

# PERANCANGAN SISTEM PEMOMPAAN BERTENAGA ANGIN UNTUK APLIKASI PEMBANGKIT LISTRIK MIKROHIDRO PADA GEDUNG BERTINGKAT

William Alex Ginardy Lie<sup>1)</sup>, Fandi Dwiputra Suprianto<sup>2)</sup>

Program Studi Teknik Mesin Universitas Kristen Petra<sup>1,2)</sup>

Jl. Siwalankerto 121-131, Surabaya 60236, Indonesia<sup>1,2)</sup>

Phone: +62-31-8439040, Fax: +62-31-8417658<sup>1,2)</sup>

E-mail : [williamalexginardylie@gmail.com](mailto:williamalexginardylie@gmail.com)<sup>1)</sup>, [fandi@petra.ac.id](mailto:fandi@petra.ac.id)<sup>2)</sup>

## ABSTRAK

Peningkatan kebutuhan akan penggunaan energi di gedung tinggi menyebabkan peningkatan permintaan akan energi listrik dari sumber bahan bakar fosil. Gedung-gedung perlu memiliki alternatif untuk memenuhi kebutuhan energinya secara mandiri dari sumber energi yang bersih dan berkelanjutan. Tugas Akhir ini bertujuan untuk mendesain mekanisme dan spesifikasi sistem pemompaan dengan tenaga angin untuk mengkonversi energi angin ke energi potensial berupa penyimpanan air di ketinggian gedung. Energi potensial ini akan dikonversikan kembali menjadi energi listrik oleh sistem mikrohidro. Komponen sistem terdiri atas tangki penampungan air atas dan bawah, sistem mikrohidro, pompa piston, rangkaian *gearbox*, sistem perpipaan dan turbin angin jenis Savonius.

Dengan target desain daya listrik 5 kW, sistem ini dirancang untuk beroperasi di gedung P1 dan P2 UK Petra setinggi 52 meter dengan aliran air mikrohidro 28 L/s. Digunakan 5 set turbin angin Savonius seluas 73,8 m<sup>2</sup> yang dikopel dengan sistem gearbox untuk menyediakan daya 1,135 HP dan torsi 765,011 Nm bagi pompa piston tipe FMC E0413 untuk beroperasi selama 24 jam mengisi tangki air bervolume total 361,2 m<sup>3</sup>. Sebuah sistem prototipe dibuat untuk mengesahkan perancangan sistem ini, bertujuan untuk memompa air sebanyak 2 L/menit dengan turbin angin seluas 0,3572 m<sup>2</sup>. Efisiensi teoritis sistem adalah 19,73 % dan prototype adalah 1,25 %.

*Kata kunci: Gedung; Mikrohidro; Pompa; Savonius; Angin; Energi; Penyimpanan*

## 1. Pendahuluan

Dewasa ini, kebutuhan listrik yang besar di daerah perkotaan, terutama di bangunan-bangunan *modern* menyebabkan produksi listrik dari perusahaan listrik negara (PLN) sebagian besar dialihkan untuk menenagai aktivitas gedung-gedung bertingkat. *Trend* ini semakin meningkatkan konsumsi listrik seiring tahun ke tahun [1]. Dibutuhkan solusi pemenuhan kebutuhan energi listrik secara mandiri pada gedung-gedung untuk mengurangi ketergantungan produksi energi listrik dari bahan bakar fosil.

Untuk mewujudkan konsep gedung yang mandiri dalam energi, diperlukan sebuah sistem pembangkitan listrik bagi gedung baru P1 dan P2 Universitas Kristen Petra, yang memiliki potensi ketinggian bangunan untuk dimanfaatkan sebagai sumber energi potensial yang berkelanjutan dan geometri gedung yang dioptimasi untuk aliran angin pada celah antar kedua bangunan.



Gambar 1. Gedung P1 dan P2 UK Petra [18]

Perancangan ini bertujuan untuk mendapatkan desain mekanisme dan spesifikasi sistem pemompaan dengan tenaga angin untuk mengkonversi energi angin ke energi potensial berupa penyimpanan air di ketinggian gedung. Energi potensial ini akan dikonversikan kembali menjadi energi listrik oleh sistem mikrohidro.

Diharapkan desain sistem pembangkitan tenaga mikrohidro ini dapat direalisasikan dan dimanfaatkan untuk membangkitkan energi listrik secara mandiri bagi gedung P1 dan P2 Universitas Kristen Petra, yang mampu menyediakan kebutuhan listrik secara konstan dan juga mendukung konsep gedung yang ramah lingkungan. Sistem ini diharapkan mendorong penghematan dalam konsumsi energi dan mendukung langkah pemerintah Indonesia dalam melakukan diversifikasi energi.

