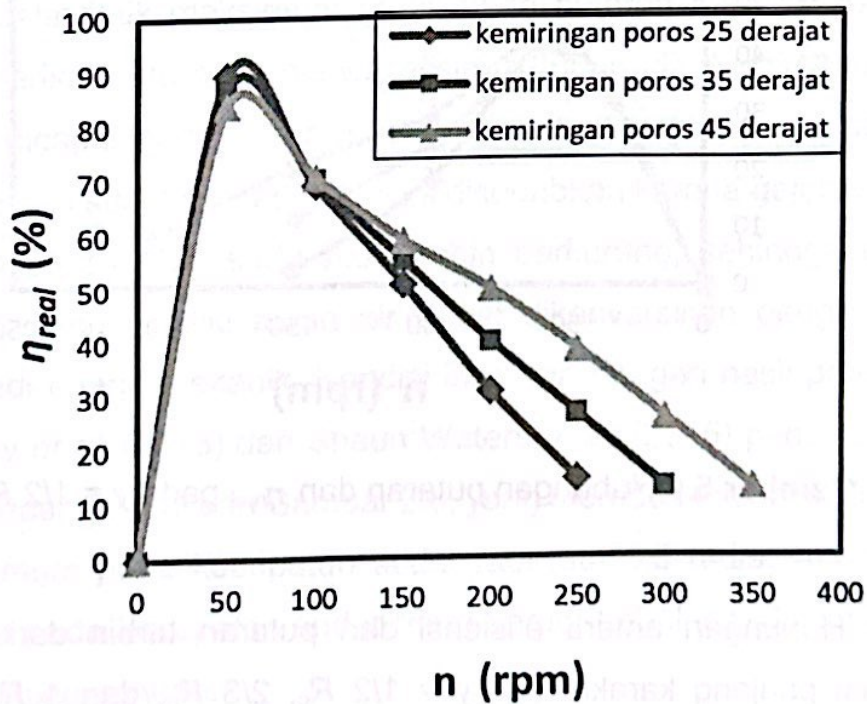
Data hasil analisis disajikan berdasarkan panjang karakteristik  $y = 1/2 R_o$ ,  $2/3 R_o$ , dan  $1 R_o$  dengan hubungan antara efisiensi dan putaran turbin pada masing-masing kemiringan poros  $\alpha 25^\circ$ ,  $35^\circ$ ,

dan  $45^\circ$ . Gambar 5.4 menunjukkan bahwa efisiensi tertinggi sebesar 89 % terjadi pada putaran turbin 50 rpm kemiringan poros turbin  $25^\circ$  dengan  $y = 1 R_0$ . Pada kemiringan poros  $35^\circ$  menghasilkan efisiensi sebesar 86 % dengan putaran turbin yang sama 50 rpm. Sedangkan pada kemiringan poros  $45^\circ$  menghasilkan efisiensi sebesar 84 %. Putaran turbin tertinggi mencapai 350 rpm pada kemiringan poros  $45^\circ$  namun efisiensinya mendekati sama dengan putaran turbin 300 rpm pada kemiringan poros  $35^\circ$  dan putaran turbin 250 pada kemiringan poros  $25^\circ$ , yaitu sebesar 13 %. Kecepatan aliran pada panjang karakteristik  $y = 1 R_0$  ini adalah sebesar 0,5 m/s.

Hasil eksperimen panjang karakteristik  $y = 2/3 R_0$  menunjukkan kecenderungan yang sama dengan  $y = 1 R_0$ . Gambar 5.5 terlihat penurunan efisiensi pada putaran turbin 50 rpm masing-masing kemiringan poros  $25^\circ$  menghasilkan efisiensi sebesar 72 %, kemiringan poros  $35^\circ$  menghasilkan efisiensi 70 % dan kemiringan poros  $45^\circ$  menghasilkan efisiensi 68 %. Efisiensi dan putaran yang dihasilkan pada panjang karakteristik  $y = 2/3 R_0$  lebih rendah dibandingkan dengan panjang karakteristik  $y = 1 R_0$ . Hal ini disebabkan oleh kecepatan aliran pada panjang karakteristik  $y = 2/3 R_0$  sebesar 0,4 m/s lebih rendah dibandingkan dengan kecepatan aliran pada  $y = 1 R_0$  sebesar 0,5 m/s.



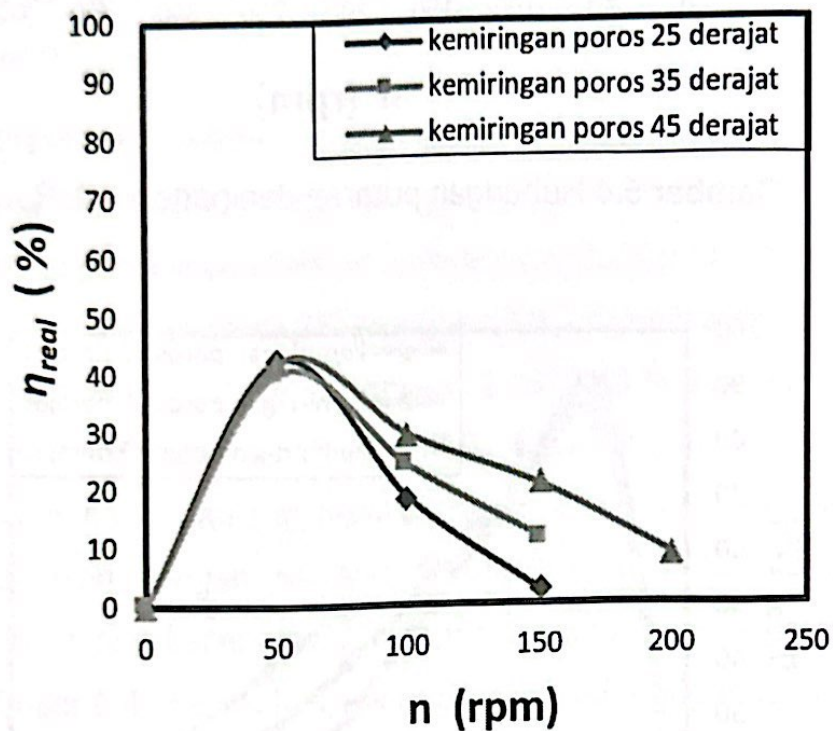
Gambar 5.4 Hubungan putaran dan pada  $y = 1 R_o$



Gambar 5.5 Hubungan putaran dan  $\eta_{real}$  pada  $y = 2/3 R_o$



Gambar 5.6 menunjukkan hasil eksperimen pada panjang karakteristik  $y = 1/2 R_o$ , terlihat penurunan efisiensi dan putaran dibandingkan dengan efisiensi dan putaran yang dihasilkan dari  $y = 1 R_o$  dan  $y = 2/3 R_o$ . Efisiensi tertinggi pada  $y = 1/2 R_o$  adalah 42 % dengan putaran 50 rpm. Kecepatan aliran pada  $y = 1/2 R_o$  adalah 0,3 m/s. Putaran tertinggi yang bisa dicapai sebesar 200 rpm pada kemiringan poros 45°. Sedangkan putaran pada kemiringan poros 35° dan 25° hanya mencapai 150 rpm.



Gambar 5.6 Hubungan putaran dan  $\eta_{real}$  pada  $y = 1/2 R_o$

Hubungan antara efisiensi dan putaran turbin dari ketiga variasi panjang karakteristik  $y = 1/2 R_o$ ,  $2/3 R_o$ , dan  $1 R_o$  pada masing-masing kemiringan poros turbin menghasilkan hubungan linear. Semakin tinggi kemiringan poros turbin semakin tinggi

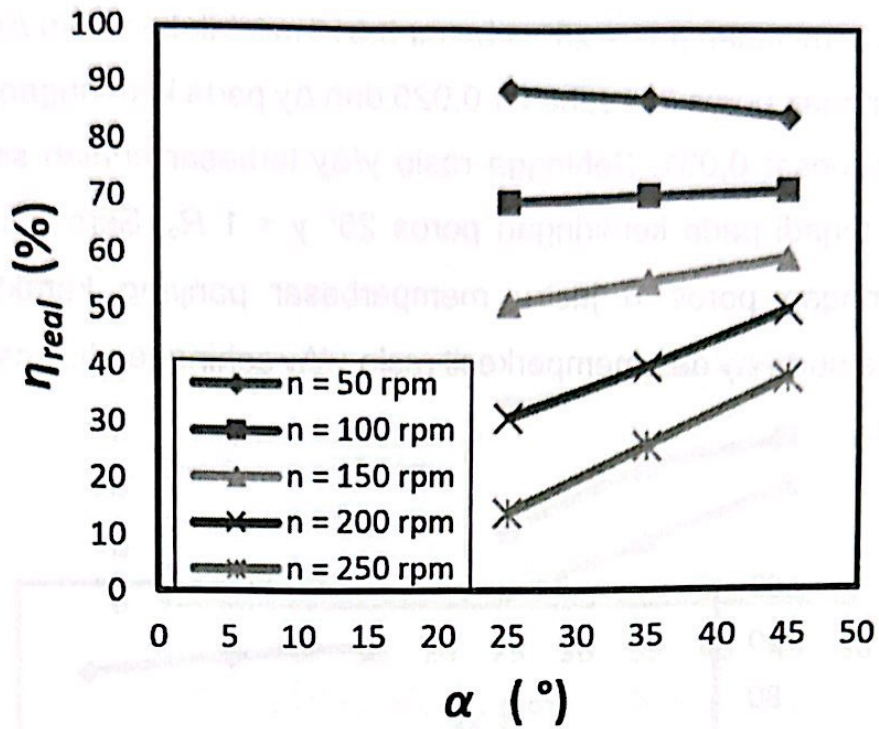
putaran yang dihasilkan namun semakin rendah efisiensinya. Kemiringan poros  $45^\circ$  memiliki *head* total  $H$  sebesar 0,650 m, menghasilkan putaran turbin 350 rpm namun efisiensinya sebesar 13 % lebih rendah dibandingkan dengan kemiringan poros  $35^\circ$  dan  $25^\circ$  yang memiliki *head* total  $H$  sebesar 0,530 m dan 0,391 m. Hasil ini menjelaskan bahwa besar energi potensial aliran dari *head* total yang tinggi kurang mempengaruhi efisiensi turbin. Dilihat dari kecepatan aliran sebesar 0,5 m/s pada  $y = 1 R_o$ , menghasilkan efisiensi maksimum sebesar 89 %. Dibandingkan dengan kecepatan aliran 0,4 m/s pada  $2/3 R_o$  menghasilkan efisiensi maksimum 72 %. Dan kecepatan aliran 0,3 m/s pada  $y = 1/2 R_o$  menghasilkan efisiensi maksimum 42 %.

