

# Studi Eksperimen Perbandingan Pengaruh Variasi Tekanan *Inlet* Turbin dan Variasi Pembebanan Terhadap Karakteristik Turbin Pada *Organic Rankine Cycle*

Dwi Dharma Risqiawan dan Ary Bachtiar Khrisna Putra  
Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh November (ITS)  
Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111  
*e-mail*: arybach@me.its.ac.id

**Abstrak** -Sistem pembangkit listrik telah berinovasi pada saat ini untuk tetap memenuhi kebutuhan akan ketersediaan listrik salah satunya dengan *Organic Rankine Cycle (ORC)*. Sistem ini terdiri dari empat komponen utama yaitu evaporator, turbin, kondensor, dan pompa. Fluida kerja dipompa ke evaporator untuk membangkitkan uap lalu digunakan menggerakkan turbin. Uap hasil ekspansi turbin dikondensasi dan dialirkan oleh pompa kembali ke evaporator. Sistem ini mampu memanfaatkan sumber energi yang memiliki temperatur dan tekanan rendah untuk membangkitkan uap fluida organik. Penelitian ini dilakukan untuk mengevaluasi kinerja turbin pada sistem ORC dengan memvariasikan tekanan masuk turbin dan pembebanan dengan menggunakan *R-123* sebagai fluida kerja. Pengambilan data dilakukan dengan memvariasikan tekanan masuk turbin pada setiap variasi pembebanan generator. Pengamatan dilakukan hanya pada turbin untuk mengetahui karakteristik turbin yang digunakan saat ini. Pengambilan data dilakukan dengan *R-123* sebagai fluida kerja. Dari eksperimen didapatkan temperatur masuk dan keluar turbin, kecepatan putaran turbin dalam rpm, dan enthalpy dapat diketahui. Enthalpy digunakan untuk menghitung kerja yang dihasilkan turbin, efisiensi turbin dan efisiensi sudu turbin. Pada tekanan masuk turbin 8 bar dan beban 1000 Watt data dengan nilai terbaik didapatkan. Hasil perhitungan data didapatkan kerja yang dihasilkan turbin yang terbesar adalah 5,4 KW. Hasil lain yang dapat diketahui adalah efisiensi turbin tertinggi 88%. Efisiensi sudu turbin tertinggi yang terhitung adalah 42,9%.

**Kata Kunci**—*R123*, kerja turbin, efisiensi turbin, efisiensi sudu turbin variasi tekanan, variasi pembebanan.

## I. PENDAHULUAN

INDONESIA adalah negara yang kaya dengan sumber daya energi. Sumber daya energi yang banyak digunakan selama ini adalah sumber daya fosil. Data dari Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral menunjukkan bahwa cadangan sumber daya fosil Indonesia semakin berkurang sehingga kebijakan diversifikasi energi dilakukan untuk mengurangi ketergantungan dari sumber daya fosil.

Diversifikasi energi dibutuhkan untuk mengatasi krisis energi. Salah satu bentuk dari diversifikasi energi adalah memanfaatkan panas bumi untuk menghasilkan listrik. Dengan letak geografis Indonesia terletak di daerah lingkaran api (*ring of fire*) menjadikan negara Indonesia kaya akan sumber energi panas bumi. Namun dalam proses pelaksanaan eksplorasi panas bumi yang ada tidak seluruhnya panas bumi tersebut mampu dimanfaatkan untuk menghasilkan listrik. Hal ini disebabkan oleh tekanan maupun temperatur yang dikeluarkan relatif rendah (3 bar

dan  $< 120^{\circ}$  C) dimana pada akhirnya uap tersebut dibuang begitu saja tanpa ada pemanfaatan. yang memiliki temperatur dan tekanan rendah untuk membangkitkan uap fluida.

*Organic Rankine Cycle (ORC)* adalah salah satu inovasi teknologi untuk memanfaatkan sumber energi panas bumidimana mampu bekerja pada temperatur dan tekanan yang relatif rendah. ORC sendiri merupakan modifikasi dari siklus pendahulunya yaitu siklus Rankine namun disini fluida kerja yang digunakan adalah fluida organik contohnya refrigerant untuk menghasilkan listrik. Sama halnya dengan siklus Rankine komponen utama dari ORC adalah turbin, kondensor, pompa, dan evaporator sebagai pengganti boiler.

