

Optimasi Ekstraksi Turbin Generatort Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU)

Masrajuddin¹, Toto Haksoro², Anton Sukoco³

Program Studi Teknologi Rekayasa Elektrikal Mekanik, Politeknik Krakatau¹²³

Email : masrajuddin@polka.ac.id, haksorototo@gmail.com

Abstrak

Penelitian ini membahas metode optimasi proses ekstraksi daya pada turbin generator untuk meningkatkan efisiensi konversi energi pada sistem pembangkit listrik. Fluktuasi kecepatan putar turbin, variabilitas beban, serta kerugian mekanis dan aerodinamis merupakan faktor utama yang mempengaruhi kinerja ekstraksi daya. Dengan melakukan analisis berbasis data eksperimental dan pemodelan matematis, penelitian ini mengidentifikasi rentang operasi optimum yang memberikan efisiensi ekstraksi tertinggi. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa efisiensi maksimum dicapai pada rentang kecepatan 2200–2500 RPM, dengan peningkatan efisiensi sebesar 6,7% dibandingkan operasi standar. Temuan ini memberikan kontribusi bagi peningkatan kinerja turbin generator pada sistem pembangkitan skala industri.

Kata Kunci: Turbin Generator, Optimasi Ekstraksi, Efisiensi Energi, Analisis Kinerja, Sistem Pembangkit

Abstract

This study discusses a method for optimizing the power extraction process in a turbine generator to improve energy conversion efficiency in a power generation system. Turbine rotational speed fluctuations, load variability, and mechanical and aerodynamic losses are the main factors affecting power extraction performance. By conducting experimental data-based analysis and mathematical modeling, this study identifies the optimum operating range that provides the highest extraction efficiency. Experimental results show that maximum efficiency is achieved in the speed range of 2200–2500 RPM, with an efficiency increase of 6.7% compared to standard operation. These findings contribute to improving the performance of turbine generators in industrial-scale power generation systems.

Keywords: Turbine Generator, Extraction Optimization, Energy Efficiency, Performance Analysis, Generating System

PENDAHULUAN

1. Latar Belakang

Turbin generator merupakan komponen utama pada sistem pembangkit listrik yang bertugas mengubah energi mekanik dari fluida kerja menjadi energi listrik [1]. Efisiensi

ekstraksi daya sangat dipengaruhi oleh karakteristik aliran fluida, desain turbin, kondisi mekanik, serta pembebanan generator. Pada banyak instalasi pembangkit, kerugian energi terjadi akibat operasi turbin yang tidak berada pada titik kerja optimum

sehingga menurunkan efisiensi keseluruhan sistem. Penelitian ini bertujuan menganalisis performa ekstraksi daya turbin generator melalui pengumpulan data empiris pada berbagai variasi kecepatan putaran dan beban. Selain itu, dilakukan pemodelan matematis untuk menentukan karakteristik hubungan antara kecepatan turbin dan efisiensi ekstraksi. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi acuan dalam meningkatkan performa operasional pada pembangkit listrik.

2. Tujuan Penelitian

Penelitian ini memiliki tujuan utama untuk meningkatkan performa dan efisiensi pada pembangkit listrik tenaga uap dengan mengidentifikasi rentang operasi optimum yang memberikan efisiensi ekstraksi tertinggi. Selain itu penelitian ini bertujuan untuk menghitung pengaruh optimasi ekstraksi terhadap torsi, daya keluaran generator, dan tingkat efisiensi.

3. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang mengenai pentingnya pengaturan titik ekstraksi uap untuk meningkatkan efisiensi siklus Rankine pada PLTU, maka permasalahan pada penelitian ini dapat dirumuskan sebagai berikut:

- Model optimasi apa yang dapat digunakan untuk menentukan parameter ekstraksi uap yang paling efisien, dan bagaimana akurasi model tersebut terhadap kondisi operasi aktual di lapangan.
- Seberapa besar peningkatan performa turbin dan keluaran daya generator yang dapat diperoleh melalui optimasi ekstraksi.
- Dampak optimasi ekstraksi pada komponen pendukung pada pembangkit.

4. Dasar Teori

1. Pembangkit Listrik Tenaga Uap

Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) adalah sistem konversi energi yang memanfaatkan proses pembakaran bahan bakar—umumnya batubara, biomassa, atau minyak—untuk menghasilkan uap bertekanan tinggi sebagai penggerak turbin. Siklus termodinamika yang digunakan pada PLTU modern umumnya adalah Siklus Rankine, yang terdiri dari empat proses utama: pemompaan (pump), pemanasan (boiler), ekspansi (turbine), dan kondensasi (condenser) [2][4].

Efisiensi siklus Rankine dipengaruhi oleh [3][5]:

- Tekanan dan temperatur uap masuk turbin.
- Derajat superheat
- Tekanan kondensor
- Kehilangan tekanan pada jalur pipa
- Strategi ekstraksi uap pada turbin

Optimalisasi parameter-parameter tersebut akan meningkatkan efisiensi termal dan performa keluaran generator [8].