Hal menarik dari grafik hasil hubungan putaran dan efisiensi turbin ulir tiga sudu yang ditunjukkan Gambar 5.4 sampai Gambar 5.6 adalah titik maksimum grafik pada putaran 50 rpm. Hasil ini memberikan informasi bahwa efisiensi turbin ulir Archimedes tiga sudu dicapai pada putaran rendah, yaitu 50 rpm sama dengan kecepatan sudut 5,2 rad/s. Hal ini disebabkan karena gejolak aliran atau *vortex* dalam sudu-sudu turbin berkurang, sehingga energi kinetik yang dimiliki aliran air dapat dikonversikan dengan baik menjadi energi mekanik. Kondisi ini sama dengan hasil penelitian Murray *et al.* (2013) dan Shaun Waters *et al.* (2015) pada variabel rasio kisar ditunjukkan Gambar 2.6, yang memberikan hasil efisiensi maksimum pada kecepatan sudut rata-rata 5,5 rad/s. Alasannya bahwa pada kecepatan sudut rendah, rugi turbulensi dalam turbin ulir menjadi rendah.

Perubahan tren antara kemiringan poros turbin 25, 35, dan 45 derajat akibat perbedaan putaran turbin maksimum yang dicapai oleh masing-masing kemiringan poros turbin. Semakin tinggi kemiringan poros turbin, semakin tinggi putaran. Hal ini disebabkan karena kemiringan poros turbin mempengaruhi gaya gesek antara fluida air dan sudu ulir. Sementara, fluida air yang menumbuk sudu secara aksial menimbulkan gaya aksial sejajar dengan sumbu poros. Gaya aksial menimbulkan reaksi dari turbin berupa gaya tangensial yang arahnya tegak lurus sumbu poros menyebabkan poros turbin berputar. Gaya gesek mengurangi gaya aksial, sehingga mempengaruhi gaya tangensial pada sudu ulir yang membuat poros turbin berputar. Jadi, semakin tinggi kemiringan poros semakin rendah gaya gesekan maka putaran poros turbin semakin tinggi.

### 5.2.3 Hubungan kemiringan poros dan efisiensi turbin ulir Archimedes tiga sudu

Data yang sama pada Gambar 5.4 sampai 5.6 disajikan untuk melihat hubungan kemiringan poros dan efisiensi turbin ulir pada Gambar 5.7 sampai Gambar 5.9. Mengacu pada Gambar 3.1, faktor penting untuk melihat hubungan kemiringan poros turbin dan efisiensi adalah  $H$  (*head*) dan rasio  $y/\Delta y$  (panjang karakteristik  $y$  dengan panjang karakteristik di antara sudu ulir  $\Delta y$ ). Panjang karakteristik  $y$  menentukan besar debit dan daya hidrolis yang dipakai untuk memutar sudu turbin. Sedangkan panjang karakteristik di antara sudu ulir  $\Delta y$  akan menjadi tinggi seiring naiknya kemiringan poros turbin.

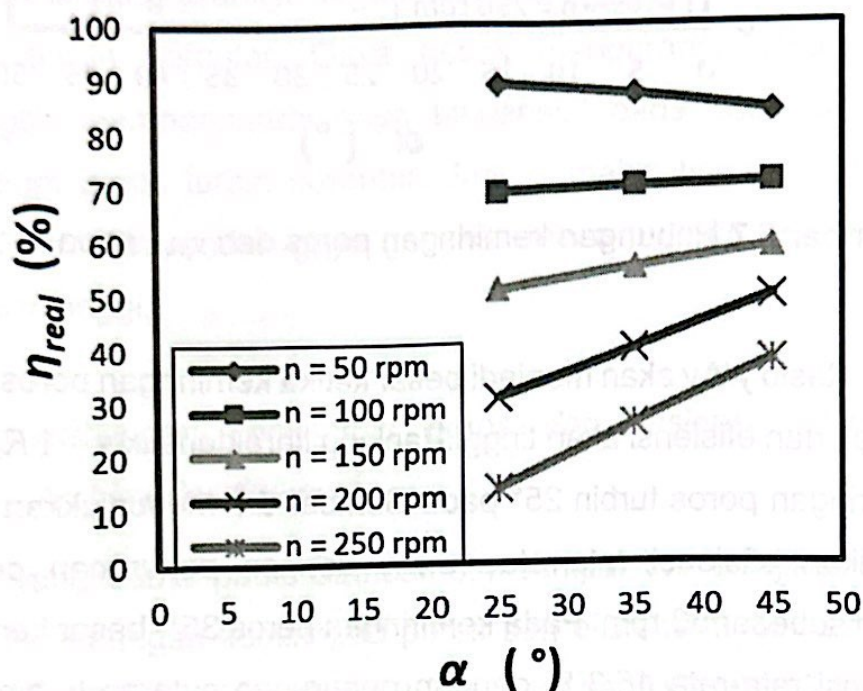


Gambar 5.7 Hubungan kemiringan poros dan  $\eta_{real}$  pada  $y = 1 R_o$

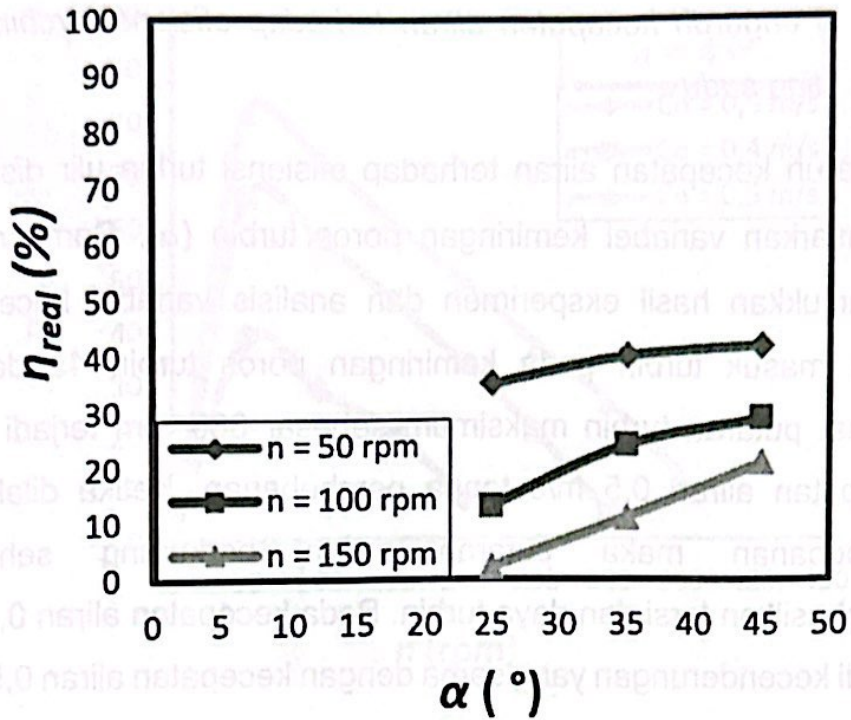
Rasio  $y/\Delta y$  akan menjadi besar ketika kemiringan poros turbin rendah dan efisiensi akan tinggi. Panjang karakteristik  $y = 1 R_o$  pada kemiringan poros turbin  $25^\circ$  pada Gambar 5.7 menunjukkan besar kenaikan efisiensi rata-rata 18,7% dengan penurunan putaran turbin sebesar 50 rpm. Pada kemiringan poros  $35^\circ$ , besar kenaikan efisiensi rata-rata 15,3 % dengan penurunan putaran turbin yang sama. Pada kemiringan poros  $45^\circ$  dengan penurunan putaran yang sama 50 rpm, kenaikan efisiensi rata-rata 11,5 %.

Hubungan antara efisiensi dan kemiringan poros turbin, memperjelas pengaruh panjang karakteristik  $y$  terhadap efisiensi turbin ulir. Efisiensi maksimum sebesar 89 % terjadi pada kemiringan poros  $25^\circ$ , putaran 50 rpm dan panjang karakteristik  $y = 1 R_o$ . Hal ini terjadi karena panjang karakteristik antara sudu  $\Delta y$

pada kemiringan poros  $25^\circ$  sebesar 0,019 m lebih kecil dari  $\Delta y$  pada kemiringan poros  $35^\circ$  sebesar 0,025 dan  $\Delta y$  pada kemiringan poros  $45^\circ$  sebesar 0,031. Sehingga rasio  $y/\Delta y$  terbesar adalah sebesar 2,89 terjadi pada kemiringan poros  $25^\circ$   $y = 1 R_o$ . Semakin tinggi kemiringan poros  $\alpha$  justru memperbesar panjang karakteristik antara sudu  $\Delta y$  dan memperkecil rasio  $y/\Delta y$  sehingga efisiensi akan turun.



