

## PENENTUAN DIMENSI SUDU TURBIN DAN SUDUT KEMIRINGAN POROS TURBIN PADA TURBIN ULIR ARCHIMEDES

Herman Budi Harja<sup>1</sup>, Halim Abdurrahim<sup>2</sup>, Sigit Yoewono<sup>3</sup>, Hendi Riyanto<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Politeknik Manufaktur Negeri Bandung, <sup>2</sup>FTMD Institut Teknologi Bandung

Jalan Kanayakan No.21 Dago Bandung

E-mail : h\_b\_harja@yahoo.com

### Abstrak

Telah dilakukan penelitian penentuan dimensi sudu turbin dan sudut kemiringan poros turbin pada turbin ulir Archimedes. Penelitian ini melakukan kajian pada beberapa parameter turbin ulir yaitu penentuan dimensi sudu turbin dan sudut kemiringan poros turbin agar dihasilkan kinerja turbin optimum. Penentuan dimensi sudu turbin ulir mengikuti formulasi C.Rorres yang memaksimalkan volume air di antara kisar sudu turbin ulir. Dimensi sudu turbin ulir untuk potensi daya fluida head 2 meter dan debit 20 hingga 40 liter/detik yang dihasilkan memiliki spesifikasi: konstruksi rotor memiliki 2 buah sudu ulir, kisar ulir 413 mm, radius sudu luar ( $R_o$ ) 408 mm dan radius sudu dalam ( $R_i$ ) 109 mm. Kemudian dilakukan perhitungan panjang lintasan bentangan ulir agar menghasilkan kisar ulir sebesar 413 mm. Panjang lintasan bentangan ulir dapat diperoleh dengan menggunakan dua cara yaitu perhitungan persamaan helix atau simulasi *software* gambar, kedua cara ini menghasilkan panjang lintasan ulir sebesar 802 mm. Penentuan sudut optimum kemiringan poros turbin dihitung berdasarkan gaya berat dan gaya hidrostatis yang dihasilkan volume air di antara 2 sudu ulir, perhitungan ini mendapatkan sudut optimum kemiringan poros adalah 32°.

Kata kunci : *head* rendah, turbin ulir, kinerja , sudu turbin dan sudut kemiringan

### Abstract

*Research has been conducted and the determination of the dimensions of turbine blades on the turbine shaft tilt angle Archimedes screw turbine. This research conducted a study on several parameters to define optimum performance of screw turbine. it are the determination of the dimesions screw blade and the optimum angle of shaft slope.*

*Determination of dimensions screw blade was designed using Chriss Rorres formulation which maximizes the volume of water in screw turbin blade and made base from potential energy of water with 2 metres head and 20to 40 litres/second of rate flow. It consists of 2 blades having 413 mm pitch, 408 mm radius of external blade ( $R_o$ ), 109 mm radius of internal blade ( $R_i$ ) and 346 cm long of turbine shaft. The length of screw trajectory can be obtained by using two methods, equation helix calculation and software simulation. Those methode produce the same result of 802mm.*

*Determination of the optimum angle of shaft slofe is defined by the water weight and hydrostatis force analysis. It is found out at 32°.*

*Key Word : low head, screw turbine, performance, screw blade and slope shaft.*

## PENDAHULUAN

Potensi sumber energi air pada *head* sangat rendah ( $< 3$  meter) yang banyak terdapat di wilayah Indonesia saat ini belum banyak dimanfaatkan karena terkendala oleh ketersediaan teknologi yang mampu memanfaatkannya. Oleh karena itu diperlukan pengembangan teknologi yang dapat memanfaatkan potensi sumber energi tersebut. Turbin ulir merupakan jenis turbin yang mampu bekerja pada *head* sangat rendah.

Dengan semakin berkurangnya sumber energi fosil, maka salah satu alternatif sumber energi yang bisa menggantikannya adalah sumber energi terbarukan, khususnya sumber energi terbarukan yang teknologi pemanfaatannya memerlukan investasi kecil. Pembangkit listrik tenaga mikro hidro (PLTMH), sistem konversi energi angin (SKEA) dan pembangkit listrik tenaga panas bumi (PLTP) adalah beberapa contoh sistem konversi energi yang memanfaatkan sumber energi terbarukan, namun tidak semuanya memerlukan investasi kecil.

