

Perancangan *Steam Turbine* Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi di Kamojang Unit VI

**DIMAS A HALIM^{1,*}, ANWAR NURHARYANTO², UNGGUL S JATI³,
DIDIK D SUSILO⁴, AUGUSTINUS SUJONO⁵**

^{1,2}Akademi Teknik Wacana Manunggal Semarang
Jl. Karang Balong Raya No. 88, Kab. Semarang 50775

³Politeknik Ma'arif

Jl. Sultan Agung No.9 Karangklesem, Purwokerto

^{4,5}Universitas Sebelas Maret

Jl. Ir Sutami No.36 A, Kota Surakarta, Jawa Tengah 57126

*Email: dimasardiansyah@atwm.ac.id

ABSTRAK

Panas Bumi merupakan sumber panas yang berasal dari lapisan magma di dalam tanah yang relatif tidak pernah berkurang, menjadikan panas bumi sebagai sumber energi yang terbarukan. Area sumur 6 lapangan panas bumi di Kamojang Jawa Barat memiliki 6 buah sumur produksi. Salah satu sumur produksi yang belum tereksplorasi yaitu Kamojang-68. Sumur ini memiliki nilai entalpi 2.778 kJ/kg dan tekanan sebesar 11,86 bar dengan kandungan gas non-terkondensasi sebesar 0,81% berat uap. Tujuan dari penelitian ini yaitu merancang steam turbine yang sesuai dengan kondisi sumur Kamojang-68 dengan daya output 3 MW. Metode yang dilakukan yaitu pengumpulan data sumur produksi, analisis heat and mass balance, perhitungan ukuran utama turbin. Hasil perancangan diperoleh bahwa uap panas bumi pada sumur produksi Kamojang-68 termasuk tipe uap kering sehingga model konversi energi yang sesuai yaitu direct steam. Daya output pembangkit sebesar 3,02 MW dengan tekanan 6-6,5 bar masuk ke dalam steam turbine. Steam turbine yang dirancang dalam tujuh tingkat dengan efisiensi dalam relatif turbin sebesar 0,687.

Kata kunci: *Panas bumi, steam, turbine*

ABSTRACT

Geothermal is a source of heat that comes from the layer of magma in the soil which is relatively never reduced, making geothermal energy is a renewable energy source. The well area of 6 Kamojang geothermal fields in West Java has 6 production wells. One of the unexplored production wells is Kamojang-68. This well has an enthalpy value of 2.778 kJ/kg and a pressure of 11.86 bar with a non-condensed gas content of 0.81% steam weight. The purpose of this study is to design a steam turbine that is in accordance with the conditions of the Kamojang-68 well with output power 3 MW. The method used for design steam turbine was production well data collection, heat and mass balance analysis, calculation of the main turbine size. The results of the design showed that geothermal steam in the Kamojang-68 production well includes dry steam type so that the appropriate energy conversion model is direct steam. The generator output power is 3.02 MW with a pressure of 6-6.5 bar entering the steam turbine. Steam turbine is designed in seven levels with efficiency in the relative turbine of 0.687.

Keywords: *Geothermal, steam, turbine.*

1. PENDAHULUAN

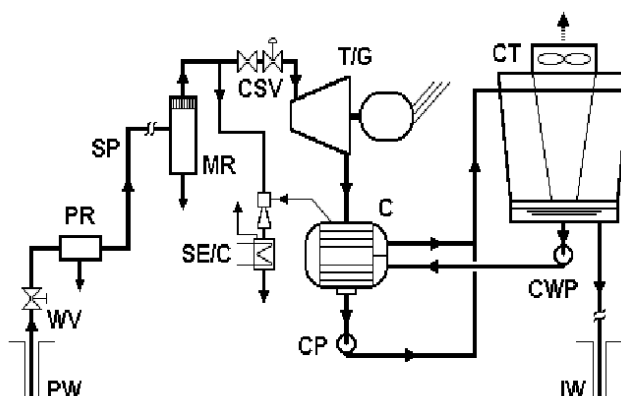
Panas bumi sebagai alternatif pembangkitan energi, kembali dilirik belakangan ini. Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) menjadi salah satu solusi karena untuk memperoleh energi listrik pembangkit ini menghasilkan kadar CO₂ yang relatif lebih sedikit dibanding pembangkit batu bara maupun gas alam sehingga ramah lingkungan (Green & Nix, 2006). Dengan sumber panas bumi yang berasal dari lapisan magma di dalam tanah yang relatif tidak pernah berkurang, menjadikan panas bumi sebagai sumber energi yang terbarukan (GEA, 2012).