Salah satu alat konversi energi adalah turbin uap yang merubah energi potensial yang dimiliki oleh uap menjadi energi mekanik pada poros turbin. Sebelum dirubah menjadi energi mekanik terlebih dahulu energi potensial uap tersebut dirubah menjadi energi kinetik dalam nozel maupun sudu – sudu gerak yang ada. Sehingga energi kinetik yang telah dirubah menjadi energi mekanik tersebut mampu memutar poros turbin, selanjutnya poros turbin tersebut dihubungkan dengan generator dengan beberapa elemen mesin sehingga mampu menghasilkan energi listrik.

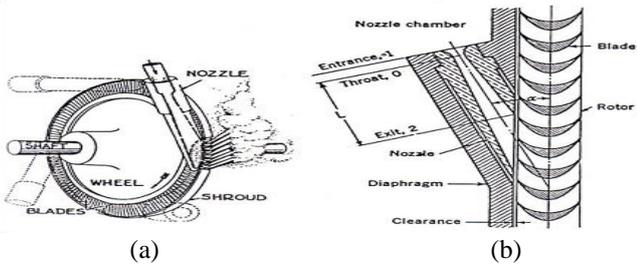
Untuk mengetahui kinerja yang digunakan perlu dilakukan pengujian terhadap turbin tersebut. Karakteristik turbin yang diuji akan berguna dalam peningkatan kinerja turbin tersebut.

## II. URAIAN PENELITIAN

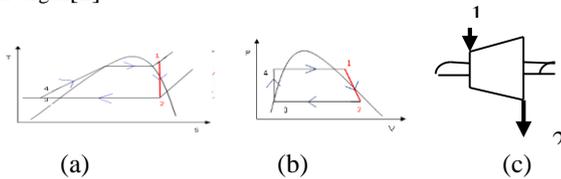
### A. Turbin Uap

*Organic* Turbin uap adalah pesawat dengan aliran tetap (*steady-flow*) machine, dimana uap melalui nozel diekspansikan kesudu-sudu turbin dengan penurunan tekanan yang drastis sehingga terjadi perubahan energi kinetik pada uap energi kinetik uap keluar nozel diberikan pada sudu-sudu turbin.[1]

Proses konversi energi pada turbin berasal dari entalpi uap masuk seperti pada titik no.1 seperti pada Gambar 2. (a) diatas. Perubahan entalpi ditunjukkan lewat garis berwarna merah. Titik bernomor satu menunjukkan entalpi yang masuk menuju turbin, nilai entalpi ini relatif tinggi hal ini disebabkan peningkatan temperatur yang terjadi sebelumnya pada evaporator akan meningkatkan nilai entalpi. Entalpi masuk memiliki properties yang berguna bagi turbin yaitu tekanan yang tinggi.



Gambar1.(a) Diagramatika turbin impuls(b) nosel uap konvergen-divergen[2]



Gambar2.(a) input dan output turbin (b)Garis perubahan T-s Turbin (c) Garis perubahan P-v Turbin[3]

Sebagaimana terlihat pada Gambar2.(b) garis merah menunjukkan perubahan tekanan pada turbin mulai awal masuk no.1 sampai tekanan keluar no.2.Tekanan pada akhirnya akan menurun seiring keluar turbin sebab, tekanan tersebut digunakan untuk menggerakkan sudu-sudu turbin. Akibat menurunnya properties yang dimiliki di sepanjang perjalanan turbin, maka nilai entalpi pada saat keluar turbin juga menurun seperti pada Gambar2.(a).[3]

**B. Segitiga Kecepatan Uap Melalui Sudu Turbin Impuls**

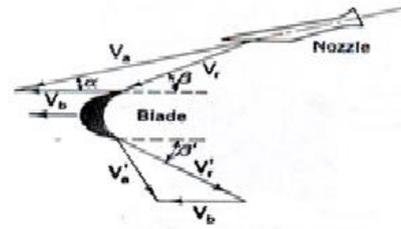
Pertama kali uap diekspansikan keluar nosel dimana nantinya dihasilkan kecepatan uap ( $V_a$ ) yang akan memasuki sudu gerak pada turbin. Setelah uap memasuki sudu gerak pada turbin dan ikut berputar sehingga memiliki kecepatan ( $V_b$ ) .Agar aliran uap yang keluar dari nosel mempunyai efisiensi dan bebas dari tumbukan maka harus memiliki perbandingan ( $V_a$ ) dan( $V_b$ )yang tertentu, dengan demikian bisa didapat sudut masuk dan sudut keluar uap dengan tepat. Hal ini dapat dilihat pada gambar segitiga kecepatan uap yang mealui sudu turbin impuls, Gambar3.[2]