PLTMH memanfaatkan potensi energi aliran air yang memiliki *head* dan debit tertentu menjadi energi listrik. Sampai saat ini banyak pemanfaatan air sebagai sumber energi listrik hanya pada potensi energi air dengan *head* tinggi dan/atau debit besar, padahal banyak daerah di Indonesia memiliki potensi energi aliran air sungai dengan *head* sangat rendah ( $< 3$  meter). Oleh karena itu, diperlukan pengembangan jenis turbin yang dapat memanfaatkan potensi energi air dengan *head* sangat rendah. Beberapa jenis turbin air yang dapat bekerja pada *head* rendah adalah kincir air, turbin *kaplan* dan turbin ulir.

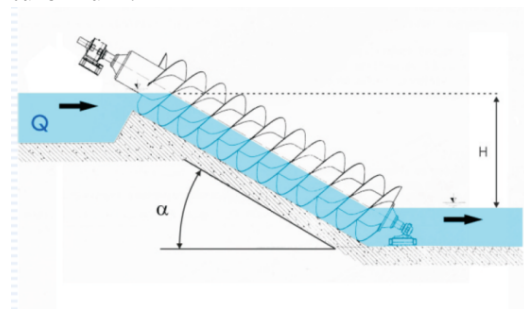
Penelitian ini mengkhususkan pada penentuan dimensi sudu turbin. Penentuan dimensi dan bentuk sudu turbin ulir akan mengacu pada formulasi *Rorres*. Pada dasarnya, formulasi pengoptimuman dimensi ulir *Archimedes* yang dilakukan oleh Chris Rorres adalah untuk penggunaannya sebagai pompa. Sedangkan perancangan pembuatan sudu ulir akan mengikuti persamaan helix dan simulasi perangkat lunak gambar teknik.

## TINJAUAN PUSTAKA

Turbin Ulir Archimedes merupakan teknologi yang sejak zaman kuno telah ditemukan dan diterapkan sebagai pompa, dimana pada konstuksinya terdiri dari satu atau beberapa sudu berbentuk heliks yang terpasang pada poros dan berfungsi sebagai *bucket* bergerak untuk membawa air ke atas. Kemudian seiring dengan kebutuhan pemanfaatan sumber potensi energi air dengan *head* rendah, penggunaan ulir *Archimedes* diterapkan sebagai turbin air<sup>(1;2)</sup>.

Prinsip kerja turbin ulir *Achimedes* ialah (lihat Gambar 1) :

- air dari ujung atas mengalir masuk ke ruang di antara kisar sudu ulir (*bucket*) dan keluar dari ujung bawah;
- gaya berat air dan beda tekanan hidrostatis dalam *bucket* di sepanjang rotor mendorong sudu ulir dan memutar rotor pada sumbu dan
- rotor turbin memutar generator listrik yang disambungkan dengan ujung atas poros turbin ulir.



Gambar 1. Skematik turbin ulir<sup>(3)</sup>.

Oleh karena itu volume air dalam *bucket* harus dimaksimumkan agar menghasilkan efisiensi pembangkitan daya tertinggi. Adapun keuntungan turbin ulir dibandingkan dengan jenis turbin lain adalah sebagai berikut:

- Dapat dioperasikan pada head sangat rendah, hingga 1 meter;
- Dapat dioperasikan tanpa saringan dan tidak mengganggu ekosistem sungai;
- Umur turbin lebih tahan lama terutama jika dioperasikan pada putaran rendah;
- Mudah dalam pengoperasian dan murah dalam perawatan;
- Memiliki efisiensi dan kehandalan yang tinggi (lihat Tabel 1);
- Mampu bekerja pada rentang variasi debit yang lebar (lihat Tabel 1).

Pada Tabel 1 ditunjukkan perbandingan efisiensi turbin air jenis ulir *Archimedes*, turbin Kaplan (aksial), turbin Francis (sentrifugal) dan turbin Banki (*cross flow*) terhadap tingkat rendaman sudu dalam air. Tabel tersebut menunjukkan bahwa turbin ulir *Archimedes* mengungguli jenis turbin lain untuk seluruh kondisi rendaman. Efisiensi 25% dicapai pada tingkat rendaman 10% dan 87% pada tingkat rendaman 100%.

Tabel 1. Perbandingan efisiensi berbagai jenis turbin air terhadap tingkat rendaman<sup>(3)</sup>.