**Gambar 5.8** Hubungan kemiringan poros dan  $\eta_{real}$  pada  $y = 2/3 R_o$



**Gambar 5.9** Hubungan kemiringan poros dan  $\eta_{real}$  pada  $y = 1/2 R_0$ .

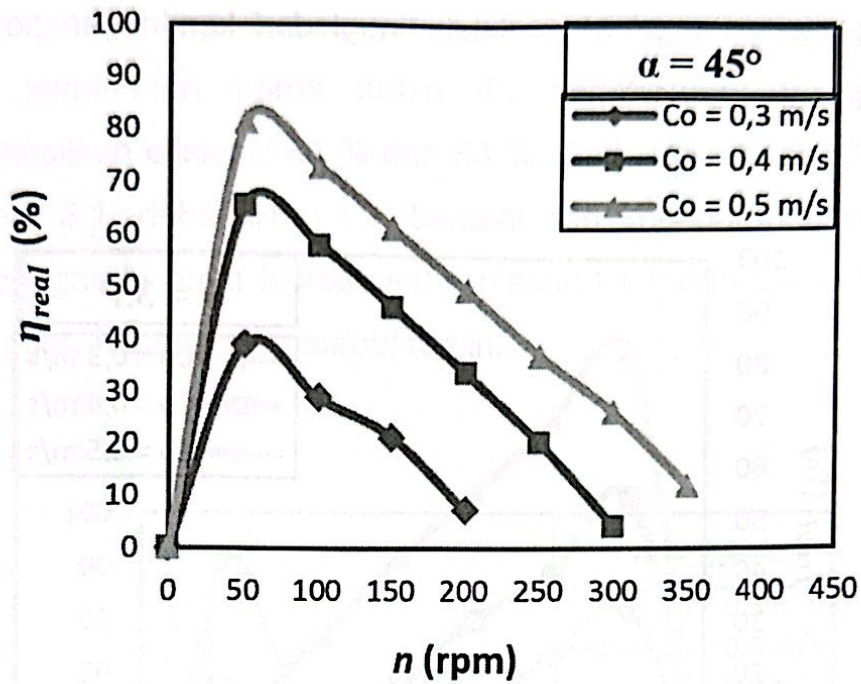
Dari penyajian dan hasil hubungan antara efisiensi dan kemiringan poros baru terlihat pada kemiringan poros  $25^\circ$  pengaruh panjang karakteristik ( $y$ ) terjadi pada rasio  $y/\Delta y$  sebesar 2,89 menghasilkan efisiensi maksimum 89 %.

Gambar 5.8 dan Gambar 5.9 menunjukkan penurunan efisiensi karena faktor panjang karekteristik  $y = 2/3 R_0$  dan  $y = 1/2 R_0$  memperkecil rasio  $y/\Delta y$  sehingga efisiensinya turun.

Selain faktor  $H$  (*head*) dan rasio  $y/\Delta y$  yang mempengaruhi hubungan kemiringan poros terhadap efisiensi turbin, faktor penting juga adalah gravitasi. Faktor gravitasi dianalisis fenomena aliran dengan bilangan Froude dibahas pada Sub Bab 5.2.5.

#### 5.2.4 Pengaruh kecepatan aliran terhadap efisiensi Archimedes tiga sudu

Pengaruh kecepatan aliran terhadap efisiensi turbin ulir disajikan berdasarkan variabel kemiringan poros turbin ( $\alpha$ ). Gambar 5.10 menunjukkan hasil eksperimen dan analisis variabel kecepatan aliran masuk turbin pada kemiringan poros turbin 45 derajat. Terlihat putaran turbin maksimum sebesar 385 rpm terjadi pada kecepatan aliran 0,5 m/s tanpa pembebanan. Ketika dilakukan pembebanan maka putaran turbin berkurang sehingga menghasilkan torsi dan daya turbin. Pada kecepatan aliran 0,4 m/s terjadi kecenderungan yang sama dengan kecepatan aliran 0,5 m/s, putaran tertinggi mencapai 313 rpm tanpa pembebanan sedangkan efisiensi yang dihasilkan sebesar 66 % pada putaran turbin 50 rpm. Kecepatan aliran 0,3 m/s dan putaran turbin 50 rpm menghasilkan efisiensi turbin sebesar 39 % sedangkan putaran turbin tertinggi sebesar 222 rpm tanpa pembebanan. Efisiensi tertinggi yang dicapai pada kemiringan poros 45 derajat sebesar 81 % terjadi pada putaran 50 rpm dan kecepatan aliran 0,5 m/s.

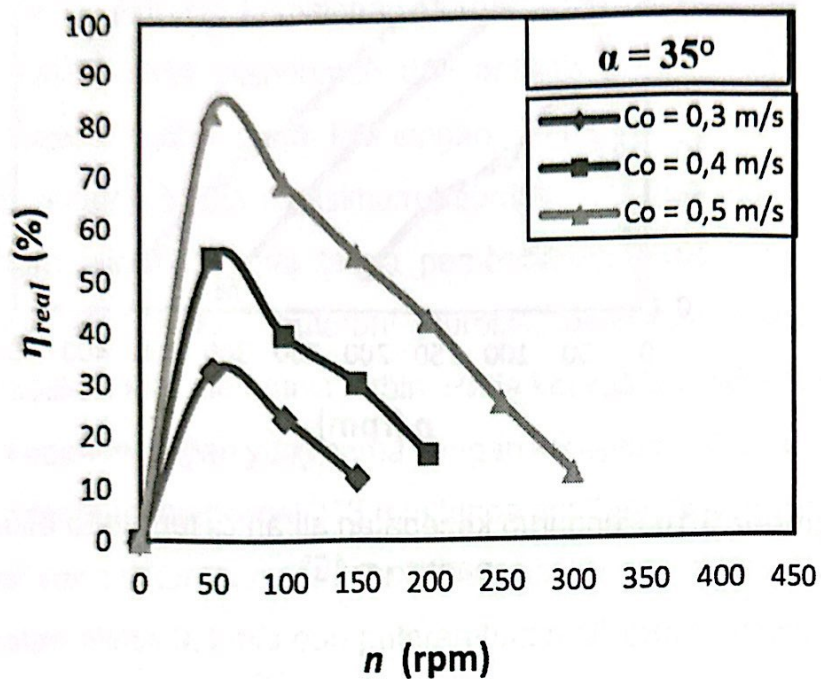


**Gambar 5.10** Pengaruh kecepatan aliran  $c_o$  terhadap efisiensi pada  $\alpha = 45^\circ$

Hasil eksperimen dan analisis variabel kecepatan aliran pada kemiringan poros 35 derajat ditunjukkan pada Gambar 5.11. Efisiensi tertinggi sebesar 83 % terjadi pada kecepatan aliran masuk turbin 0,5 m/s dan putaran turbin 50 rpm. Kecenderungan yang sama terlihat pada kecepatan aliran masuk 0,4 m/s dan 0,3 m/s namun efisiensi yang dihasilkan lebih rendah, yaitu sebesar 55 % dan 33 %. Putaran turbin tertinggi adalah 335 rpm pada kecepatan aliran 0,5 m/s. Terjadi penurunan putaran turbin ketika kecepatan aliran diturunkan menjadi 0,4 m/s dan 0,3 m/s. Jika dibandingkan dengan Gambar 5.10 pada kemiringan poros 45 derajat, putaran yang dihasilkan lebih rendah pada kemiringan poros 35 derajat. Namun efisiensi yang dihasilkan pada kemiringan poros



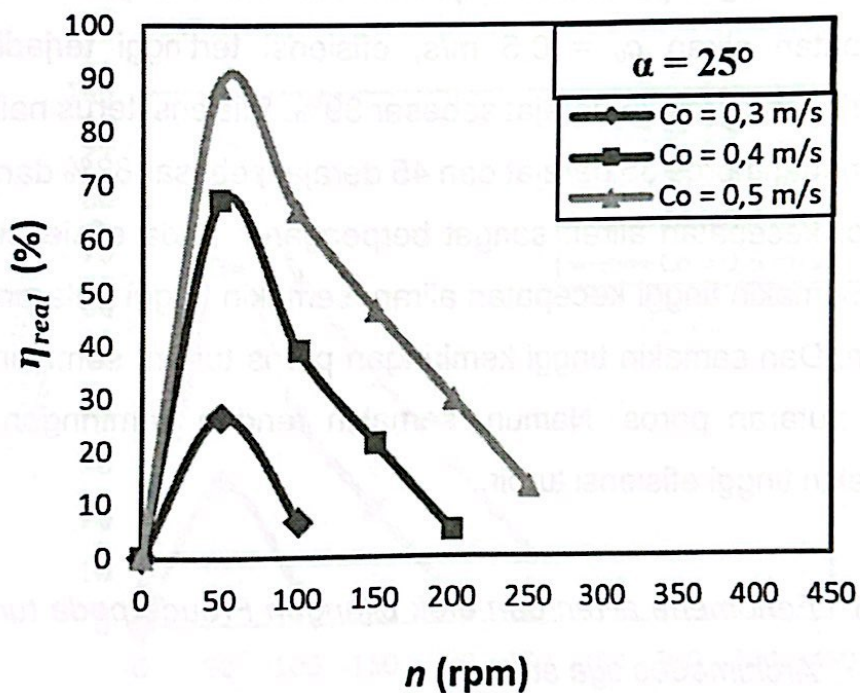
35 derajat sebesar 83 % lebih tinggi dari kemiringan poros 45 derajat sebesar 81 %.