Daerah panas bumi Kamojang terletak 40 Km di sebelah selatan Bandung, Jawa Barat. Daerah Kamojang memiliki ketinggian 1,730 meter dari permukaan air laut dengan koordinat 7°07'30"S 107°48'00"E / 7.125°LS 107.8°BT (Tim, 2011). Penyelidikan dan pengamatan geologi, geofisik serta geokimia telah menemukan daerah penghasil panas bumi seluas 14 km² di daerah Kamojang. Dari penyelidikan tersebut diperkirakan terdapat sumber panas bumi yang dapat menghasilkan 100-200 MW energi listrik selama 25 tahun. Uap yang dihasilkan di Kamojang ini memiliki tipe uap kering. Artinya kandungan air dalam uap relatif sedikit.

Sumber panas bumi di Kamojang termasuk tipe kering berupa uap panas bertemperatur 162°C dengan kandungan air yang sangat sedikit sekitar 0,0223%. Pada Dieng, diketahui bahwa terdapat kandungan silika yang cukup besar pada sumber panas bumi yang dapat berpengaruh pada penyumbatan pipa (Dieng, 2012). Pada Lembata, NTT ditemukan sumber panas bumi berupa mata air panas dengan temperatur 32–45°C, *fumarol* dengan temperatur 80–96 °C dan tanah panas dengan temperatur 96–98 °C (Purnanta, 2011).

Dengan adanya ciri-ciri yang berbeda, mengakibatkan kebutuhan PLTP di tiap daerah menjadi berbeda pula. Dalam penentuan metode pembangkitan energi listrik, perancangan *steam turbine* perlu disesuaikan dengan kondisi sumber panas bumi. Metode pembangkitan panas bumi dengan kondisi *vapor dominated* menggunakan metode *direct-steam plant* (DiPippo, 1999).

Direct-Steam plants (Gambar 1) digunakan pada reservoir yang menghasilkan panas bumi tipe kering (*dry steam*) atau panas bumi yang dalam kondisi *vapor dominated*. Fluida ini digunakan untuk menggerakkan turbin impuls atau reaksi. *Direct-steam plants* menggunakan fluida panas bumi secara langsung tanpa perlakuan sebelumnya sehingga dapat membangkitkan energi listrik dengan biaya yang rendah. (Morris & Robinson, 2015).



Gambar 1. *Direct-steam plants flow diagram* (DiPippo, 1999)

2. METODE PENELITIAN

2.1 Pengumpulan Data Sumur Produksi

Pengumpulan data sumur produksi dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui kondisi uap panas bumi yang dihasilkan pada sumur tersebut. Pengambilan data dilakukan dengan uji sampling kemudian melakukan analisis kimia kandungan yang ada dalam uap panas bumi tersebut. Langkah selanjutnya mengambil data mengenai laju aliran massa dari uap panas bumi untuk mengetahui seberapa banyak massa yang mengalir pada tiap satuan waktu. (Aziz & Ola, 2019).

2.2 Perhitungan Kerja Turbin

Daerah kerja *steam turbine* dalam diagram temperatur-entropi *direct-steam plants* yaitu pada titik 1,2,2s,3 dan g (Gambar 2). Kerja yang dihasilkan dari turbin per satuan massa uap alir yang melalui turbin dapat dicari dengan