Water engine type	Water engine filling									
	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
Archimedean screw	25	74	77	79	82	83	84	85	86	87
Kaplan turbine	15	70	85	88	90	90	90	90	88	85
Francis turbine	-	-	15	58	72	78	82	82	82	80
Banki turbine	-	40	60	68	72	74	75	74	72	70
Water engine efficiency [%]										

#### Daya Bangkitan Sumber Energi Air

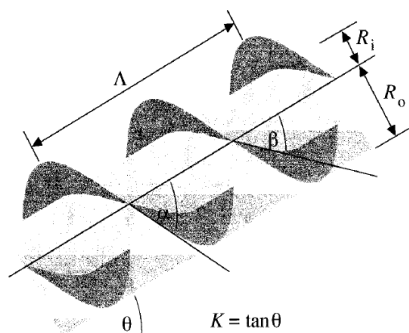
Daya yang bisa dibangkitkan dari sumber energi air dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (1) berikut<sup>(4)</sup>:

$$(1) \quad P = \eta \rho g H Q$$

Lambang huruf  $P$  mewakili potensi daya dalam satuan Watt ( $W$ ),  $\eta$  menunjukkan efisiensi konversi energi ditentukan oleh jenis turbin yang digunakan untuk memanfaatkan sumber energi air ( $0 < \eta < 1$ ),  $\rho$  melambangkan massa jenis air ( $1000 \text{ kg/m}^3$ ),  $g$  adalah percepatan gravitasi ( $9,81 \text{ m/s}^2$ ) dan  $Q$  adalah debit air ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) serta  $H$  adalah *head* air ( $\text{m}$ ).

#### Dimensi Turbin Ulir

Geometri sebuah turbin maupun pompa ulir *Archimedes* ditentukan oleh dimensi luar dan dimensi dalam turbin (lihat Gambar 2).



Gambar 2. Profil turbin ulir 2 sudu<sup>(5)</sup>.

Keterangan :

- $R_i$  : jari-jari dalam sudu ulir ( $0 < R_i < R_o$ )
- $R_o$  : jari-jari luar sudu turbin
- $\Lambda$  : kisar ulir sudu turbin ( $0 \leq \Lambda \leq 2\pi R_o / K$ )
- $K$  :  $\tan \theta$
- $\theta$  : sudut kemiringan poros turbin
- $\beta$  : sudut ulir (pada posisi  $R_i$ )
- $\alpha$  : Sudut ulir (pada posisi  $R_o$ )
- $N$  : Jumlah sudu (1,2,...)

Dimensi luar turbin terdiri jari-jari terluar sudu ulir  $R_o$ , kisar ulir  $\Lambda$ , dan sudut kemiringan poros  $\theta$ . Dimensi luar ditentukan oleh lokasi penempatan ulir, material ulir yang akan digunakan dan debit air. Sudut kemiringan poros  $\theta$  turbin umumnya antara  $30^\circ$  sampai  $60^\circ$ .

Sedangkan dimensi bagian dalam turbin meliputi jari-jari dalam  $R_i$ , jumlah sudu  $N$ , dan jarak antar sudu bila  $N > 1$ . Dimensi dalam turbin bebas dipilih, sehingga pengoptimuman turbin ulir dapat dilakukan dengan mengubah dan memvariasikannya.

Panjang poros ulir  $L$  dapat dihitung mengingat hubungan berikut :

$$(2) \quad L = \frac{H}{K}$$

*Rorres* menawarkan formulasi untuk menentukan dimensi-dimensi ulir *Archimedes* berdasarkan perhitungan pemaksimalan volume air di antara kisar sudu, volume maksimum tersebut dinyatakan dalam persamaan (3).