**Gambar 5.11** Pengaruh kecepatan aliran  $c_o$  terhadap efisiensi pada  $\alpha = 35^\circ$

Pengaruh kecepatan aliran terhadap efisiensi turbin pada kemiringan poros turbin 25 derajat ditunjukkan Gambar 5.12. Terlihat penurunan putaran mulai dari kecepatan aliran 0,5 m/s kemudian pada 0,4 m/s dan 0,3 m/s. Putaran turbin tertinggi adalah 280 rpm terjadi pada kecepatan aliran 0,5 m/s tanpa pembebanan. Jika dibandingkan dengan putaran pada kemiringan poros 35 derajat dan 45 derajat, putaran yang dihasilkan pada kemiringan poros turbin 25 derajat lebih rendah. Namun efisiensi yang dihasilkan pada kemiringan poros turbin 25 derajat sebesar 89 %, terjadi pada kecepatan aliran masuk 0,5 m/s dan putaran 50 rpm

merupakan efisiensi terbesar. Jika dibandingkan dengan efisiensi pada kemiringan poros turbin 45 derajat dan 35 derajat menghasilkan efisiensi 81 % dan 83 %. Dari Persamaan (25) dan Gambar 3.1, debit aliran ( $Q$ ) berasal dari kecepatan aliran ( $c_0$ ) mempengaruhi daya hidrolis yang masuk ke turbin ulir sehingga berpengaruh pada daya *output* turbin.



**Gambar 5.12** Pengaruh kecepatan aliran  $c_0$  terhadap efisiensi pada  $\alpha = 25^\circ$

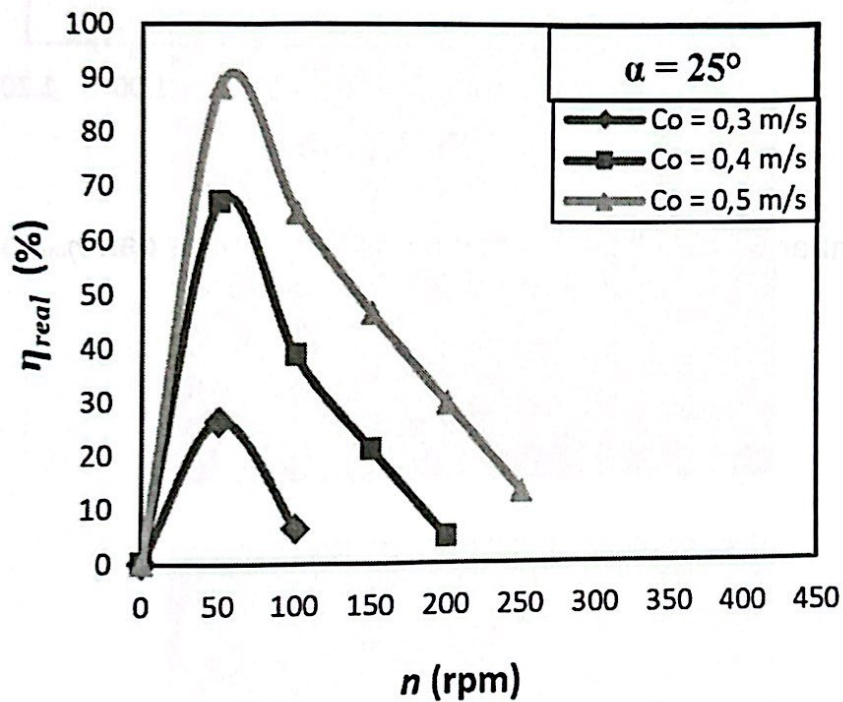
Jika diperhatikan pada Gambar 5.10 sampai Gambar 5.12, terlihat perbedaan titik maksimum efisiensi turbin pada masing-masing grafik. Pada kecepatan aliran  $c_0 = 0,3$  m/s, efisiensi tertinggi terjadi pada kemiringan poros 45 derajat sebesar 39%. Efisiensi terus menurun pada kemiringan poros 35 derajat dan 25 derajat

sebesar 32% dan 26%. Hal ini disebabkan faktor  $H$  head lebih dominan mempengaruhi efisiensi turbin. Karena  $H$  head ditentukan oleh kemiringan poros turbin. Namun fenomena berbeda terlihat pada kecepatan aliran masuk  $c_0 = 0,4$  m/s, terjadi perbedaan titik maksimum efisiensi turbin. Pada kemiringan poros turbin 45 derajat, efisiensi maksimum sebesar 65%. Sedangkan pada kemiringan poros 35 derajat, terjadi penurunan efisiensi menjadi 54%. Dan pada kemiringan poros 25 derajat, efisiensi naik menjadi 67%. Pada kecepatan aliran  $c_0 = 0,5$  m/s, efisiensi tertinggi terjadi pada kemiringan poros 25 derajat sebesar 89%. Efisiensi terus naik pada kemiringan poros 35 derajat dan 45 derajat sebesar 83% dan 81 %. Faktor kecepatan aliran sangat berpengaruh pada efisiensi turbin ulir. Semakin tinggi kecepatan aliran, semakin tinggi putaran poros turbin. Dan semakin tinggi kemiringan poros turbin, semakin tinggi pula putaran poros. Namun, semakin rendah kemiringan poros semakin tinggi efisiensi turbin.

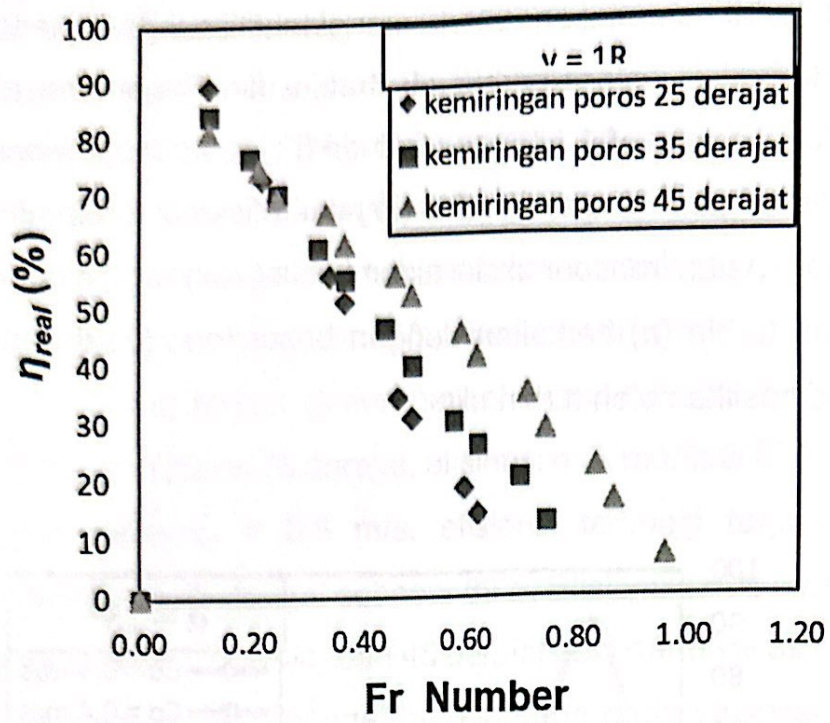
### 5.2.5 Fenomena aliran dan efek bilangan Froude pada turbin ulir Archimedes tiga sudu

Aliran fluida dengan permukaan bebas, distribusi tekanan di dalam fluida adalah hidrostatis. Pembangkitan daya turbin ulir Archimedes terjadi akibat gaya hidrostatis  $F_{hyd}$  terhadap sudu ulir pada dua sisi dengan arah berlawanan. Momentum linear air merupakan gaya hidrostatis menimbulkan reaksi tangensial dari poros turbin mengakibatkan poros berputar menghasilkan torsi. Gaya hidrostatis sangat dipengaruhi oleh berat fluida—gaya gravitasi dan kedalaman aliran masuk. Perilaku kedalaman aliran masuk atau panjang karakteristik dan kecepatan aliran masuk serta kemiringan

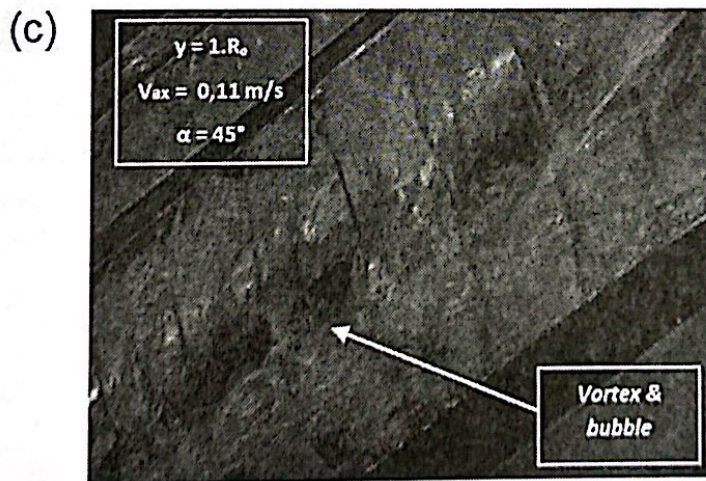
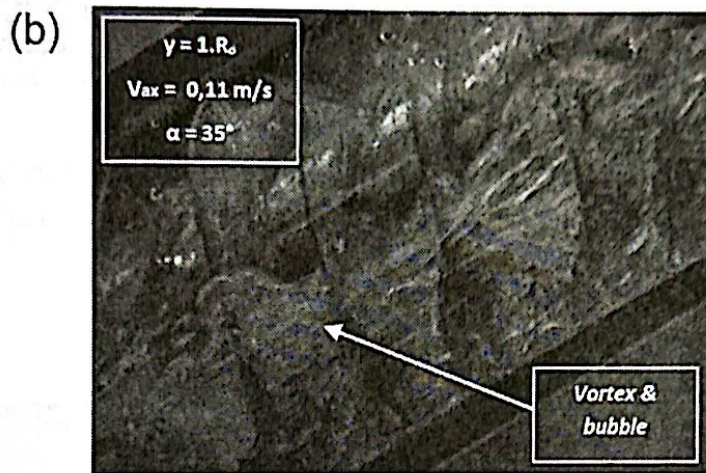
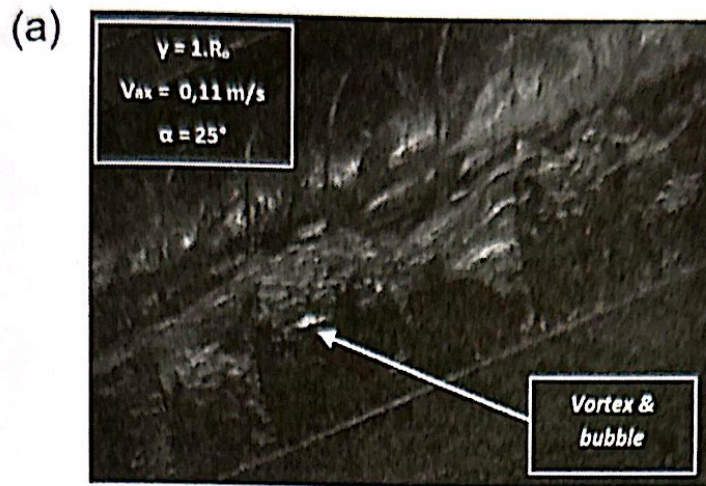
poros turbin digunakan untuk mengidentifikasi fenomena aliran yang terjadi di antara sudu-sudu turbin ulir. Fenomena aliran ini dikaitkan dengan efek bilangan Froude ( $Fr$ ) terhadap efisiensi turbin ulir. Hubungan bilangan Froude ( $Fr$ ) dan efisiensi turbin ulir adalah nilai kecepatan transpor aksial aliran fluida ( $v_{ax}$ ) yang diperoleh dari putaran turbin ( $n$ ) berkaitan dengan besar torsi ( $T$ ) dan daya ( $P$ ) yang dihasilkan oleh turbin ulir.