$$\dot{w}_t = h_{1g} - h_2, \quad (2.1)$$

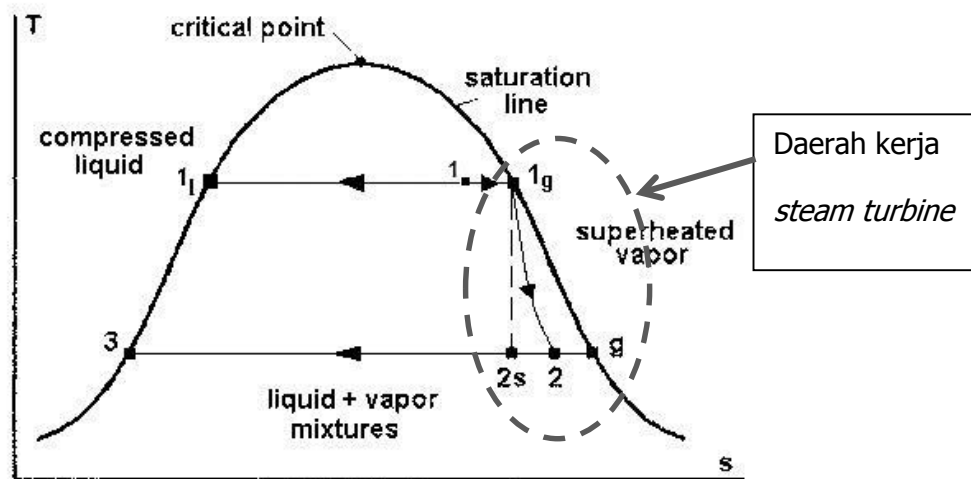
di mana,

\dot{w}_t = kerja turbin per satuan massa (kJ/kg)

h_{1g} = entalpi panas bumi masuk turbin (kj/kg)

h_2 = entalpi panas bumi keluar turbin (kj/kg)

Dalam kondisi ideal, kerja turbin maksimum yang dapat dihasilkan yaitu pada kondisi turbin dioperasikan secara adiabatik dan reversibel (Santoso, 2018). Di mana kondisi entropi konstan, Swandaru menyebutkan efisiensi isentropis turbin sebesar 0,85 (Swandaru, 2006).



Gambar 2. Diagram temperatur-entropi *direct-steam plants*

Efisiensi isentropis turbin, η_t , sebagai perbandingan kerja aktual dengan kerja dalam kondisi isentropik dirumuskan sebagai berikut:

$$\eta_t = \frac{\text{Kerja turbin aktual}}{\text{Kerja turbin isentropik}} = \frac{\dot{W}_a}{\dot{W}_s} \quad (2.2)$$

η_t = efisiensi isentropis turbin = 0,85 (Swandaru, 2006).

$$\eta_t = \left(\frac{h_{1g} - h_2}{h_{1g} - h_{2s}} \right) \quad (2.3)$$

Daya yang dihasilkan dari turbin:

$$\dot{W}_t = X_s \dot{m}_s w_t = \dot{m}_s (h_{1g} - h_2) = \dot{m}_s \eta_t (h_{1g} - h_{2s}) \quad (2.4)$$

Perhitungan daya pada persamaan (2.4) menunjukkan daya mekanis kotor yang mampu dihasilkan oleh turbin. Di mana daya listrik diperoleh dengan perkalian daya turbin dan efisiensi generator:

$$\dot{W}_e = \eta_g \dot{W}_t \quad (2.5)$$

dengan,

η_g = efisiensi generator = 0,75.

Turbin uap mengalami kehilangan energi pada saat pengoperasiannya yang dapat dikategorikan atas dua jenis yaitu kerugian internal dan kerugian eksternal (Shlyakhin, 2005). Kerugian internal merupakan kerugian yang berkaitan dengan kondisi-kondisi uap sewaktu mengalir melalui turbin. Diantara kerugian internal yaitu kerugian pada katup pengatur, pada nosel, pada sudu gerak, kerugian akibat kecepatan linear, gesekan cakram dan pengadukan. Kerugian eksternal yang perlu untuk diperhitungkan yaitu kerugian mekanis yang mana merupakan kerugian untuk mengatasi tahanan yang disebabkan oleh bantalan.