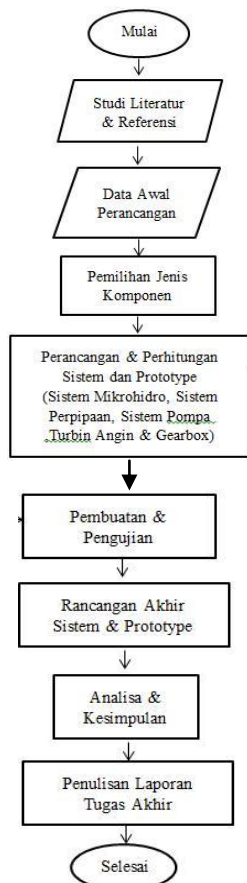
Herytoh [2] telah mendesain konsep desain turbin air sebagai alat pembangkitan listrik, menggunakan tangki penyimpanan (*reservoir*) atas dan bawah yang dibangun di sebuah menara khusus, untuk menciptakan beda potensial antara sumber air dengan turbin air. Sistem pada karya ini menggunakan turbin angin jenis *horizontal* dengan sudu turbin yang didesain berjumlah banyak untuk menggerakkan pompa torak (*plunger pump*) yang digunakan untuk menaikkan air. Namun karena jenis turbin angin yang digunakan adalah turbin angin sumbu *horizontal*, yang memiliki karakteristik keunggulan untuk membangkitkan daya, bukan torsi, maka torsi yang dihasilkan lebih sedikit

daripada turbin berjenis *vertical axis*. Selain itu juga turbin *horizontal axis* juga rentan terhadap perubahan arah angin sehingga putaran kincir yang dihasilkan juga berubah-ubah.

Ehsan, M.M dkk [3] melakukan perancangan untuk menyediakan pasokan listrik tambahan dengan integrasi turbin angin dan turbin *Pico Hydro* yang dipasang di atas bangunan bertingkat tinggi. Turbin *Pico Hydro* dipasang di atas tangki penyimpanan di mana tangki diisi dengan air dengan pompa berkapasitas tinggi yang dipasang di tingkat dasar bangunan. Kelebihan sistem ini adalah dapat menyediakan daya lebih untuk mendukung pasokan listrik pada *peak hours* (jam sibuk), namun air yang telah diturunkan ke turbin oleh pompa dari penampungan air di atas bangunan tidak dapat dikembalikan ke penampungan atas untuk mengulangi proses tersebut, sehingga ketika persediaan air telah habis, maka turbin tidak dapat berputar dan listrik tidak dapat dihasilkan.

## 2. Metode Perancangan

Secara garis besar, keseluruhan proses perancangan ini dapat digambarkan dalam diagram berikut :



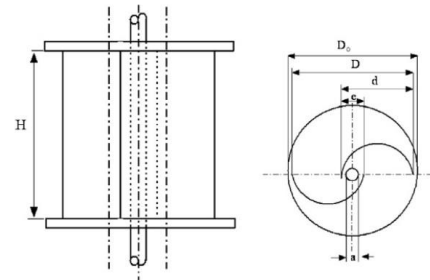
**Gambar 2.** Diagram alir perancangan

Diketahui data awal yakni kecepatan angin rata-rata  $V_{average} = 5 \text{ m/s}$  [22] dan waktu operasi gedung 8 jam.

Dipilih turbin angin jenis *vertical axis* jenis Savonius dikarenakan turbin angin jenis *Savonius* dapat menghasilkan torsi *start* lebih besar dari turbin jenis lainnya, sehingga cocok digunakan untuk aplikasi sistem

pemompaan yang membutuhkan torsi *start* yang besar.

Turbin angin Savonius juga dapat beroperasi dengan kecepatan angin yang relatif lebih rendah, mudah dibuat dan memiliki koefisien daya yang lebih baik. Turbin Savonius ini menggunakan konfigurasi 2 *blade* dengan efisiensi lebih tinggi, dengan *Overlap Ratio* [13] (perbandingan jarak celah pada poros turbin dengan diameter blade) optimal  $e = 0,15$  dan *Aspect Ratio* [10] (perbandingan tinggi dan diameter turbin) optimal  $0,5 < AR < 2$ .