(3)

Pada volume maksimum tersebut, diameter dalam  $R_i^*$  dapat diperoleh dari persamaan (4).

$$(4) \quad R_i^* = \rho^* R_o$$

Kisar ulir pada volume maksimum dinyatakan oleh persamaan (5)

$$(5) \quad \Lambda^* = \frac{\pi R_o \Lambda^*}{K}$$

Nisbah volume optimum  $\nu^*$ , jari-jari optimum dan nisbah kisar optimum  $N$  ditampilkan pada Tabel 2. Nisbah volume, nisbah jari-jari dan nisbah kisar didefinisikan pada persamaan (6), (7), (8) berikut ini :

$$v^* = \frac{V_T}{\pi R_o^2 \Delta} \quad (6)$$

$$\rho^* = \frac{R_i}{R_o} \quad (7)$$

$$\lambda^* = \frac{\Delta K}{2\pi R_o} \quad (8)$$

Jumlah kisar  $m$  yang diperlukan pada panjang poros turbin ulir  $L$  untuk panjang kisar optimum  $\Delta^*$  dapat dihitung dengan persamaan (9).

$$m = \frac{L}{\Delta^*} \quad (9)$$

Persamaan (2) s.d (9) bersama Tabel 2 digunakan untuk menentukan dimensi rancangan turbin ulir *Archimedes* dalam kegiatan penelitian ini.

Putaran turbin ulir maksimum  $n_{maks}$  (rpm) dan hubungan antara dimensi kisar  $\Delta$  dan jari-jari luar sudu  $R_o$  untuk berbagai sudut kemiringan turbin dapat dinyatakan dalam persamaan (10) dan (11) <sup>(6)</sup>.

$$n_{maks} = \frac{50}{2R_o^{2/3}} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \Delta &= 2,4 R_o \text{ untuk } \theta < 30^\circ \\ \Delta &= 2,0 R_o \text{ untuk } \theta = 30^\circ \\ \Delta &= 1,6 R_o \text{ untuk } \theta > 30^\circ \end{aligned} \quad (11)$$

Tabel 2. Parameter Ulir *Archimedes* Optimum menurut Chriss *Rorres* <sup>(5)</sup>.

Number of blade N	Optimal radius ratio $\rho^*$	Optimal pitch ratio $\lambda^*$	Optimal volume-per-tum ratio $\lambda^*v(N, \rho^*, \lambda^*)$	Optimal volume ratio $v(N, \rho^*, \lambda^*)$
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
1	0,5358	0,1285	0,0361	0,2811
2	0,5369	0,1863	0,0512	0,2747
3	0,5357	0,2217	0,0598	0,2697
4	0,5353	0,2456	0,0655	0,2667
5	0,5352	0,2630	0,0696	0,2647
6	0,5353	0,2763	0,0727	0,2631
7	0,5354	0,2869	0,0752	0,2619
8	0,5354	0,2957	0,0771	0,2609
9	0,5356	0,3029	0,0788	0,2601
10	0,5356	0,3092	0,0802	0,2592
11	0,5358	0,3145	0,0813	0,2586
12	0,5360	0,3193	0,0824	0,2580
13	0,5360	0,3234	0,0833	0,2574
14	0,5360	0,3270	0,0841	0,2571
15	0,5364	0,3303	0,0848	0,2567
16	0,5362	0,3333	0,0854	0,2562
17	0,5362	0,3364	0,0860	0,2556
18	0,5368	0,3380	0,0865	0,2559
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.
20	0,5394	0,3953	0,0977	0,2471

#### Perancangan Pembuatan Sudu Ulir

Perhitungan panjang lintasan bentangan sudu ulir dapat dilakukan melalui 2 cara yaitu dengan perhitungan persamaan helix  $L_{helix}$ , persamaan (12), atau didapat dari hasil simulasi perangkat lunak gambar teknik tiga dimensi (Solidwork<sup>TM</sup>).

$$L_{helix} = N_{helix} \sqrt{(2\pi R_i)^2 + \Delta^2} \quad (12)$$

Jumlah helix dinyatakan dalam lambang  $N_{helix}$  pada persamaan (12).

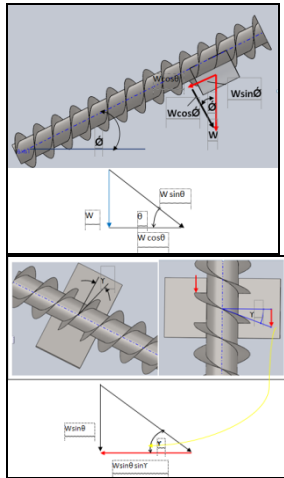
Diameter bakalan sudu  $D$  dapat dihitung berdasarkan pada panjang lintasan bentangan  $L_{helix}$ , yaitu :

$$D_i = \frac{L_{helix}}{\pi} \quad (13)$$

Sesuai dengan prinsip kerja turbin ulir *Archimedes* bahwa berputarnya rotor turbin ulir adalah disebabkan oleh gaya berat dan gaya hidrostatis dari volume air yang berada di antara dua sudu sepanjang rotor turbin ulir. Oleh karena itu pendekatan perhitungan torsi yang dihasilkan poros turbin ulir dikaji dari

gaya berat dan gaya hidrostatik fluida yang berada di antara dua sudu<sup>(7:8)</sup>.