Dimana :

- $V_a$  dan  $V_a'$ : kecepatan absolut uap masuk dan keluar sudu
- $V_r$  dan  $V_r'$ : kecepatan relatif uap masuk dan keluar sudu
- $V_b$ : kecepatan keliling sudu gerak
- $\alpha_1$  dan  $\alpha_2$  : sudut absolut uap masuk dan keluar sudu
- $\beta_1$  dan  $\beta_2$  : sudut relatif uap masuk dan keluar sudu

Sudu sudu  $\alpha_1$  dan  $\beta_1$  harus dibuat sedemikian rupa sesuai dengan kecepatan uap. Sudut  $\alpha_1$  bebas dipilih namun untuk mendapat efisiensi yang besarsudut ini harus dibuat antara  $10^\circ - 30^\circ$  namun yang biasa digunakan adalah  $12^\circ - 20^\circ$ . Sudut  $\alpha$  yang besar dapat digunakan ketika dibutuhkan, biasanya penggunaannya pada turbin yang besar dengan tekanan rendah pada akhir tingkat turbin tersebut.[2]

Kondisi yang diinginkan pada penentuan segitiga kecepatan adalah besarnya  $V_a'$  sekecil mungkin , dan jika kondisi memungkinkan arah  $V_a'$  dapat tegak lurus dengan u. Hal ini berakibat pada energi pada sudu pengarah yang bisa dipindahkan untuk diubah ke energi mekanik menjadi lebih besar. Sedangkan energi sisanya bisa dialirkan ke dalam sudu pengarah tingkat selanjutnya dengan lancar tanpa tumbukan.[1]



Gambar 3.Segitiga kecepatan turbin impuls[2]

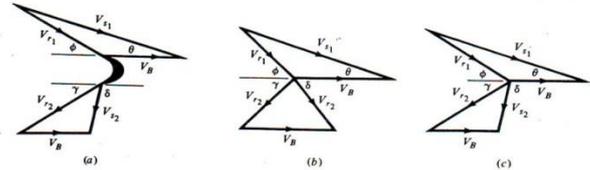


Figure 5-5 Velocity diagrams on a single-stage impulse blade.

Gambar4. Diagram kecepatan pada sudu impuls satu tingkat [4]

**C. Perhitungan Efisiensi Sudu Turbin**

Untuk mengevaluasi kinerja sudu yang bergerak maka dibutuhkan vector diagram kecepatannya yang ditunjukkan pada gambar 4.

dimana

- $V_{s1}$  = kecepatan absolut uap keluar nozzle
- $V_b$  = kecepatan keliling sudu
- $V_{r1}$  = kecepatan relatif dari uap yang diamati pada sudu
- $V_{r2}$  = kecepatan relatif uap meninggalkan sudu
- $V_{s2}$  = kecepatan absolut keluar uap sudu
- $\theta$  = sudut nozzle
- $\phi$  = sudut masuk sudu
- $\gamma$  = sudut keluar sudu
- $\delta$  = sudut keluar uap
- $g$  = percepatan gravitasi dalam  $m^2/s$

Prinsip kerja turbin impuls didapatkan dari momentum impuls sesuai dengan hukum momentum maka didapatkan[4]

$$F = \frac{m}{g} (V_{s1} \cos \theta - V_{s2} \cos \delta) \tag{1}$$

Kerja per satuan waktu (power) sama dengan gaya yang dihasilkan serta arak yang ditempuh sudu dalam satuan waktu atau hasil kecepatan dan gaya.[4]

$$\dot{W} = \frac{mV_b}{g} (V_{s1} \cos \theta - V_{s2} \cos \delta) \tag{2}$$

Kerja dihasilkan semakin besar jika  $\delta$  juga besar pada Gambar.4  $\cos \delta$  akan positif jika kurang dari  $90^\circ$  dan jika  $\delta$  lebih dari  $90^\circ$  maka  $\cos \delta$  akan bernilai negatif.[4]