**Gambar 3.** Skema turbin angin Savonius

Dipilih untuk menggunakan pompa *positive displacement* jenis piston pump dengan pertimbangan efisiensi pemompaan pompa *positive displacement* relatif konstan dengan kondisi putaran *input* yang tidak konstan. Sedangkan pada pompa sentrifugal, efisiensi pompa turun secara drastis di kondisi putaran yang tidak konstan [5]. *Piston pump* memiliki kelebihan dari pompa *positive displacement* lainnya seperti *head range* tinggi, *input power* kecil, *flow range* besar dan efisiensi yang baik [5].

	Piston	Plunger	Diaphragm	Screw	Vane
<b>Head Range (m)</b>	5-200	40-400	1-2	0.2-1	5-10
<b>Input Power (kW)</b>	0.03-50	0.05-50	0.03-5	0.04	0.05-0.5
<b>Flow Range (m<sup>3</sup>/jam)</b>	2-100	2-50	2-20	15-30	2-20
<b>Efficiency (%)</b>	40-85	60-85	20-30	30-60	25-50

**Gambar 4.** Perbandingan karakteristik pompa *positive displacement* [5]

Persamaan-persamaan yang digunakan :

- Daya pembangkitan mikrohidro [4] : 
$$P = \rho \cdot Q \cdot h \cdot g \cdot \eta_{\text{turbin}} \quad (1)$$

- Debit Air Pemompaan ( $Q_{\text{pump}}$ ) 
$$Q_v = \frac{Q_{\text{rotasi}}}{n_{\text{pompa}}} \quad (2)$$

- Diameter pipa rekomendasi [6] 
$$D_{in} = \sqrt[2.65]{\frac{Q_{max}}{0.2785 \left(\frac{\Delta H}{L}\right)^{0.54} \cdot c_1}} \quad (3)$$

- Pressure drop Mayor [17] 
$$h_f = f \cdot \left(\frac{L}{D}\right) \cdot \left(\frac{V^2}{2 \cdot g}\right) \quad (4)$$

- Pressure Drop Minor [17]

$$\Delta H = \frac{K V^2}{2 g} \quad (5)$$

- Torsi start pompa ( $T_{start,pump}$ ) [8] :

$$T_{start,pump} (t) = \frac{1}{2} s \rho_w g H A_p \quad (6)$$

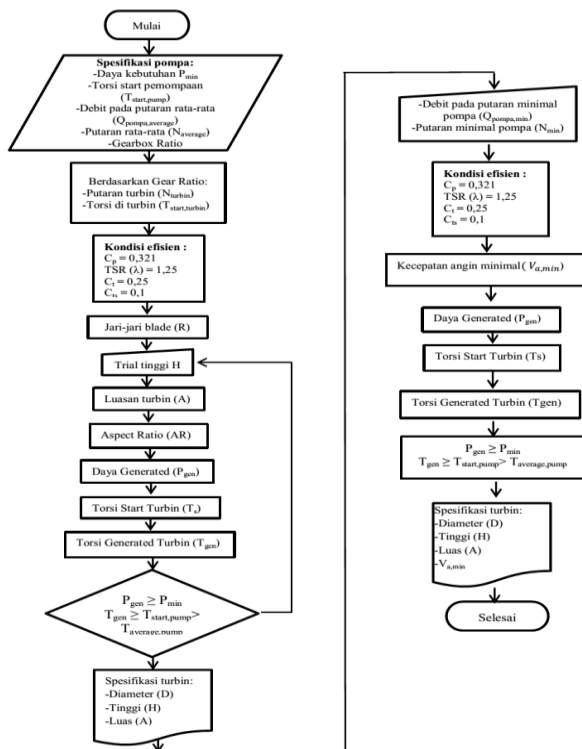
- Torsi operasi pompa ( $T_{average}$ ) [8]

$$T_{average,pump} = \frac{T_{start,pump}}{\pi} \quad (7)$$

- Daya yang dibutuhkan pompa ( $P_{pump}$ ) [8] :

$$P_{pump} = Q_{pump} \cdot \rho_{water} \cdot g \cdot H_{pump} \quad (8)$$

Perancangan turbin angin dijelaskan dalam diagram alir berikut :



Gambar 5. Diagram alir perancangan turbin angin

- Tip Speed Ratio [10]

$$\lambda = \frac{2 \cdot \pi \cdot R_{turbin} \cdot N_{turbin}}{60 \cdot V_{wind,average}} \quad (9)$$

- Daya yang dihasilkan turbin angin ( $P_{generated}$ ) [11]

$$P_{gen} = \frac{1}{2} C_p \rho_{udara} \cdot A_{turbin} (V_{wind,average})^3 \quad (10)$$