2.3 Perhitungan Ukuran Utama *Steam Turbine*

Perhitungan ukuran utama *steam turbine* dimulai dari perhitungan laju aliran massa yang masuk ke dalam turbin (G_0) yang diperoleh dari rumus (2.6).

$$G_0 = \frac{860N_e}{3600H_0\eta_{re}\eta_g}, \quad (2.6)$$

di mana,

N_e = daya yang diharapkan (Watt)

H_0 = penurunan kalor teoritis dari titik 1g menuju 2s pada Gambar 2 (kkal/kg),

dengan,

$$H_0 = i_o - i_{lt}. \quad (2.7)$$

Dengan menggunakan Gambar 3, efisiensi relatif efektif turbin (η_{re}) dapat diperoleh. Sedangkan efisiensi generator (η_g) diperoleh dari Gambar 4. Perhitungan daya yang dihasilkan terminal generator dihitung dengan menggunakan rumusan (2.8).

$$N_{e,g} = \frac{\eta_g}{\eta_m} \times N_e. \quad (2.8)$$

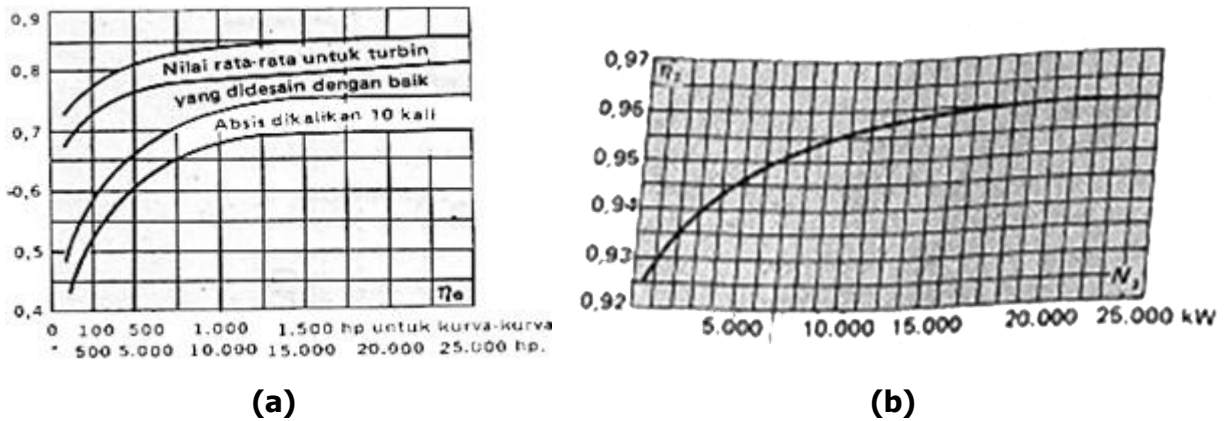
di mana,

$N_{e,g}$ = daya yang dihasilkan terminal generator (MW)

η_m = efisiensi relatif turbin

η_g = efisiensi generator

N_e = daya yang dihasilkan pada *steam turbine* (MW).



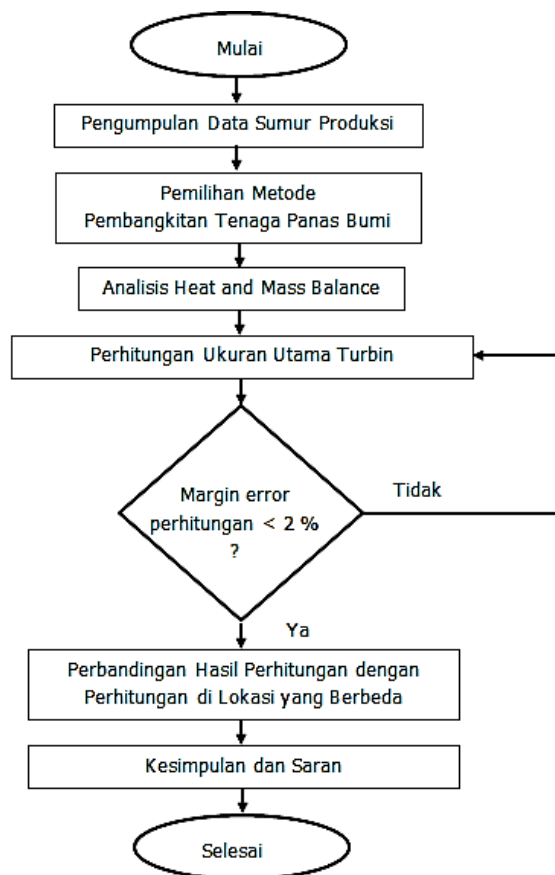
(a) Efisiensi relatif efektif turbin (η_{re}) dan **(b)** Efisiensi generator (η_g) (Shlyakhin, 2005).