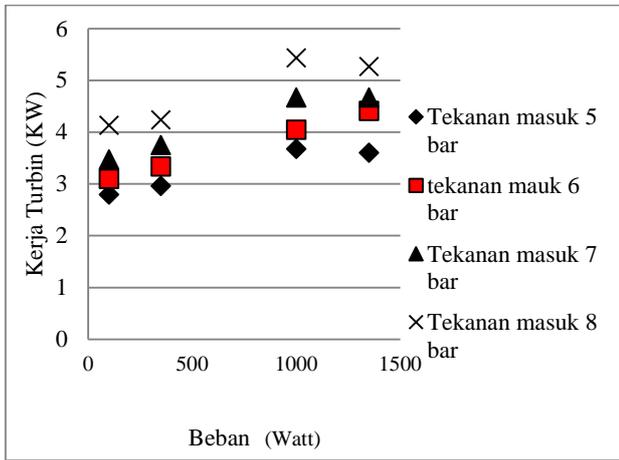
Effisiensi sudu didefinisikan sebagai rasio kerja dari sudu, persamaannya sebagai berikut:[4]

$$\eta_{sd} = 2 \left[ \left( \frac{V_b}{V_{s1}} \right) \cos \theta - \left( \frac{V_b}{V_{s1}} \right) \left( \frac{V_{s2}}{V_{s1}} \right) \cos \delta \right] \tag{3}$$

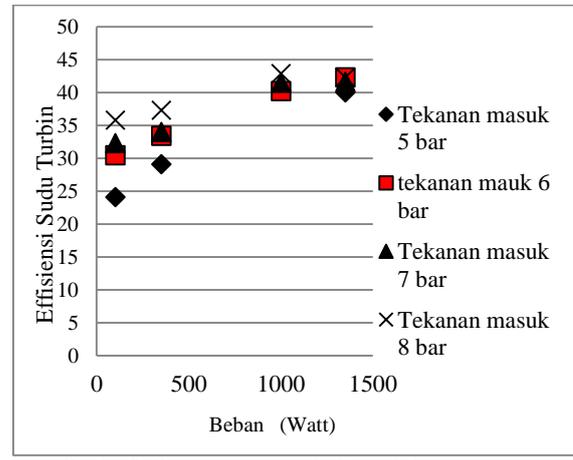
Rumus diatas dapat didekati dengan memperhitungkan koefisien gesek sudu atau  $K_b$  yang berkisar antara 0,05-0,95 dengan semakin kecil nilainya maka semakin kasar pula permukaan dari sudu.  $V_b/V_{s1}$  dianggap sebagai rasio percepatan( $\rho$ ) sehingga rumus pendekatan dengan hanya diketahui sudut  $\theta$  (sudut  $\alpha$  pada diagram kecepatan Gambar.4) adalah sebagai berikut:[4]

$$\eta_{sd} = 2 \cdot \rho^2 \left( \frac{\cos \alpha}{\rho} - 1 \right) (1 + K_b) \times 100\% \tag{4}$$

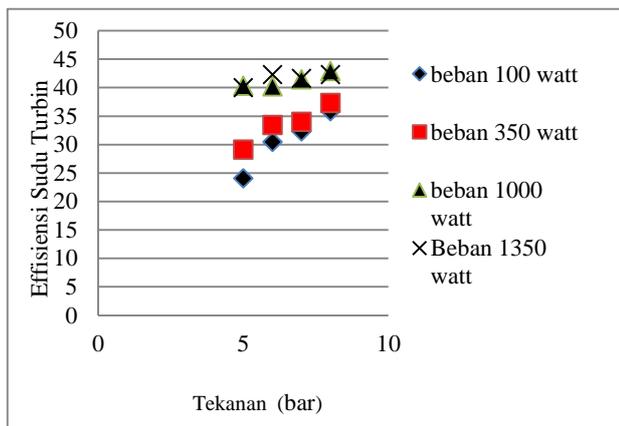




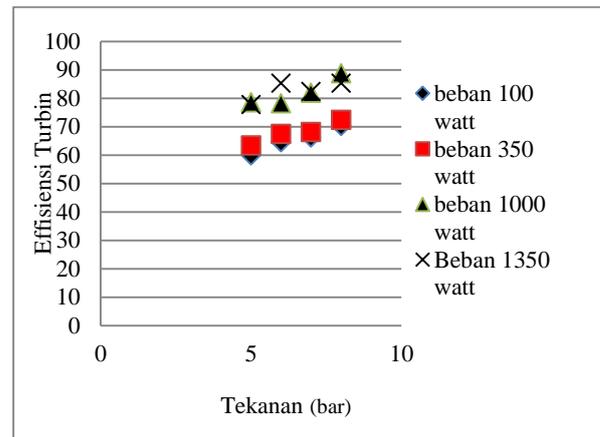
Gambar 7. Grafik kerja turbin fungsi beban generator