- Torsi Start turbin ( $T_{start}$ ) [9]

$$T_{start,turbin} = \frac{C_{ts} \cdot \rho_{udara} \cdot D_{turbin}^2 \cdot (V_{wind,average})^2 \cdot H_{turbin}}{4} \quad (11)$$

- Torsi yang dihasilkan turbin angin ( $T_{generated}$ ) [11]

$$T_{gen} = \frac{1}{2} \cdot C_t \cdot \rho_{udara} \cdot A_{turbin} (V_{wind,average})^2 \cdot R_{turbin} \quad (12)$$

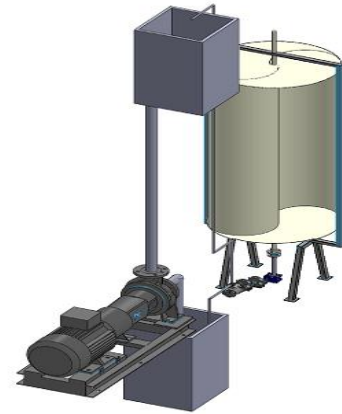
- Efisiensi Total Sistem

$$\eta_{sistem} = \frac{P_{min,pump}}{P_{wind,available}} \quad (13)$$

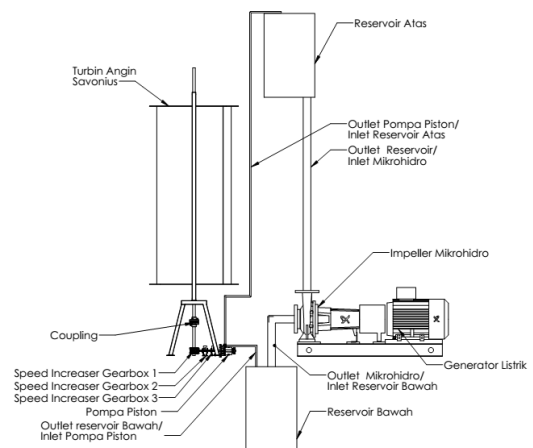
#### 4. Hasil dan Pembahasan

Perancangan dibagi menjadi perancangan sistem pemompaan mikrohidro dan perancangan prototype:

#### Sistem Pemompaan Mikrohidro



Gambar 6. Sistem Pemompaan Mikrohidro



Gambar 7. Skema letak komponen sistem pemompaan mikrohidro

#### a. Sistem Mikrohidro

Sistem mikrohidro digunakan untuk mengubah energi aliran air menjadi energi listrik melalui putaran turbin air. Sistem ini menggunakan turbin air tipe *Pump-as-Turbine* [4] yang mudah diproduksi dan tersedia di pasaran. Dengan ukuran impeller 80 x 65-125 mm diketahui parameter perancangan sebagai berikut :

Parameter		Unit	Keterangan
Jumlah	1	unit	
Head	52	m	
Daya perancangan	5000	watt	
Flow rate ( $Q_{mikrohidro}$ )	0,01256	m <sup>3</sup> /s	
Waktu operasi	8	Jam	(08.00-16.00)
Volume Tangki ( $V_{tank}$ )	363	m <sup>3</sup>	
Panjang x lebar x tinggi	17,3 x 7 x 3	m	

### b. Sistem Perpipaan

Sistem perpipaan didesain untuk meminimalisir head loss aliran dari pompa ke tangki penyimpanan atas. Digunakan pipa PVC dengan parameter desain sebagai berikut :

Panjang total pipa	55	m
Debit aliran (Q) total	0,00419	m <sup>3</sup> /s
Debit aliran (Q) pipa	0,000837	m <sup>3</sup> /s
Diameter pipa	0,75	inch
Head Loss Mayor (pipa)	19,848	m
Head Loss Minor (komponen)	0,36	m
Total Head	82,581	m
Pressure loss total	117,231	psi

### c. Sistem Pemompaan

Sistem pemompaan bertujuan untuk mengalirkan air dari tangki penyimpanan bawah ke tangki penyimpanan atas. Pemilihan spesifikasi pompa didasarkan pada kebutuhan debit pemompaan ( $Q_{\text{pipa}}$ ) dan tekanan kerja untuk mengatasi *pressure loss* aliran ( $P_{\text{loss}}$ ). Digunakan pompa piston FMC E0413 Axial Piston Pump [20], dengan spesifikasi :