Margin error dari perhitungan diketahui dengan rumusan (2.9). Perhitungan desain dapat dianggap valid apabila *margin error* kurang dari 2% (Shlyakhin, 2005).

$$\text{Margin error} = \frac{N_e - N_{e,g}}{N_{e,g}} \times 100\% \quad (2.9)$$

2.4 Diagram Alir Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan alur penelitian yang disajikan pada Gambar 4.



Gambar 4. Diagram Alir Penelitian

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengumpulan data sumur produksi diperoleh dari hasil tes dan analisis kimia oleh PGE pada tahun 2009 yang ditampilkan pada Tabel 1. Dengan temperatur $185,7^{\circ}\text{C}$, sumur Kamojang-68 termasuk dalam kategori temperatur sedang. Penentuan kategori temperatur sedang didasarkan pada klasifikasi *reservoir*. Sedangkan asumsi-asumsi yang digunakan dalam estimasi potensi energi panas bumi dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 1. Komposisi Hasil Analisis Kimia PLTP Unit VI Kamojang (PGE, 2009)

No.	Item	Satuan	Jumlah kandungan
1.	Tekanan pipa	bar a	11,86
2.	Temperatur	$^{\circ}\text{C}$	185,70

Tabel 2. Klasifikasi *Reservoir* dan Asumsi-Asumsi yang Digunakan dalam Estimasi Potensi Energi Panas Bumi (SNI, 1999)

Reservoir	Batas Temperatur ($^{\circ}\text{C}$)	Temp. Akhir/ <i>Cut off</i> ($^{\circ}\text{C}$)	Daya per satuan luas (MWe/km^2)*	Konservasi Energi (%)	Lain-lain**
Temperatur rendah	< 125	90	10	10	
Temperatur sedang	125 – 225	120	12.5	10	
Temperatur tinggi	225	180	15	15	

*) asumsi daya persatuan luas pada kelas sumber daya spekulatif

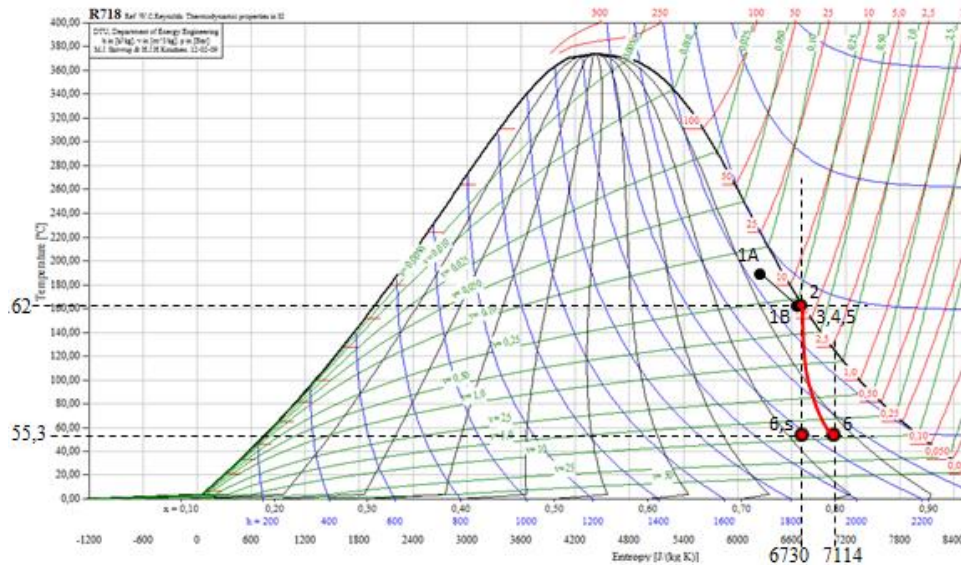
***) berlaku untuk estimasi sumber daya pada kelas hipotetis dan cadangan kelas terduga

Flow rate yang dihasilkan pada sumur Kamojang-68 memiliki komposisi seperti ditampilkan pada Tabel 3. Hasil analisis *flow rate* oleh PGE menunjukkan *flow rate steam* dan air sebesar $8,98 \text{ kg/s}$, di mana kandungan air hanya $0,02\%$. Hal ini membuktikan bahwa uap panas bumi pada sumur Kamojang-68 merupakan *vapor dominated* dengan $99,98\%$ bagiannya berupa *steam*.