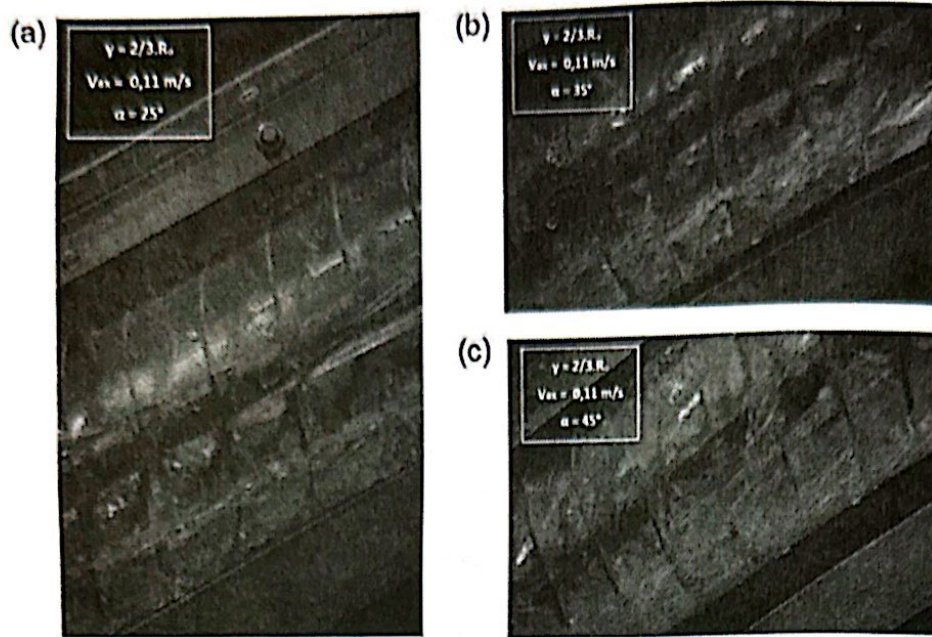
Gambar 5.13 Efek kemiringan poros terhadap  $Fr$  dan  $\eta_{real}$  pada  $y = 1 R_o$



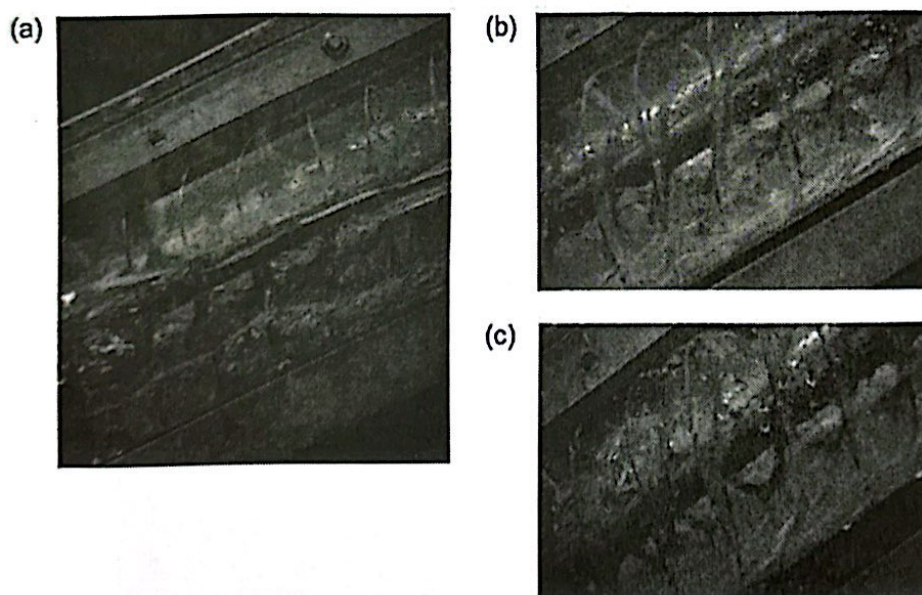
Gambar 5.14 Efek kemiringan poros terhadap Fr dan  $\eta_{real}$  pada  $y = 2/3 R_o$



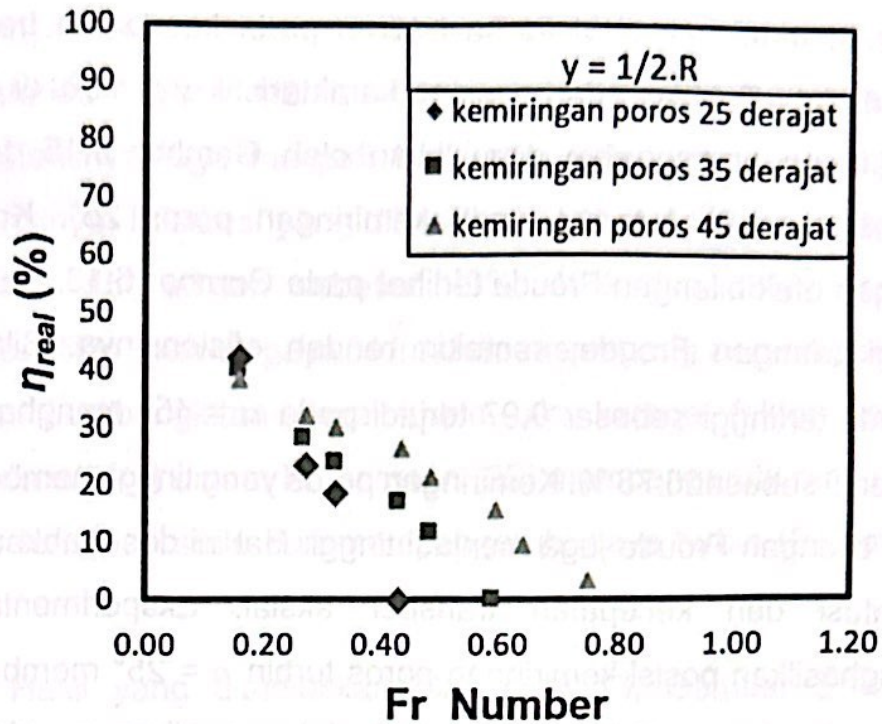
**Gambar 5.15** Visualisasi aliran pada  $\gamma = 1 R_0$  dan  $V_{ax} = 0,11 \text{ m/s}$ :  
(a) kemiringan poros  $25^\circ$ ; (b) kemiringan poros  $35^\circ$ ; dan (c) kemiringan poros  $45^\circ$



**Gambar 5.16** Visualisasi aliran pada  $y = 2/3 R_o$  dan  $V_{ax} = 0,11 \text{ m/s}$ : (a) kemiringan poros  $25^\circ$ ; (b) kemiringan poros  $35^\circ$ ; dan (c) kemiringan poros  $45^\circ$



**Gambar 5.17** Visualisasi aliran pada  $y = 1/2 R_o$  dan  $V_{ax} = 0,11 \text{ m/s}$ : (a) kemiringan poros  $25^\circ$ ; (b) kemiringan poros  $35^\circ$ ; dan (c) kemiringan poros  $45^\circ$



Gambar 5.18 Efek kemiringan poros terhadap Fr dan  $\eta_{real}$  turbin pada  $y = 1/2 R_o$