Debit air pompa dibutuhkan		0,000837	m <sup>3</sup> /s
		13,27	GPM
Pressure minimal $P_{\text{min}}$		117,2	psi
Debit pompa	Minimal	14,01	GPM
	Rata-rata	20,65	GPM
Putaran pompa	Minimal	390	RPM
	Rata-rata	450	RPM
Stroke pompa		0,0254	m
		1	inch
Bore pompa		0,0412	m
		1,625	inch
Torsi maksimal start pompa ( $T_{st}$ )		27,52	Nm
Torsi operasional pompa ( $T_{\text{average}}$ )		8,76	Nm
Daya Pompa Minimal		1,135	HP

### d. Sistem Gearbox

Gearbox digunakan untuk mengubah putaran turbin angin menjadi putaran pompa yang lebih cepat. Perancangan gearbox didasarkan pada kebutuhan rasio kecepatan antara kecepatan turbin angin dan kebutuhan kecepatan pompa. Digunakan 3 set gearbox jenis speed increaser [18] [19] dengan rasio total 1 : 27,8

Pabrikan	Comer Industries
Negara	Italia
Jenis Gearbox	Speed Increaser

### e. Turbin Angin

Turbin angin ini dirancang untuk mengakomodasi kebutuhan *self-starting*, maka dirancang sebuah solusi menggunakan *coupling* untuk menurunkan kebutuhan torsi yang akan ditanggung pada saat kondisi start turbin, sehingga  $T_{\text{start,turbin}} = T_{\text{start,pompa}} = T_{\text{generated}}$

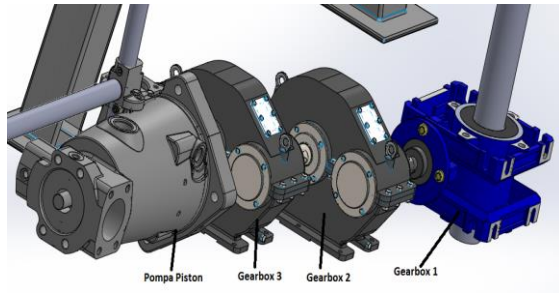
Dimensi turbin angin dirancang agar memenuhi kriteria daya minimal kebutuhan pompa ( $P_{\text{min}}$ ) dan torsi start

<b>Gearbox 1</b>		
Model	A-4A/B	
Rasio	1:4	
RPM maksimal	540	RPM
Daya maksimal	77	HP
Jenis Gear	Bevel Gear	
<b>Gearbox 2</b>		
Model	A-3A	
Rasio	1: 2,92	
RPM maksimal	540	RPM
Daya maksimal	37	HP
Jenis Gear	Bevel Gear	
<b>Gearbox 3</b>		
Model	A-4A/B	
Rasio	1: 2,43	
RPM maksimal	540	RPM
Daya maksimal	87	HP
Jenis Gear	Bevel Gear	

pompa ( $T_{\text{start,pompa}}$ ) pada kecepatan angin rata-rata ( $V_{\text{average}}$ ). Setelah didapatkan dimensi turbin, perancangan dilanjutkan untuk mendapatkan kecepatan angin minimal operasi ( $V_{\text{min}}$ ).

Parameter	Satuan	Perhitungan didasarkan pada	
		$N_{\text{min}}$	$N_{\text{average}}$
Putaran pompa (N)	RPM	390	450
Debit air ( $Q_{\text{pump}}$ )	GPM	14,01	16,16
	m <sup>3</sup> /s	0,000883	0,00102
Tip Speed Ratio (TSR) optimal		1,25	1,25
Koefisien daya turbin ( $C_p$ )		0,32	0,32
Koefisien torsi turbin ( $C_t$ )		0,25	0,25
Koefisien torsi statis turbin ( $C_{ts}$ )		0,1	0,1
<b>Gear Ratio</b>			
Ratio Gigi 1		4	4
Ratio Gigi 2		2,92	2,92
Ratio Gigi 3		2,38	2,38
Ratio transmisi total		27,7984	27,7984
Kebutuhan putaran turbin	RPM	14,029	16,163
<b>Dimensi Turbin Desain</b>			
Diameter (D)	m	7,388	7,388
Tinggi (H)	m	10	10
Luas (A)	m <sup>2</sup>	73,8	73,8
Aspect ratio		1,346	1,346
Jumlah unit	unit	5	5
Overlap ratio		0,15	0,15
Dimensi Overlap	m	1,108	1,108
Kecepatan Angin operasi	m/s	4,339	5
<b>Hasil dari Turbin</b>			
Daya yang dihasilkan ( $P_{\text{gen}}$ )	watt	1153,211	1764,128
Torsi generated ( $T_{\text{gen}}$ )	Nm	766,929	1018,306
Torsi statis turbin ( $T_{\text{start}}$ )	Nm	407,322	407,322
Efisiensi total sistem ( $\eta_{\text{system}}$ )	%	19,73	19,73
<b>Parameter Output Gearbox</b>			