Tabel 3. *Flow Rate* Hasil Analisis PLTP Unit VI Kamojang (PGE, 2009)

No.	<i>Flow Rate</i>	(%)	Ton/h	Kg/s
1.	<i>Steam</i> + air	98	32,340	8,98
2.	Gas (NCG)	2	0,660	0,18
	Steam + water + Gas	100	33,000	9,17
3.	Udara	0	-	-
4.	<i>Steam</i>	99,98	32,3328	8,978
5.	Air	0,02	0,0072	0,002
	<i>Steam</i> + air	100,00	32,3400	8,980

Sumur Produksi Kamojang-68 memiliki kondisi *vapour dominated*. Hal ini didasarkan pada Tabel 3 hasil analisis *flow rate* oleh PGE. Dengan kondisi *vapour dominated*, metode pembangkitan tenaga panas bumi yang dipilih adalah metode *direct-steam plants*. Metode *direct-steam plants* menyalurkan uap panas bumi secara langsung ke separator kemudian diteruskan pada *steam turbine*. Kondisi fluida pada proses turbin uap terjadi penurunan, sebagaimana ditampilkan pada Gambar 5. Dalam diagram temperatur-entropi fluida menunjukkan penurunan temperatur dan entalpi, di mana perbedaan entalpi menghasilkan energi pada *steam turbine*.



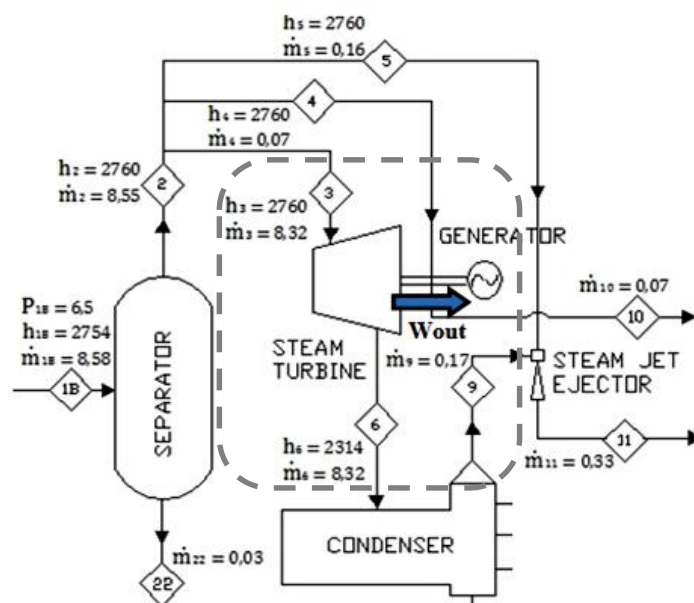
Gambar 5. Diagram temperatur-entropi fluida pada turbin uap

Tabel 4. Tabel Sifat Fluida pada Proses Turbin Uap

Parameter	Kondisi pada Titik		
	2	6,s	6
T, °C	162	55,3	55,3
P, bar	6,5	0,16	0,16
h, kj/kg	2760	2188,11	2313,84
s, kj/kg °C	6,73	6,73	7,114
X	1	0,826	0,879
\dot{m}_{steam}	8,38	-	7,14328
\dot{m}_{NCG}	0,17	-	0,17
\dot{m}_{water}	0	-	1,00672
\dot{m}_{total}	8,55	-	8,32

Dari analisis *heat and mass balance*, uap masukan pada *steam turbine* memiliki kondisi entalpi = 2760 kj/kg dengan tekanan 6,5 bar dan laju lairan massa 8,32 kg/s (Tabel 4). Di

mana didapatkan kondisi uap keluaran *steam turbine* dengan entalpi 2314 kJ/kg, tekanan 0,16 bar dan laju aliran massa 8,32 kg/s (Gambar 5). Pada gambar 6 menunjukkan *process flow diagram* pada daerah kerja *steam turbine* yang menggambarkan kondisi uap panas bumi sebelum dan setelah melewati *steam turbine*.