Pada posisi bilangan Froude yang sama  $Fr = 0.15$ , masing-masing kemiringan poros turbin terjadi fenomena aliran yang berbeda. Terlihat dalam visualisasi aliran terjadi fenomena *vortex* disertai *bubble* dengan ukuran yang berbeda pada masing-masing posisi kemiringan poros turbin. Peran kemiringan poros otomatis menentukan besar *head* ( $H$ ) turbin dan perubahan panjang karakteristik antara sudu ( $\Delta y$ ), sehingga mempengaruhi resultan gaya hidrostatis pada turbin ulir. Akibat dari resultan gaya hidrostatis ini maka poros turbin akan menghasilkan putaran maksimum yang berbeda pada masing-masing kemiringan poros turbin. Putaran poros turbin tertinggi terjadi pada kemiringan poros turbin  $45^\circ$  sebesar 395 rpm. Kemiringan poros turbin yang tinggi menimbulkan efek *vortex* yang besar di antara sudu, sehingga mempengaruhi



efisiensi turbin. Hasil visualisasi aliran pada kecepatan transpor aksial  $V_{ax} = 0,11$  m/s dan panjang karakteristik  $y = 1 R_o$  di setiap kemiringan poros turbin ditunjukkan oleh Gambar 5.15, terlihat *vortex* yang kecil terjadi pada kemiringan poros  $25^\circ$ . Korelasi dengan efek bilangan Froude terlihat pada Gambar 5.13. Semakin tinggi bilangan Froude, semakin rendah efisiensinya. Bilangan Froude tertinggi sebesar 0,97 terjadi pada  $\alpha = 45^\circ$  menghasilkan efisiensi sebesar 6,78 %. Kemiringan poros yang tinggi memberikan efek bilangan Froude juga menjadi tinggi. Hal ini disebabkan oleh gravitasi dan kecepatan transpor aksial. Eksperimental ini menghasilkan posisi kemiringan poros turbin  $\alpha = 25^\circ$  memberikan efisiensi sebesar 89 % terjadi pada kedalaman aliran masuk  $y = 1 R_o$  dengan bilangan Froude  $Fr = 0,15$ . Jika dibandingkan dengan kemiringan poros  $35^\circ$  dan  $45^\circ$  pada bilangan Froude yang sama, efisiensi turbin ulir adalah sebesar 84 % dan 81 %.

Gambar 5.14 menunjukkan pengaruh panjang karakteristik ( $y$ ) dalam bilangan Froude pada kedalaman aliran masuk  $y = 2/3 R_o$ . Fenomena alirannya terlihat gelombang yang seragam di antara sudu-sudu turbin ditunjukkan Gambar 5.16. Tidak terjadi perbedaan yang signifikan pada variabel kemiringan poros turbin. Hal ini disebabkan oleh panjang karakteristik yang lebih rendah mengakibatkan gaya hidrostatis yang bekerja pada sudu menjadi kecil (Persamaan 22). Efisiensi yang dihasilkan adalah sebesar 70 % terjadi pada kemiringan poros  $25^\circ$  dan  $35^\circ$ , sedangkan pada kemiringan poros  $45^\circ$  menghasilkan efisiensi 67 %.

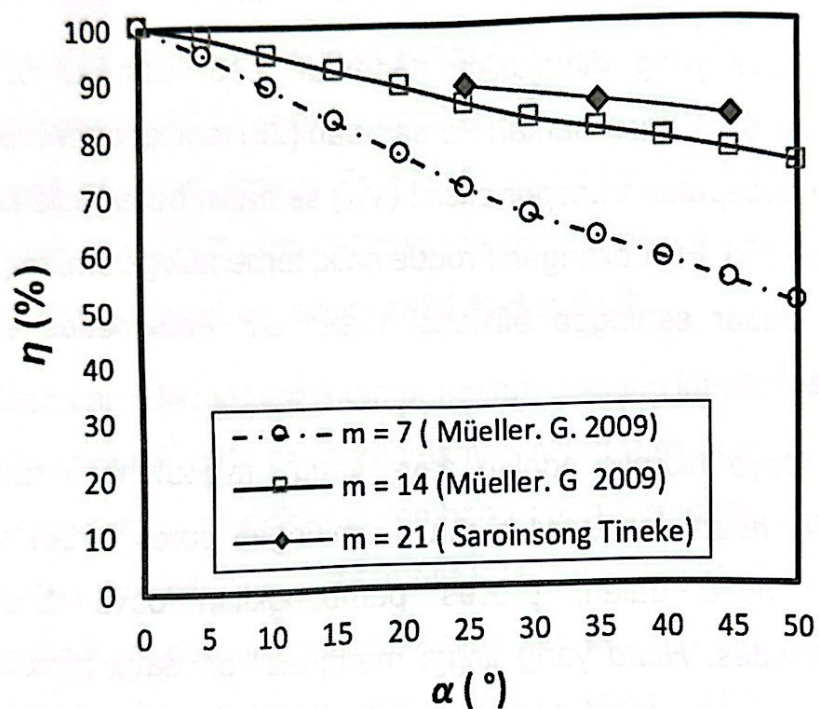
Variabel panjang karakteristik  $y = 1/2 R_o$  menunjukkan tren yang sama dengan  $y = 2/3 R_o$  ditunjukkan Gambar 5.18. Fenomena

alirannya terlihat pada Gambar 5.17. Karena faktor panjang karakteristiknya  $y = 1/2 R_o$  lebih kecil dari  $y = 2/3 R_o$ , maka gaya hidrostatisnya juga menjadi berkurang sehingga mempengaruhi efisiensinya. Efisiensi yang dihasilkan pada kemiringan poros  $25^\circ$ ,  $35^\circ$  dan  $45^\circ$  adalah sebesar 43%, 40% dan 38%. Hasil ini membuktikan bahwa gaya hidrostatis memegang peranan penting dalam pembangkitan daya turbin ulir, karena faktor panjang karakteristik ( $y$ ) dalam Persamaan (22) mempengaruhi momentum linear terhadap sudu dan mempengaruhi daya turbin (Persamaan 24).

Hasil yang ditunjukkan Gambar 5.13, Gambar 5.14 dan Gambar 5.18, berdasarkan Persamaan (26) terlihat bahwa semakin besar kecepatan transpor aksial ( $V_{ax}$ ) semakin besar pula bilangan Froude ( $Fr$ ). Efek bilangan Froude naik, terbentuk gelombang *vortex* yang besar sehingga efisiensi turbin ulir Archimedes semakin rendah.

Daya hidrolis adalah daya yang dibutuhkan turbin ulir melalui *head* dan debit aliran. Kemiringan poros turbin sebagai faktor *head* dalam proses pembangkitan daya turbin ulir Archimedes. *Head* yang tinggi menghasilkan daya hidrolis yang besar, namun tidak akan menghasilkan efisiensi yang maksimal. Karena gravitasi dan kemiringan poros turbin menyebabkan aliran bergejolak di antara sudu ulir. Efek bilangan Froude dalam buku ini terjadi fenomena *vortex* yang merugikan dalam proses pembangkitan daya turbin ulir. Kemiringan poros turbin menjadi faktor penting dalam proses pembangkitan daya turbin ulir Archimedes. Hasil eksperimen secara keseluruhan menunjukkan

kinerja turbin ulir lebih maksimal pada kemiringan poros yang rendah, secara otomatis beroperasi pada *head* rendah menjadi lebih baik. Hasil ini menunjukkan kecenderungan yang sama dengan penelitian Müller dan Senior (2009) dalam Gambar 5.19. Semakin rendah kemiringan poros ( $\alpha$ ) semakin tinggi efisiensi turbin. Melalui pengamatan fenomena aliran dan analisis dengan efek bilangan Froude ( $Fr$ ) dihubungkan dengan efisiensi turbin, membuktikan bahwa turbin ulir cocok untuk *head* rendah.



**Gambar 5.19** Hasil eksperimen dan hasil analisis (Müller & Senior, 2009)

# KESIMPULAN

Dari hasil pengambilan data dan analisis data, maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Fenomena aliran di antara sudu-sudu turbin ulir Archimedes tiga sudu terjadi gelombang pusaran aliran atau *vortex* dan *bubble*. Efek bilangan Froude terhadap efisiensi turbin ulir adalah semakin besar  $Fr$  semakin rendah efisiensi turbin.  $Fr$  tertinggi sebesar 0,97 terjadi pada  $\alpha = 45^\circ$  menghasilkan efisiensi sebesar 6,78 %.  $Fr$  terendah sebesar 0,15 terjadi pada  $\alpha = 25^\circ$ ,  $\alpha = 35^\circ$ , dan  $\alpha = 45^\circ$  menghasilkan efisiensi sebesar 89 %, 84 % dan 81 %. Perbedaan hasil efisiensi turbin pada  $Fr$  yang sama akibat gravitasi pada kemiringan poros turbin ( $\alpha$ ).
2. Kinerja terbaik, yaitu pada kemiringan poros turbin  $\alpha = 25^\circ$  dibandingkan dengan  $\alpha = 35^\circ$  dan  $\alpha = 45^\circ$ . Efisiensi tertinggi sebesar 89 % terjadi pada kemiringan poros  $\alpha = 25^\circ$  dan kecepatan aliran  $c_0 = 0,5$  m/s dan panjang karakteristik ( $y$ ) =  $1 R_0$  dengan bilangan Froude ( $Fr$ ) = 0.15. Efek bilangan Froude  $Fr$  terhadap efisiensi turbin membuktikan bahwa faktor gravitasi pada kemiringan poros turbin ( $\alpha$ ), kecepatan aliran ( $c_0$ ) dan panjang karakteristik ( $y$ ) mempengaruhi daya dan efisiensi turbin ulir Archimedes tiga sudu.

Untuk pengembangan keilmuan ke depan disarankan membahas optimalisasi kinerja turbin ulir dengan menaikkan variabel panjang karakteristik ( $y$ ). Masih terbuka peluang untuk analisis mengenai turbin ulir Archimedes tiga sudu dengan variabel rasio kisar terhadap jari-jari sudu ulir.