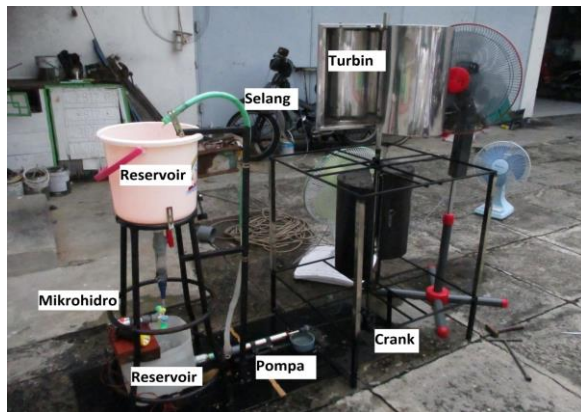
Daya keluaran ke pompa ( $P'_{pompa}$ )	watt	1153,211	1764,128
Torsi keluaran gearbox ( $T'_{pompa}$ )	Nm	27,588	36,577
<b>Kriteria Desain</b>			
Daya Kebutuhan pompa ( $P_{pump}$ )	watt	931,48	1060
Torsi start pompa ( $T_{start,pump}$ )	Nm	765,011	765,011
Torsi start pompa ( $T'_{start,pump}$ )	Nm	27,52	27,52
Torsi operasi pompa ( $T'_{average,pompa}$ )	Nm	8,76	8,76



**Gambar 8.** Detail komponen gearbox dan pompa

### Prototype

Perencanaan *prototype* bertujuan untuk mengesahkan perhitungan sistem sesungguhnya dengan menggunakan standar dan alur perhitungan yang sama. *Prototype* juga bertujuan untuk menguji feasibilitas sistem untuk dijalankan pada kondisi lapangan.



**Gambar 9.** Sistem *prototype*

Ditetapkan tinggi total pemompaan = 0,75 meter dan debit kebutuhan = 2 liter/menit

#### a. Sistem perpipaan

Panjang total pipa	1	m
Debit aliran (Q) total	0,0000333	m <sup>3</sup> /s
Diameter pipa	0,525	inch
Head Loss Mayor (pipa)	<b>0,00449</b>	m
Head Loss Minor (komponen)	0,0055	m
Total Head	1,0099	m
Pressure loss total	1,426	psi

Digunakan *crank mechanism* untuk mengubah putaran turbin angin secara angular menjadi gerakan bolak-balik sesuai dengan pergerakan pompa piston. Panjang langkah *crank* efektif adalah  $L = 3,5 \text{ cm} = 0,035 \text{ m}$ .

#### b. Sistem pemompaan

Digunakan pompa piston silinder berdiameter  $D_{in,pump} = 2,5 \text{ cm} = 0,025 \text{ m}$  dan panjang *stroke* maksimal ( $L_{max}$ ) = 20 cm = 0,2 m

Debit air pompa dibutuhkan ( $Q_{pump}$ )	0,000837	m <sup>3</sup> /s
<i>Stroke</i> pompa (S)	0,07	m
Diameter bore pompa ( $D_{in}$ )	0,025	m
Torsi maksimal start pompa ( $T_{s,pump}$ )	0,170	Nm
Torsi operasional pompa ( $T_{average,pump}$ )	0,0541	Nm
Daya pompa minimal ( $P_{min}$ )	0,562	Watt

#### c. Turbin Angin

Untuk mendapatkan dimensi turbin angin, perhitungan telah dilakukan dengan 3 (tiga) dasar perhitungan :

- Koefisien Daya ( $C_p$ ) optimal [13] = 0,321 dan  $TSR = 1,25$
- Daya minimal pompa ( $P_{min}$ ) = 0,562 watt
- Torsi start pompa ( $T_{start,pump}$ ) = 27,52 Nm

Berdasarkan pertimbangan kemampuan manufaktur dan bahan yang tersedia di pasaran, digunakan dimensi turbin yang memenuhi yaitu :

Kecepatan Angin Desain (V)	m/s	5
<b>Dimensi Turbin Desain</b>		
Diameter (D)	m	0.47
Tinggi (H)	m	0.76
Luas (A)	m <sup>2</sup>	0.3572
<i>Aspect ratio</i>		1.617
<i>Overlap Ratio</i>		0,15
Diameter <i>Overlap</i>	m	0,07