### Perhitungan Gaya Berat



Gambar 3. Skema perhitungan torsi akibat gaya berat.

Perhitungan gaya berat air dengan volume air pada bucket dapat dihitung menggunakan persamaan (14):

$$F_m = \rho * V * g \quad (14)$$

Dan gaya berat arah aksial (sejajar sumbu rotor) dapat dihitung menggunakan persamaan (15) :

$$F_m \sin \theta \quad (15)$$

Sehingga gaya pada poros dihitung dari gaya yang terjadi pada sudut ulir dengan sudut  $\Upsilon$ .

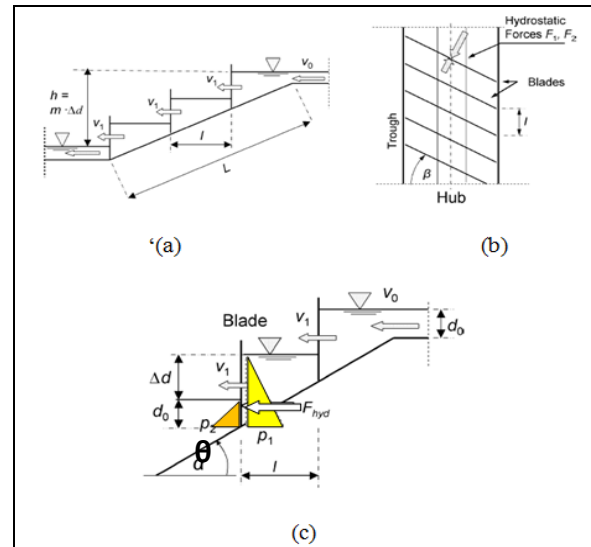
$$\Upsilon = (\alpha + \beta) / 2 \quad (16)$$

$$F_{\text{tangensial}} = F_m \sin \theta \sin \Upsilon \quad (17)$$

Torsi dari gaya berat (seperti diperlihatkan pada Gambar 3) merupakan perkalian gaya tangensial pada sudu akibat gaya berat dari volume air di bucket dengan jarak titik berat volume bucket tersebut terhadap sumbu putar.

### Perhitungan Gaya Hidrostatik

Perbedaan gaya hidrostatik pada sudu turbin ulir (seperti ditunjukkan pada Gambar 4) terjadi karena adanya perbedaan head air antara head air di atas sudu (*head upper*) dengan head air di bawah sudu (*head down*). Pengurangan besar gaya hidrostatik di atas kisar dengan gaya hidrostatik di bawah kisar merupakan gaya dan menjadi torsi yang menyebabkan rotor berputar.



Gambar 4. Skema pendekatan gaya hidrostatik pada turbin ulir (a) Pandangan samping (b) Pandangan atas, (c) Gaya hidrostatik pada sudu<sup>(8)</sup>

Perhitungan gaya hidrostatik pada turbin ulir dapat menggunakan persamaan (18) dan (19)<sup>(8)</sup>:

$$F_{hyd} = \frac{(d_0 + \Delta d)^2 - d_0^2}{2} * \rho * g$$

(18) Dimana

$$\Delta d = \frac{h}{m}$$

(19)

$$h_u = \Delta d + d_0$$

$$h_d = d_0$$

Sehingga gaya hidrostatik fluida adalah:

$$F_{hyd} = \frac{h_u^2 - h_d^2}{2} * \rho * g \quad (20)$$

Gaya tangensial hidrostatik fluida ( $F_{hyd t}$ ) :

$$F_{hyd t} = F_{hyd} \cos \left( \frac{\alpha + \beta}{2} \right) \quad (21)$$

### METODE PENELITIAN

Penentuan dimensi sudu turbin ulir *Archimedes* dan sudut kemiringan poros turbin dilakukan dengan urutan langkah-langkah kegiatan:

- survei potensi sumber energi air yang cocok untuk dimanfaatkan menggunakan turbin ulir;
- mengukur head dan debit sumber energi air yang ditemukan;

- menghitung daya yang bisa dihasilkan dari sumber energi air bersangkutan;
- menentukan dimensi sudu ulir berdasarkan pada formulasi *Rorres*<sup>(5)</sup>;
- perhitungan bentangan helix untuk sudu turbin ulir dan simulasi bentangan menggunakan perangkat lunak gambar teknik Solidwork<sup>TM</sup>;
- Penentuan sudut kemiringan poros turbin ulir yang optimum menggunakan perhitungan torsi akibat gaya berat dan gaya hidrostatis fluida yang ada di antara 2 sudu.