# Lampiran

## Lampiran 1: Data pengukuran

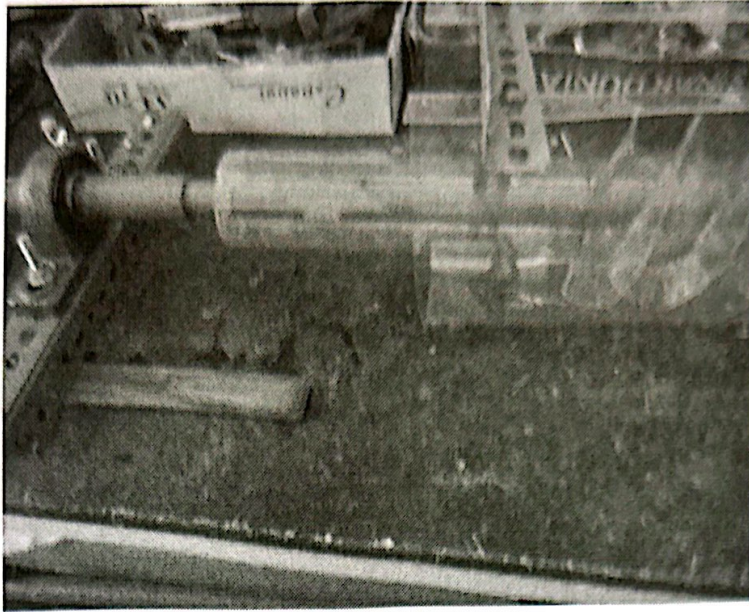
Tabel L.1 Data pengukuran dan hasil perhitungan pada variabel  $\alpha = 35^\circ$

$\alpha$ (°)	$\gamma$ (m)	$c_0$ (m/s)	n (Rpm)	$m_2$ (Kg)	$m_1$ (Kg)	P (watt)	$P_{hyd}$ (watt)
35°	0,028	0,3	190	0,00	0,00	0,00	6,32
35°	0,028	0,3	150	0,08	0,28	0,77	4,99
35°	0,028	0,3	140	0,10	0,35	0,90	4,66
35°	0,028	0,3	100	0,30	0,59	0,74	3,33
35°	0,028	0,3	90	0,35	0,65	0,69	3,00
35°	0,028	0,3	50	0,39	0,81	0,53	1,66
35°	0,028	0,3	0	0,45	1,00	0,00	0,00
35°	0,037	0,4	240	0,00	0,00	0,00	7,99
35°	0,037	0,4	200	0,08	0,32	1,23	6,66
35°	0,037	0,4	190	0,10	0,40	1,46	6,32
35°	0,037	0,4	150	0,18	0,64	1,77	4,99
35°	0,037	0,4	140	0,20	0,70	1,80	4,66
35°	0,037	0,4	100	0,40	0,94	1,39	3,33
35°	0,037	0,4	90	0,45	1,00	1,27	3,00
35°	0,037	0,4	50	0,58	1,36	0,99	1,66
35°	0,037	0,4	0	0,75	1,80	0,00	0,00
35°	0,055	0,5	325	0,00	0,00	0,00	10,82
35°	0,055	0,5	300	0,05	0,15	0,77	9,99
35°	0,055	0,5	275	0,10	0,30	1,41	9,15
35°	0,055	0,5	250	0,15	0,48	2,09	8,32
35°	0,055	0,5	225	0,20	0,65	2,60	7,49
35°	0,055	0,5	200	0,25	0,83	2,95	6,66
35°	0,055	0,5	175	0,30	1,00	3,14	5,83
35°	0,055	0,5	150	0,40	1,20	3,08	4,99
35°	0,055	0,5	125	0,50	1,40	2,89	4,16
35°	0,055	0,5	100	0,63	1,60	2,50	3,33
35°	0,055	0,5	75	0,75	1,80	2,02	2,50
35°	0,055	0,5	50	0,87	1,98	1,43	1,66
35°	0,055	0,5	0	1,10	2,35	0,00	0,00

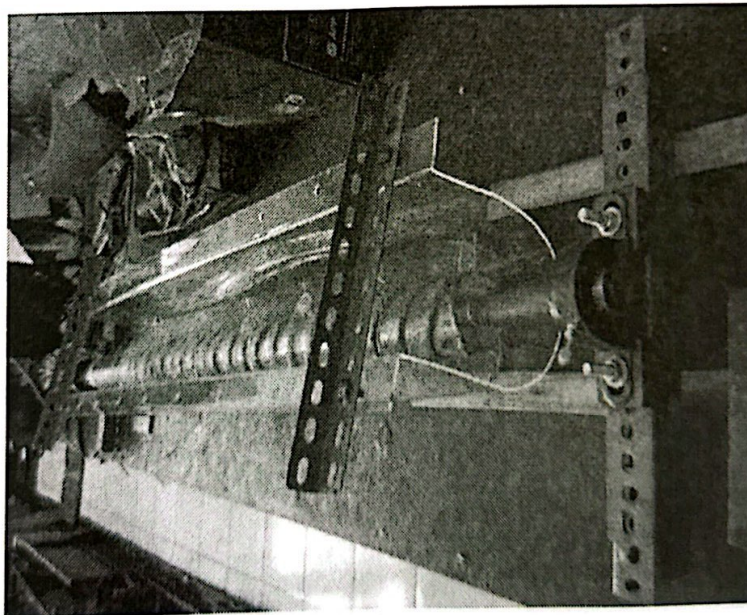
Tabel L.2 Data pengukuran dan hasil perhitungan pada variabel  $\alpha = 45^\circ$

$\alpha$ (°)	$y$ (m)	$v_0$ (m/s)	$n$ (Rpm)	$m_2$ (Kg)	$m_1$ (Kg)	$P$ (watt)	Phyd (watt)
45°	0,028	0,4	240	0,00	0,00	0,00	9,89
45°	0,028	0,4	200	0,04	0,24	1,03	8,24
45°	0,028	0,4	190	0,05	0,30	1,22	7,83
45°	0,028	0,4	150	0,09	0,46	1,42	6,18
45°	0,028	0,4	140	0,10	0,50	1,44	5,77
45°	0,028	0,4	100	0,18	0,66	1,23	4,12
45°	0,028	0,4	90	0,20	0,70	1,16	3,71
45°	0,028	0,4	50	0,24	0,86	0,80	2,06
45°	0,028	0,4	40	0,25	0,90	0,67	1,65
45°	0,028	0,4	0	0,50	1,25	0,00	0,00
45°	0,037	0,5	320	0,00	0,00	0,00	13,19
45°	0,037	0,5	300	0,04	0,16	0,92	12,36
45°	0,037	0,5	270	0,10	0,40	2,08	11,13
45°	0,037	0,5	250	0,16	0,54	2,44	10,30
45°	0,037	0,5	220	0,25	0,75	2,82	9,07
45°	0,037	0,5	200	0,27	0,85	2,98	8,24
45°	0,037	0,5	170	0,30	1,00	3,05	7,01
45°	0,037	0,5	150	0,32	1,10	3,00	6,18
45°	0,037	0,5	120	0,35	1,25	2,77	4,95
45°	0,037	0,5	100	0,39	1,35	2,46	4,12
45°	0,037	0,5	70	0,45	1,50	1,89	2,88
45°	0,037	0,5	50	0,48	1,63	1,48	2,06
45°	0,037	0,5	0	0,55	1,95	0,00	0,00
45°	0,055	0,6	395	0,00	0,00	0,00	19,41
45°	0,055	0,6	350	0,14	0,41	2,43	17,20
45°	0,055	0,6	345	0,15	0,45	2,66	16,95
45°	0,055	0,6	300	0,29	0,86	4,39	14,74
45°	0,055	0,6	295	0,30	0,90	4,54	14,50
45°	0,055	0,6	250	0,39	1,13	4,72	12,28
45°	0,055	0,6	245	0,40	1,15	4,72	12,04
45°	0,055	0,6	200	0,49	1,47	5,01	9,83
45°	0,055	0,6	195	0,50	1,50	5,01	9,58
45°	0,055	0,6	150	0,64	1,82	4,54	7,37
45°	0,055	0,6	145	0,65	1,85	4,47	7,13
45°	0,055	0,6	100	0,74	2,17	3,66	4,91
45°	0,055	0,6	95	0,75	2,20	3,54	4,67
45°	0,055	0,6	50	1,06	2,60	1,98	2,46
45°	0,055	0,6	0	1,40	3,05	0,00	0,00