Debit pemompaan (Q)	m <sup>3</sup> /s	0.0000333
Volume piston pompa (v <sub>p</sub> )	m <sup>3</sup>	0.0000343
Putaran turbin angin	RPM	58,25
Tip Speed Ratio (λ)		0.286

Koefisien Daya (C <sub>p</sub> )		0.3
Koefisien Torsi (C <sub>t</sub> )		0.5
Koefisien Torsi Statis Turbin (C <sub>ts</sub> )		0.1
<b>Hasil dari Turbin</b>		
Daya yang dihasilkan (P <sub>gen</sub> )	watt	8.037
Torsi generated (T <sub>gen</sub> )	Nm	0.629
Torsi Statis Turbin (T <sub>s</sub> )	Nm	0.125
Torsi netto (T <sub>net</sub> )	Nm	0,441
Efisiensi total sistem	%	1,25
<b>Parameter Desain</b>		
Daya Kebutuhan pompa (P <sub>pump</sub> )	watt	0.674
Torsi start pompa (T <sub>start</sub> )	Nm	0.17
Torsi operasi pompa	Nm	0.054

Pengujian prototype dilakukan untuk mendapatkan data berikut :

- Debit air pemompaan (Q<sub>pump</sub>) (L/menit)
- Kecepatan putar turbin (RPM)
- Torsi generated (T<sub>gen</sub>)

Data hasil percobaan *prototype* ditampilkan sebagai berikut :

Kecepatan angin V (m/s)	4,21	5,12
Putaran (RPM)	38	59
Debit pompa (mL/min)	1200	1600
Gaya F(N)	0,1	0,2
Jari-jari turbin R (m)	0,235	0,235
Torsi dinamis T (Nm)	0,425	0,851

Dari tabel, debit air aktual (Q<sub>aktual</sub>) = 1,6 L/menit yang dipompa adalah sebanding dengan 80 % dari debit pompa rancangan Q<sub>pump</sub> = 2 liter/menit, sehingga sistem pompa dinilai telah bekerja sesuai dengan rancangan.

#### 4.Kesimpulan

Dari seluruh rangkaian perancangan sistem pemompaan untuk aplikasi mikrohidro, dapat disimpulkan hal-hal sebagai berikut :

- Sistem ini terbagi menjadi 2 (dua) subsistem, yakni sistem pemompaan bertenaga angin sebagai peng-konversi dan penyimpan energi angin menjadi energi potensial air di ketinggian

gedung, dan subsistem sistem mikrohidro untuk mengkonversi energi potensial menjadi energi listrik yang stabil untuk keperluan listrik gedung.

- Spesifikasi sistem mikrohidro hasil rancangan yang dapat memenuhi kebutuhan daya yang dihasilkan adalah :
  - Pompa : 5 unit Pompa *Axial Piston Quadduplex* tipe FMC E0413 dengan debit minimal 14,01 GPM (pada putaran 390 RPM) dan debit rata-rata 16,16 GPM (pada putaran 450 RPM)
  - Gearbox : 5 set sistem *gearbox*, masing-masing dengan 3 (tiga) unit *gearbox* jenis *speed increaser* merk Comer Industries dengan rasio transmisi total 1 : 27,8
  - Turbin angin : 5 unit sistem turbin angin *Vertical Axis* jenis *Savonius* dengan luas 73,8 m<sup>2</sup>, tinggi 10 m, diameter 7,388 m yang beroperasi selama 24 jam
  - Sistem mikrohidro : Sistem mikrohidro *pump-as-turbine* yang beroperasi selama 8 jam dengan diameter impeller 125 mm, *flow input* minimal 28 liter/detik, *output* daya nominal 6 kW dan efisiensi 78 %
  - Sistem perpipaan pemompaan : 5 unit pipa PVC diameter 0,75 inch sepanjang 63 meter
- Spesifikasi *prototype* sistem yang mampu memenuhi debit pemompaan yang ditetapkan adalah :
  - Sistem perpipaan pemompaan : 1 unit selang PVC diameter 0,625 inch sepanjang 1 meter
  - Pompa : 1 unit Pompa Piston (pompa angin sepeda) merk *Landstro*, diameter 0,025 m dengan langkah pompa 7 cm, debit pemompaan 0,0000343 m<sup>3</sup>/s
  - Turbin angin : 1 unit sistem turbin angin *Vertical Axis* jenis *Savonius* dengan luas 0,3572 m<sup>2</sup>, tinggi 0,76 m, diameter 0,47 m
  - Crank mechanism* : 1 unit *crank* dengan panjang langkah 0,035 m
  - Sistem mikrohidro : Turbin Pelton 10 blade, diameter 18 cm dengan generator 0,5 A dan lampu LED 1,5 V
- Sistem *prototype* dapat mengesahkan metode perancangan sistem sebenarnya dengan baik, karena *prototype* mampu memenuhi kebutuhan debit pemompaan, putaran dan torsi dinamis sesuai yang telah dirancang dengan metode perhitungan yang sama dengan sistem sebenarnya.
- Efisiensi energi teoritis sistem dan *prototype* adalah 19,73 % dan 1,25 %, sedangkan efisiensi aktual *prototype* adalah 0,94 %. Sistem dan *prototype* telah cukup efisien dalam mengkonversikan energi angin menjadi energi yang dibutuhkan untuk pemompaan