### HASIL DAN PEMBAHASAN

Turbin ulir yang dirancang berdasarkan potensi sumber energi air yang tersedia (lihat Gambar 5), adalah sebagai berikut:

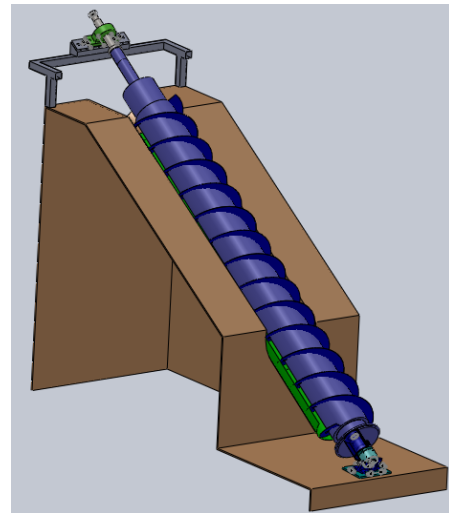
- *Head* efektif : 2 meter
- Debit air : 20 – 40 liter /detik



Gambar 5. Potensi sumber energi air yang akan dimanfaatkan.

Dengan demikian, mengacu pada persamaan (1), daya terbesar yang bisa dibangkitkan mencapai  $392 \text{ W} \leq P \leq 784 \text{ W}$ . Pada kenyataannya, daya yang dibangkitkan akan lebih rendah dari pada daya di atas karena efisiensi turbin ulir dan efisiensi generator listrik.

Sudut kemiringan turbin ulir  $\vartheta$  yang akan dibuat ditetapkan sebesar  $30^\circ$ , maka pada *head* 2 m, panjang poros turbin ulir  $L$  yang dibutuhkan adalah 3,46 m, yaitu dihitung dari persamaan (2). Diameter dalam turbin ulir  $R_i$  pada perancangan dipilih sebesar 0,01095 m, yaitu diameter luar pipa 8 inci yang digunakan sebagai poros turbin.



Gambar 6. Isometrik rancangan turbin ulir *Archimedes*.

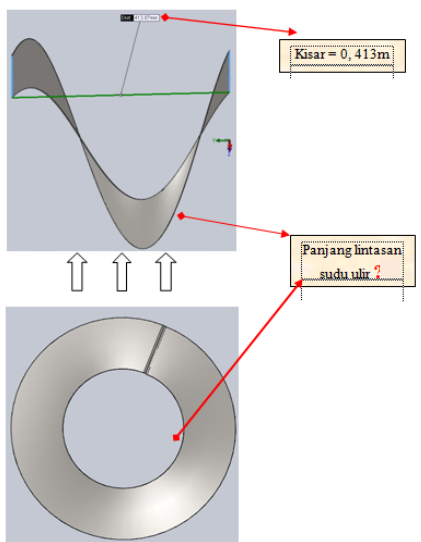
Dalam penentuan dimensi sudu turbin ulir ini dipilih jumlah sudu ulir  $N$  sebanyak 2. Mengacu pada tabel 2 untuk  $N=2$  dipilih :

- $\rho^* = 0,5369$ ;
- $\lambda^* = 0,1863$  dan
- $v^* = 0,2747$

Maka didapatkan:

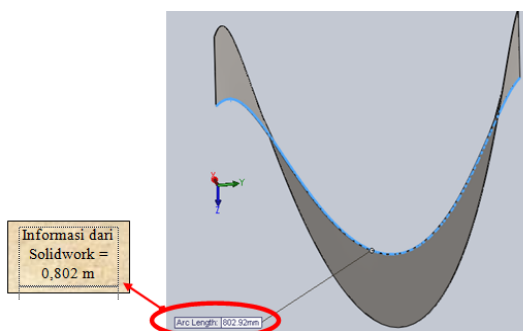
- Jari-jari luar  $R_o = 0,204 \text{ m}$
- Panjang kisar  $\Lambda = 0,413 \text{ m}$
- $V^T = 0,014857 \text{ m}^3$  ;
- Jumlah kisar  $m = 8,37$  ; dan
- $V^T$  pada seluruh sudu =  $0,124 \text{ m}^3$ .