Gambar 9. Grafik efisiensi sudu fungsi beban generator



Gambar 8. Grafik efisiensi sudu turbin fungsi tekanan masuk



Gambar 10. Grafik efisiensi turbin fungsi tekanan masuk

C. Efisiensi Sudu Turbin Fungsi Tekanan Masuk Turbin

Grafik hasil eksperimen pada Gambar 8 menunjukkan hubungan antara variasi tekanan masuk turbin. Tren grafik dengan beban 100 Watt dan 350 Watt dari tekanan 5 bar ke 6 bar mengalami kenaikan efisiensi sudu turbin yang signifikan dari 24 % ke 30 %. Tren grafik cenderung meningkat secara landai pada setiap kenaikan tekanan hingga tekanan 8 bar dan beban generator 1000 Watt yang mencapai nilai efisiensi sudu maksimum yang dapat dicapai sistem ORC yang digunakan yaitu sebesar 42,9% (Lihat Gambar 8).

D. Efisiensi Sudu Turbin Fungsi Beban Generator

Grafik hasil eksperimen pada Gambar 9 menunjukkan tren grafik pada beban 100 Watt hingga 1000 Watt mengalami kenaikan. Kenaikan paling signifikan terjadi pada beban 350 Watt yang dinaikkan menjadi beban 1000 Watt. Efisiensi maksimum sudu maksimum terjadi pada beban 1000 Watt dengan tekanan masuk turbin 8 bar dengan nilai 42,9%. Grafik cenderung turun pada beban 1350 Watt kecuali pada tekanan 6 bar nilai efisiensi sudu turbin tetap mengalami kenaikan pada setiap kenaikan pembebanan generator dari 100 Watt hingga 1350 Watt.

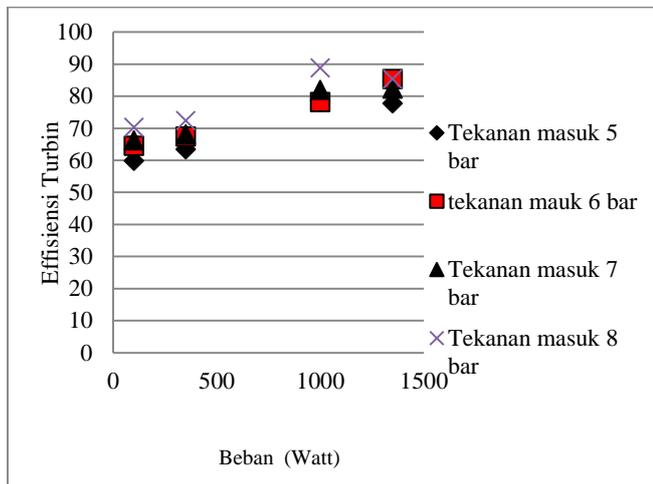
Peningkatan beban turbin setelah titik kritis akan mengakibatkan kecepatan sudu turbin kecepatan poros turbin menjadi lebih kecil sehingga mempengaruhi kecepatan poros turbin yang juga menjadi kecil. Sehingga rasio kecepatan menjadi lebih kecil dan efisiensi sudu turbin makin kecil.

E. Efisiensi Turbin Fungsi Tekanan Masuk Turbin

Grafik hasil eksperimen pada Gambar 10 menunjukkan tren kenaikan grafik tekanan masuk turbin memicu kenaikan efisiensi turbin. Pada setiap kenaikan tekanan 5 sampai 8 bar dengan beban 100 Watt dan 350 Watt efisiensi turbin naik secara landai dengan nilai paling besar adalah 71%. Pada beban 1000 Watt grafik naik secara signifikan dari tekanan 7 bar ke tekanan 8 bar. Nilai maksimum efisiensi turbin terjadi pada tekanan 8 bar dengan beban 1000 Watt. Pada beban 1350 Watt tren grafik naik dari tekanan 5 sampai 6 bar kemudian nilai efisiensinya turun pada tekanan 7 bar dan naik lagi pada tekanan 8 bar tetapi efisiensinya tidak lebih besar dari beban 1000 Watt. Keadaan ini dikarenakan beban yang semakin berat membuat putaran poros turbin juga semakin pelan akibat kerugian mekanik yang semakin besar. Kerugian pada turbin uap di laboratorium pendingin ini dapat terjadi karena kerugian pada katup regulator, kerugian pada nosel, kerugian akibat gesekan sudu yang memiliki bahan kasar, kerugian *disc friction*, kerugian akibat *residual velocity*. Tekanan masuk 8 bar pada beban 1000 Watt juga telah mendekati titik kritis dari sistem ini sehingga tidak ada peningkatan efisiensi turbin lagi pada tekanan 8 bar dengan beban 1350 Watt.