## 5. Daftar Pustaka

1. Perusahaan Listrik Negara, 2011, Data Penggunaan Listrik Nasional, 15 Januari 2014, <http://www.pln.go.id/>.
2. Herytoh, "Pembangkitan Listrik Tenaga Air Dengan Kincir Angin Sebagai Sarana Pembantu", Unpublished Undergraduate Thesis, Surabaya, Universitas Kristen Petra, 1995
3. Ehsan, M.M. et al, "A Novel Approach of Electrification of the High Rise Buildings at Dhaka City during Load Shedding Hours", India, 2012
4. Heng, Simon Sanghareth, "The Design of a 5 kW Microhydro Generating Set", Department of Mechanical Engineering, University of Catenbury, 1992.
5. Fraenkel, Peter, Water Pumping Devices, London, Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 1986
6. Pioge, Pierre, "Bernoulli's Theorem and the Hazen-Williams Equations: Rapid Determination of Diameter Using the Hazen-Williams Equation", United Kingdom, Practical Action, 2007
7. Warring, R.H, Pumps: Selection, Systems and Applications 2<sup>nd</sup> Edition, East Molesey, Trade and Technical Press Ltd, 1984
8. De Jongh, J.A, R.P.P Rijs, Pump Design, Arrakis Publication, 2004.
9. Kadam, A.A., S.S. Patil, A Review Study on Savonius Wind Rotors for Accessing the Power Performance, India, IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering, 2012.
10. Ali, Mohammed Hadi, Experimental Comparison Study for Savonius Wind Turbine of Two & Three Blades at Low Wind Speed. University of Mustansiriya, International Journal of Modern Engineering Research Vol.3 Issue 5, 2013
11. Widodo et al. Design and Analysis of 5 KW Savonius Rotor Blade, Malaysia: Global Engineers and Technologists Review (2012)
12. Sholihah, Fifi Hesty dan Ir.Joke Pratilastiarso. Rancang Bangun Prototipe Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH). Surabaya: Teknik Elektro Industri PENS-ITS, 2010
13. Akwa, Joao Vincente, Gilmar Alves da Silva Junior and Adriane Prisco Petry. Verification of the Overlap Ratio Influence on Power and Moment Coefficients of a Savonius Wind Rotor Using Computational Fluid Dynamics, Brazil: 2<sup>nd</sup> International Congress of Mechanical Engineering, 2011
14. Teuteberg, B.H. Design of a Pump-As-Turbine Microhydro System for an Abalone Farm. Department of Mechanical Engineering, Stellenbosch University, 2010
15. Molla, Saiful and R.Nolan Clark. Analysis of Two Mechanical Wind Pumping Systems. Texas: USDA Agricultural Research Services, 1987
16. Jonathan, Peter. Perancangan Turbin Angin Horizontal Axis Untuk Gedung Hemat Energi. Undergraduate Thesis. Surabaya: Universitas Kristen Petra, 2013
17. Fox, Robert W and Alan T McDonald; Introduction To Fluid Mechanics. New York : John Wiley and Sons, 1985
18. Universitas Kristen Petra, 2012, Green Building UK Petra Gedung P1 dan P2 , 12 Januari 2014, <http://penakita.com/>
19. Comer Industries, 2013, A-3A Speed Increaser Gearbox Technical Data, 12 November 2014, <http://www.comerindustries.com/>
20. Comer Industries, 2013, A-4A/B Speed Increaser Gearbox Technical Data, 12 November 2014, <http://comerindustries.com/>
21. FMC Technologies, 2012, FMC Piston Pump Model E04 Catalogue, 12 November 2014, <http://fmc pumps.com/>
22. Badan Meteorologi dan Geofisika Tanjung Perak Surabaya, Data Kecepatan Angin Di Surabaya, 17 Februari 2012