Panjang lintasan bentangan sudu ulir dihitung menggunakan persamaan (12) untuk helix ( $N_{helix} = 1$ ), yaitu  $L_{helix} = 0,802 \text{ m}$  (lihat Gambar 7). Kemudian perangkat lunak gambar teknik (lihat Gambar 8) menghasilkan perhitungan panjang lintasan bentangan sudu  $L_{helix}$  sebesar 0,802 m, sama dengan angka yang diperoleh dari persamaan (12).

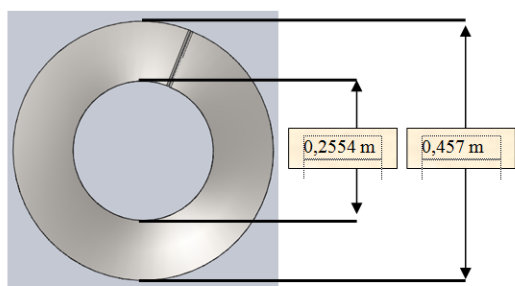


Gambar 7. Panjang lintasan bentangan satu kisar sudu ulir.

Dari hasil perhitungan panjang lintasan bentangan sudu di atas, maka diameter bakalan sudu dapat dihitung melalui persamaan (13). Hasilnya  $D_f = 0,255$  m (lihat Gambar 9).

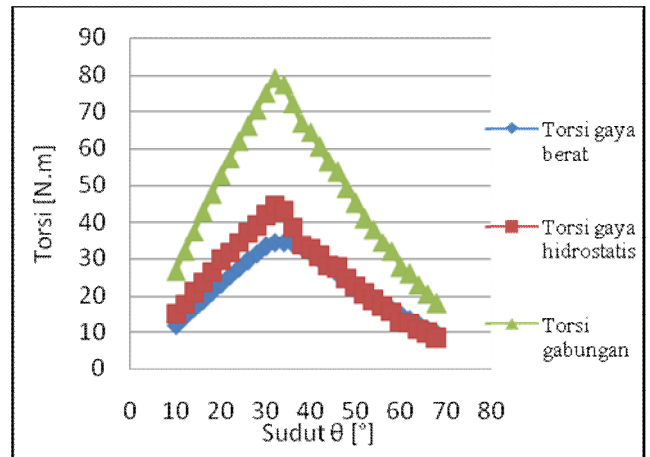


Gambar 8. Panjang lintasan bentangan satu kisar sudu ulir hasil SolidWork™.



Gambar 9. Dimensi bakalan satu kisar sudu turbin.

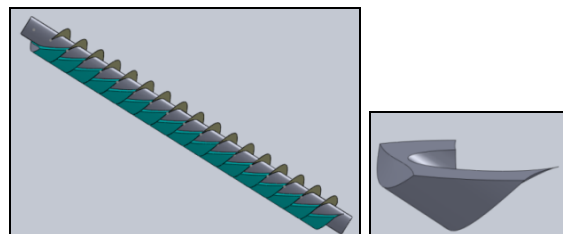
Hasil perhitungan torsi akibat gaya berat dan gaya hidrostatik dengan volume *bucket* maksimum ditunjukkan pada gambar 10 dimana sudut optimum kemiringan poros ( $\theta$ ) adalah pada sudut  $32^\circ$  yang dapat menghasilkan torsi terbesar.



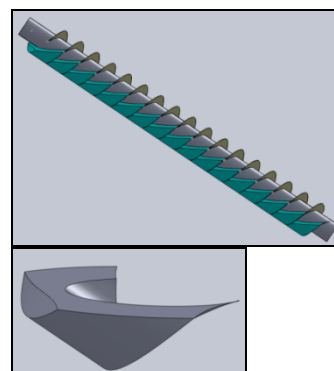
Gambar 10. Grafik pengaruh sudut ( $\theta$ ) kemiringan poros terhadap torsi akibat gaya berat dan gaya hidrostatik.