F. Efisiensi Turbin Fungsi Beban Generator

Tren grafik hasil eksperimen hubungan antara variasi beban generator terhadap efisiensi turbin mengalami kenaikan pada beban 100 Watt hingga 1000 Watt yang diikuti kenaikan tekanan yang berkisar antara 5 bar hingga 8 bar.



Gambar 11. Efisiensi turbin fungsi beban generator

Akan tetapi pada beban 1350 Watt dengan tekanan 8 bar tren grafik mengalami penurunan. Nilai efisiensi tertinggi terjadi pada beban 1000 Watt dengan tekanan 8 bar yaitu sebesar 88%. Kerugian mekanika turbin pada bantalan poros turbin yang berputar kurang lancar, kerugian pada nosel, kerugian akibat *blade friction*, kerugian *disc friction* pada beban 1350 Watt yang semakin besar membuat putaran turbin semakin seret dan pelan sehingga efisiensi turbin menurun.

#### IV. KESIMPULAN

Dari percobaan eksperimen yang dilakukan serta pembahasan terhadap data yang didapatkan, maka didapatkan hasil data karakteristik kerja turbin dan data hasil performansi turbin dengan adanya pengaruh variasi tekanan masuk turbin dan juga pembebanan pada generator. Perubahan tekanan masuk turbin dan perubahan beban pada generator mempengaruhi kerja turbin dalam siklus Rankine organik yaitu sebagai berikut :

1. Pembebanan 1000 Watt dan pada tekanan 8 bar menghasilkan daya aktual terbesar yaitu 5,43 KW. Semakin tinggi tekanan mengakibatkan suhu dan enthalpy semakin meningkat.
2. Semakin tinggi tekanan masuk turbin dengan beban tetap maka efisiensi sudu turbin akan semakin baik. Efisiensi sudu terbaik adalah 42,9% pada beban 1000 Watt dan tekanan masuk turbin 8 bar. Hal ini dikarenakan rasio kecepatan sudu dan kecepatan keluar nosel aktual semakin kecil.
3. Semakin tinggi pembebanan pada generator pada tekanan yang sama maka efisiensi sudu turbin akan semakin baik. Pembebanan 1000 Watt pada tekanan masuk turbin 8 Watt menghasilkan efisiensi tertinggi 42,9%.
4. Efisiensi turbin terbaik didapat pada beban 1000 Watt dengan tekanan masuk Turbin 8 bar nilai efisiensinya adalah 88,8 %. Semakin tinggi tekanan masuk turbin dengan beban tetap maka efisiensi turbin akan semakin baik.
5. Performa turbin terbaik terjadi pada tekanan 8 bar dan pembebanan pada 1000 Watt dimana tekanan yang besar membuat efisiensi sudu turbin terbaik, kerja aktual yang.

#### UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Bapak Ary

Bachtiar, ST, MT, Ph.D, selaku dosen pembimbing tugas akhir, yang telah membimbing dalam mata kuliah tugas akhir.

#### V. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Pudjanarsa, Astu, Djati N., *Mesin Konversi Energi*, Penerbit Andi, Indonesia, 2008.
- [2] Severns, William H, M.S, *Steam, Air, and Gas Power*, John Wiley and Sons, INC., New York, 1954.
- [3] Wardhana, Gagah, 2011, *Studi Numerik Dua Dimensi Pada Sudu Gerak Turbin Uap Organic Rankine Cycle (ORC) Dengan Variasi Sudut Nosel ( $\alpha=20^\circ, \alpha=22^\circ$ )*, Jurusan Teknik Mesin-FTI ITS, Surabaya, Indonesia.
- [4] Elwakil, M. Mohamed, *Power Plant Technology*, The McGraw – Hill book company, Singapore, 1984.