**Lampiran 2: Dokumentasi proses pembuatan model turbin ulir Archimedes**

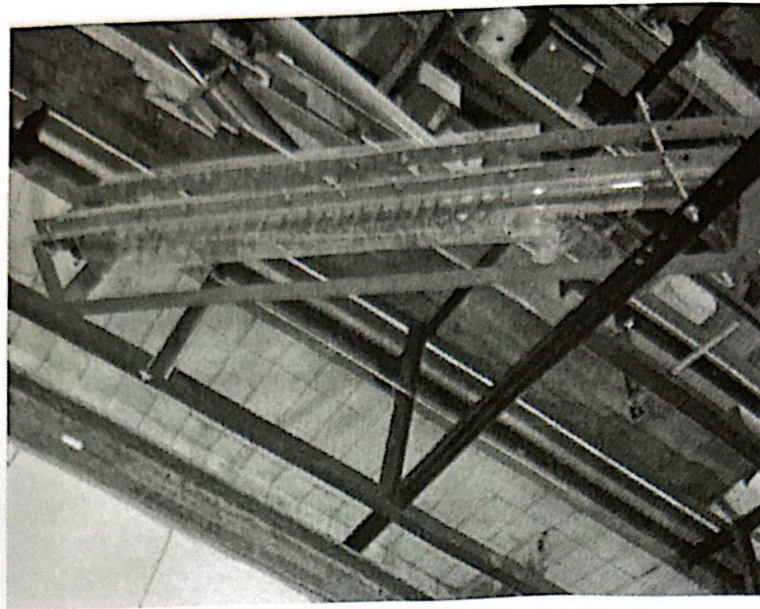


**Gambar L2.1** Pembuatan ulir Archimedes tiga sudu



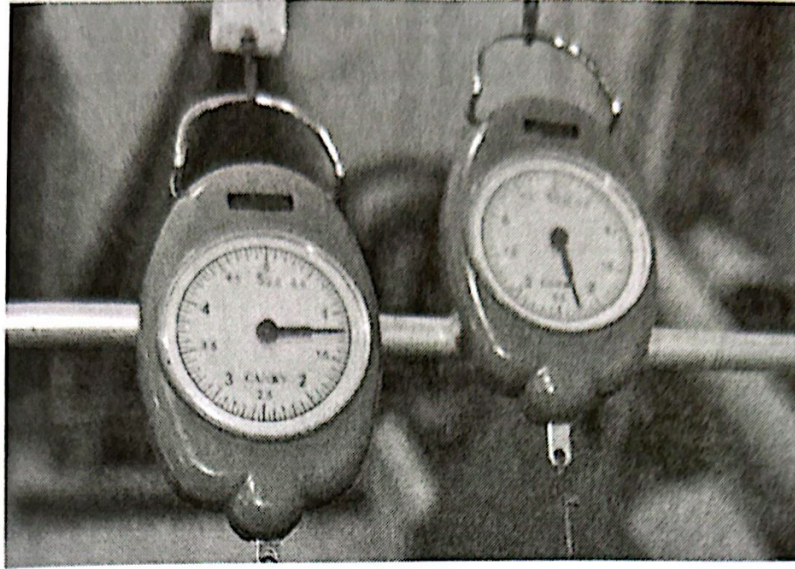
**Gambar L2.2** Pemasangan casing turbin ulir Archimedes



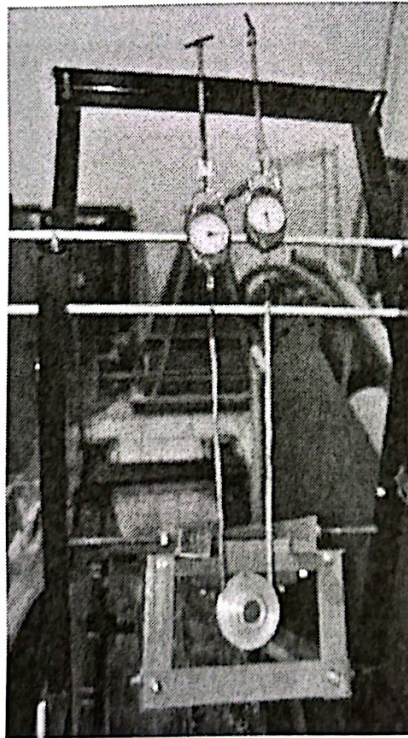


**Gambar L2.3** Pemasangan turbin ulir pada instalasi pengujian

### Lampiran 3: Dokumentasi pengukuran torsi



Gambar L3.1 Hasil pengukuran torsi

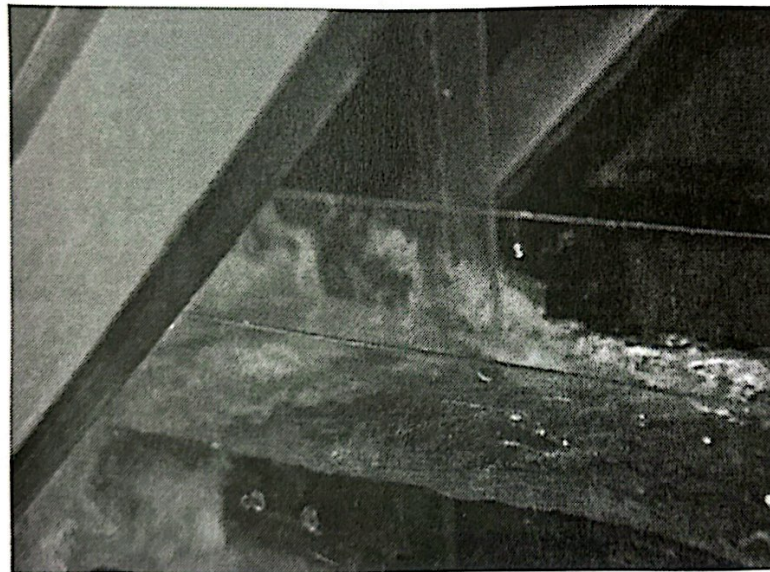


Gambar L3.2 Instalasi pengukuran torsi

## Lampiran 4: Dokumentasi instalasi



Gambar L4.1 *Setting* aliran kondisi *steady* dalam tangki penampung



Gambar L4.2 Pengukuran panjang karakteristik ( $y$ )



**Gambar L4.3** Pengambilan dan penulisan data pengukuran

#### Lampiran 5: Publikasi jurnal internasional

1. Saroinsong Tineke *et al.* (2015) The Effect of Head Inflow and Turbine Axis Angle Towards The Three Row Bladed Screw Turbine Efficiency. *International Journal of Applied Engineering Research*. Vol.10, no 7, pp 16977-16984. RIP, India.
2. Saroinsong Tineke *et al.* (2016). Fluid Flow Phenomenon in a Three-Bladed Power Generating Archimedes Screw Turbine. *Journal of Engineering Science and Technology Review*. Vol.9, no 2, pp. 72-79. Kavala Institute of Technology, Greece (Yunani).
3. Saroinsong Tineke, *et al.* (2016). Performance of Three-Bladed Archimedes Screw Turbine. *ARPN journal of Engineering and Applied Sciences*. Vol.11, No 15, pp 9491-9495. ARPN Journals, Pakistan.
4. Saroinsong Tineke *et al.* (2016). Effect of Froude Numbers On Three-Bladed Archimedes Screw Turbine Efficiency. *International Journal of Renewable Energy Research*. Vol.6, No 3, pp 1153-1158. Gazi University, Turkey.

## Daftar Pustaka

- Brada, K (1996a). Schnecken-tropfpump als Mikroturbine, in Wasserkraftanlagen-Klien-und Klienstraftwerke, 1st Ed., expert-Verlag, Malsheim.
- Brada, K (1996b). Wasserkraftschnecke-Eigenschaften und Verwendung. Proc.,Sixth Int. Symp. On Heat Exchange and Renewable Energi, Szczecin, 43–52.
- Brada, K (1999). Hydraulic screw generates electricity from micro hydropower station, Maschinenmarkt Wurzburg, Mitteilung 14, 52–56. (in German).
- Okot, D.K. (2013). Review of Small Hydropower Technology. Journal of Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol 26 (2013) 515–520. Elsevier.
- Havendri Adly, Irvan Arnif. (2010). Kaji Eksperimental Penentuan Sudut Ulir Optimum Pada Turbin Ulir Untuk Pusat Tenaga Listrik Mikrohidro. Prosiding SNNTM ke-9. 2010. Fakultas teknik Universitas Andalas, Padang.
- Hellmann, HD, (2003). Report on determination of hydraulic screw efficiency manufactured by Ritz-Astro Ltd. Technical University, Kaiserslautern Germany.
- Lashofer, A., Kaltenberger, F., and Pelikan, F. (2011). "Wie gut bewahrt sich die wasserkraftschnecke in der Praxis." Wasserwirtschaft, 7–8, 76–82.
- Lyon Murray, et al. (2013). Archimedes Screw For Microhydro Power Generation. Proceeding of the ASME 2013 ES-FuelCell2013-18067. Minneapolis, MN, USA.
- Müller, G. & Senior, J. (2009). Simplified theory of Archimedean screws, Journal of Hydraulic. Vol 47, pp. 666–669. University of Southamton, UK.
- Munson R. Bruce, et all. Fundamentals of Fluid Mechanics. 4th. Ed, Wiley, 2004.
- Nagel, G. (1968). Archimedean screw pump handbook. Prepared for Ritz-Astro Pumpwerksbau GMBH Roding, Nürnberg, Germany.

- Nagel, G., Radlik, K.A (1988). Wasserförderschnecken (Water lifting screws), Bauverlag, Wiesbaden/Berlin (in German).
- Nuembergk, D., M & Rorres C., (2013). Analytical Model for Water Inflow of an Archimedes Screw Used in Hydropower Generation. *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 139, no. 2.
- Reza Ali, et al (2013). Modeling of Archimedes Turbine for Low Head Hydro Power Plant in Simulink MATLAB. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*. Vol. 2 Issue 7.
- Rorres, C (2000). The turnoff the screw : Optimal design of the Archimedean screw. *Journal of Hydraulic*. 126(1), 72–80.
- Saroinsong Tineke, et al (2016). Effect of Froude Numbers On Three-Bladed Archimedes Screw Turbine Efficiency. *International Journal of Renewable Energy Research*. Vol.6, No 3, pp 1153–1158. Gazi University, Turkey.
- Saroinsong Tineke, et al (2016). Fluid Flow Phenomenon in a Three-Bladed Power Generating Archimedes Screw Turbine. *Journal of Engineering Science and Technology Review*. Vol.9, no 2, pp. 72–79. Kavala Institute of Technology, Greece (Yunani)
- Saroinsong Tineke, et al (2016). Performance of Three-Bladed Archimedes Screw Turbine. *ARPN journal of Engineering and Applied Sciences*. Vol.11, No 15, pp. 9491–9495. ARPN Journals, Pakistan
- Saroinsong Tineke, et al.(2015) The Effect of Head Inflow and Turbine Axis Angle Towards The Three Row Bladed Screw Turbine Efficiency. *International Journal of Applied Engineering Research*. Vol.10, no 7, pp 16977–16984. RIP, India
- Waters Shaun, et al. (2015). Over 2000 years in review : revival of the Archimedes Screw from Pump to Turbine. *Journal of Renewable and Sustainable Energy review*. 51 (2015) 497–505. Elsevier.
- Williamson S.J et al (2014). Low head pico hydro turbine selection using a multi-criteria analysis. *Journal of Renewable Energi*, vol 61 (2014) 43–50. Elsevier.