Besar sudut kemiringan poros berpengaruh terhadap banyaknya volume air pada ruang di antara dua sudu (*bucket*). Pada sudut di atas  $32^\circ$ , banyaknya air pada *bucket* akan semakin berkurang karena sebagian volume air akan mengalir pada bagian atas sudu ulir dan tidak menghasilkan gaya pada poros.

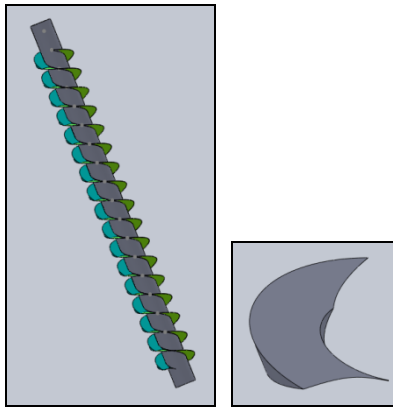
Pada Gambar 11,12 dan 13 diperlihatkan bentuk air pada volume *bucket* pada saat sudut kemiringan poros  $32^\circ$  dan  $68^\circ$ , dimana volume air pada *bucket* dengan sudut  $\theta=68^\circ$  lebih sedikit dari pada volume air pada *bucket* dengan sudut  $\theta=32^\circ$ .



Gambar 11. Bentuk air pada volume *bucket* sebesar  $0,120$  m<sup>3</sup> sudut ( $\theta$ ) kemiringan poros  $32^\circ$ .



Gambar 12. Bentuk air pada volume *bucket* sebesar  $0,110 \text{ m}^3$  dengan sudut  $\theta$  kemiringan poros  $34^\circ$ .



Gambar 13. Bentuk air pada volume *bucket* sebesar  $0,0154 \text{ m}^3$  sudut ( $\theta$ ) kemiringan poros  $68^\circ$ .

### KESIMPULAN DAN SARAN

Dari penelitian penentuan dimensi sudu turbin dan sudut kemiringan poros turbin ulir *Archimedes* ini maka dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Penentuan dimensi turbin ulir menggunakan formulasi *Rorres* dilakukan untuk mengoptimalkan volume *bucket* pada sudu turbin.
2. Penentuan bakalan bentangan sudu turbin dapat menggunakan persamaan helix atau informasi perangkat lunak gambar teknik.
3. Kinerja turbin ulir telah diperoleh dari penelitian ini, dimana hasil perhitungan gaya berat dan gaya hidrostatis pada volume *bucket* maksimum diperoleh sudut optimum pada sudut  $\theta=32^\circ$ .

### Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terimakasih kepada POLMAN Bandung yang telah memfasilitasi penelitian ini.

### DAFTAR PUSTAKA

1. Havendri, A. dan Arnif, I., 2010. *Kaji Eksperimental Penentuan Sudut Ulir Optimum pada Turbin Ulir untuk Data Perancangan Turbin Ulir pada PLTMH dengan Head Rendah*, Prosiding SNTM IX, Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin ke-19, 13-15 Oktober 2010, Palembang, Indonesia.
2. Hellmann, H., 2003. *Gutachten zur Wirkungsgradbestimmung einer Wasserkraftschnecke Fabrikat Ritz-Atro [Report on determination of hydraulic screw efficiency manufactured by Ritz-Atro Ltd.]*, Fachbereich Maschinenbau und Verfahrenstechnik, Technical University, Kaiserslautern, Germany.
3. <http://www.gess.cz/en/small-water-plant-archimedean-screw-turbine.html>, diakses tanggal 2 Juli 2011.
4. The British hydropower association, 2005. *A guide to UK mini-hydro developments*, The British hydropower association.
5. *Rorres, C., 2000. The Turn of the Screw :Optimal design of an archimedes*, Journal of Hydraulic Engineering, 126(1), pp.72-80.
6. Nagel, G., 1968. *Archimedean Screw Pump Handbook*, Prepared for Ritz-Atro Pumpwerksbau GMBH Roding, Nu'rnberg, Germany.
7. Nagel, G., Radlik, K., 1988. *Wasserförderschnecken [Water lifting screws] Bauverlag*, Wiesbaden/Berlin, German.
8. Muller, G., 2009. *Simplified Theori of Archimedean Screw*, Journal of Hydraulic Engineering, Vol.47, No.5.