Gambar 6. Process Flow Diagram (PFD) Hasil Perhitungan Analisis Heat and Mass Balance

Efisiensi dalam relatif turbin yang diperoleh melalui perhitungan sebesar 0,687 dan daya yang dihasilkan pada terminal generator sebesar 3,21 MW. Berikut disajikan beberapa perhitungan.

- Efisiensi dalam relatif turbin:

$$\eta_{oi} = \frac{\sum h_i}{\sum h_{o'}} = \frac{97,43}{141,87} = 0,687$$

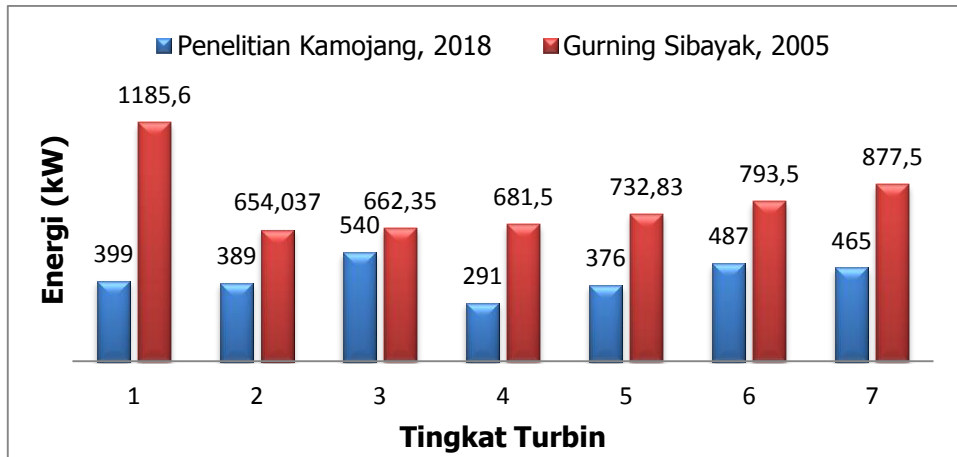
- Daya yang dihasilkan pada terminal generator:

$$N_{e,g} = \frac{\eta_g}{\eta_m} \times N_e = \frac{0,94}{0,98} \times 3,347 = 3,210 \text{ MW}$$

- Margin error perhitungan daya:

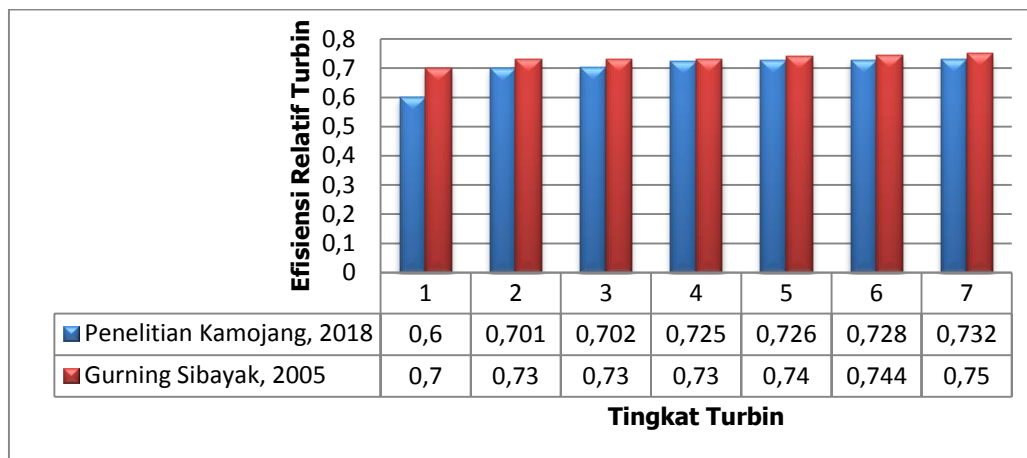
$$\text{Margin error} = \frac{N_e - N_{e,g}}{N_{e,g}} \times 100\% = \frac{3,250 - 3,210}{3,210} \times 100\% = 1,24\%$$

Karena *margin error* perhitungan kurang dari 2%, maka desain dapat diterima.



Gambar 7. Energi yang dibangkitkan tiap tingkat steam turbine

Penelitian sebelumnya telah dilakukan oleh Gurning (2010) dengan mendesain turbin pada PLTP Sibayak. Dimana PLTP Sibayak memiliki karakteristik *vapor dominated*, yang mirip dengan Kamojang. Gambar 7 menunjukkan perbandingan energi yang dihasilkan steam turbine pada tiap tingkatan dengan membandingkan dengan desain pada PLTP Sibayak (Gurning, 2010). Terjadi perbedaan besar energi yang dihasilkan dikarenakan laju aliran massa panas bumi di PLTP Sibayak lebih besar daripada sumur produksi Kamojang-68. Namun, tren energi yang dibangkitkan pada tiap tingkatan memiliki persamaan.



Gambar 8. Efisiensi relatif tiap tingkat steam turbine

Gambar 8 menampilkan efisiensi relatif turbin pada tiap tingkatan. Dimana hasil penelitian Kamojang dibandingkan dengan penelitian Gurning (2010) terdapat selisih yang kecil tetapi tren efisiensi meningkat pada tiap tingkatan steam turbine ditemukan pada kedua desain.

4. KESIMPULAN

Kesimpulan dari penelitian perancangan steam turbine pembangkit listrik tenaga panas bumi di Kamojang Unit VI diperoleh bahwa jenis uap panas bumi pada sumur Kamojang-68 merupakan *vapor dominated* sehingga metode pembangkitan yang dipilih yaitu metode *direct-steam plants*. Daya output pembangkit sebesar 3,02 MW dengan tekanan 6-6,5 bar

masuk ke dalam *steam turbine*. *Steam turbine* yang dirancang dalam tujuh tingkat dengan efisiensi dalam relatif turbin sebesar 0,687.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Balai Rekayasa Desain dan Sistem Teknologi Puspiptek Tangerang, yang telah memberikan kesempatan untuk melakukan penelitian dan untuk semua pihak yang telah membantu dalam kelancaran proses penelitian.

DAFTAR RUJUKAN

- Aziz, A., & Ola, K. K. (2019). Kajian Terbentuknya Scaling pada Komponen Turbin Uap Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi Skala Kecil. *Teknologi Lingkungan*, 29-33. <http://dx.doi.org/10.29122/jtl.v20i1.2832>.
- Dieng. (2012, Juni). *Suplai Listrik PLTP Dieng untuk Jawa-Madura-Bali Menurun*. Dipetik Agustus 10, 2012, dari pikiran rakyat: <http://www.pikiran-rakyat.com/node/170790>.
- DiPippo, R. (1999). *Geothermal power plants principles, applications and case studies*. Massachusetts. ISBN 978-008-0982-06-9.
- GEA. (2012). *Geothermal Basics Q&A Pre-Print Copy*. USA.
- Green, B., & Nix, R. (2006). *Geothermal - The Energy Under Our Feet*. Colorado: National Renewable Energy Laboratory.
- Gurning, W. M. (2010). *Perancangan turbin uap untuk PLTPB dengan Daya 5MW*. Medan: Universitas Sumatera Utara.
- Morris, C., & Robinson, A. (2015). Geothermal turbines - A maintainer's perspective. *Proceedings World Geothermal Congress*. Hal 1-10). Melbourne.
- PGE. (2009). *Komposisi flow rate hasil analisis kimia PLTP unit VI Kamojang*. Jakarta.
- Purnanta, C. (2011). *Studi Perencanaan PLTP 2x2,5 MW untuk Ketenagalistrikan di Lembata, NTT*. Surabaya: ITS.
- Santoso, H. (2018, Desember). Optimalisasi untuk menghasilkan efisiensi ideal turbin uap pembangkit listrik tenaga biomassa kapasitas 20 MW. *String*, vol.3 No.(2), 181-188.
- Shlyakhin, P. (2005). *Steam Turbines: Theory and Design*. University Press of the Pacific. ISBN : 978-1410223487
- SNI. (1999). *Klasifikasi Potensi Energi Panas Bumi di Indonesia*. Jakarta.

Swandaru, R. (2006). Thermodynamic Analysis of Preliminary Design of Power Plant Unit I Patuha, West Java, Indonesia. Iceland: geothermal training programme, The United Nations University.

Tim. (2011, Maret). *Kabupaten Garut*. Dipetik Agustus 10, 2012, dari www.garutkab.go.id