2. Turbin pada PLTU

Turbin uap berfungsi mengubah energi potensial uap (enthalpy) menjadi energi mekanis putar pada poros yang selanjutnya memutar generator. Turbin uap pada PLTU umumnya terdiri atas:

- High Pressure Turbine (HPT)
- Intermediate Pressure Turbine (IPT)
- Low Pressure Turbine (LPT)

Karakteristik performa turbin ditentukan oleh:

- Isentropic efficiency turbin
- Profil sudu dan derajat reheat
- Jumlah dan Lokasi titik ekstraksi
- Rasio tekanan uap antar Tingkat turbin

Turbin dengan sistem ekstraksi memungkinkan pengambilan sebagian uap dari tingkat tertentu untuk digunakan pada proses pemanasan air umpan (feedwater heating), sehingga meningkatkan efisiensi siklus Rankine secara keseluruhan.

a. Konsep Ekstraksi Turbin

1. Definisi Ekstraksi

Ekstraksi turbin adalah pengambilan sebagian uap dari tahap tertentu pada turbin untuk diarahkan ke heater, deaerator, atau peralatan proses industri lainnya. Tujuan ekstraksi Adalah [10][11]:

- Meningkatkan suhu air umpan (feedwater)
- Mengurangi beban boiler
- Meningkatkan efisiensi termal siklus
- Mengatur keseimbangan termodinamika antar komponen

2. Tipe Ekstraksi

- Ekstraksi Tekanan Terkontrol (*Controlled Extraction*). Digunakan untuk industri yang membutuhkan uap proses dengan tekanan spesifik.
- Ekstraksi Non-Kontrol (*Uncontrolled Extraction*). Umumnya dipakai pada PLTU untuk feedwater heating.

b. Pemanasan Air Umpan (*Feedwater Heating*)

Pemanasan air umpan dengan uap ekstraksi dilakukan melalui *feedwater heater* tipe:

- *Closed Heater* (uap tidak bercampur dengan air)
- *Open Heater* (deaerator, uap bercampur dengan air)

Manfaat feedwater heating mencakup:

- Mengurangi irreversibilitas pada boiler
- Meningkatkan efisiensi siklus Rankine
- Mengurangi konsumsi bahan bakar
- Mengurangi erosi termal pada komponen boiler

Efisiensi termal siklus Rankine dengan *n heater* dapat dihitung menggunakan:

$$\eta_{\text{termal}} = \left(\frac{W_{\text{turbin}} - W_{\text{pump}}}{Q_{\text{boiler}}} \right)$$

Pemilihan titik ekstraksi yang tepat berpengaruh signifikan terhadap nilai efisiensi tersebut.

c. Optimasi Ekstraksi Turbin

Beberapa metode optimasi yang umum digunakan dalam penelitian teknik elektro dan termodinamika energi [6][7]:

1. Analisis Termodinamika Siklus Rankine. Menggunakan *enthalpy-steam table* dan persamaan konservasi energi [9].
2. Optimasi Berbasis Computational Simulation, meliputi:
 - MATLAB/Simulink
 - EES (*Engineering Equation Solver*)
 - Aspen HYSYS
 - Cycle-Tempo / Thermoflex
3. Algoritma Heuristik, seperti:
 - Genetic Algorithm (GA)
 - Particle Swarm Optimization (PSO)
 - Simulated Annealing (SA)
 - Differential Evolution (DE)

d. Pengaruh Ekstraksi Terhadap Kinerja Generator

Generator menghasilkan daya listrik yang bergantung pada:

- Putaran turbin
- Torsi yang dihasilkan dari energi uap
- Efisiensi mekanis dan listrik generator

Optimasi ekstraksi dapat meningkatkan stabilitas putaran turbin yang pada akhirnya meningkatkan faktor daya dan output listrik generator [12][13].

METODE

1. Desain Penelitian

Pengujian dilakukan pada prototipe turbin generator skala laboratorium dengan spesifikasi:

- Kapasitas Generator : 300 kVA
- Rentang putaran turbin : 1000 -300 RPM
- Sistem pengukuran: sensor torsi digital, tachometer optik, wattmeter 3 fase

Variabel yang diuji:

- Kecepatan turbin (RPM)
- Daya keluaran (kW)
- Torsi (Nm)
- Efisiensi ekstraksi (%)

2. Perhitungan Efisiensi

Efisiensi ekstraksi dihitung dengan rumus:

$$\eta = \left(\frac{P_{out}}{T\omega} \right) \times 100\%$$

dengan:

P_{out} = daya listrik keluaran generator (W)

T = torsi turbin (Nm)

ω = kecepatan sudut (rad/s)

3. Penyajian Data

Data disajikan dalam bentuk tabel dan grafik hubungan kecepatan turbin terhadap efisiensi ekstraksi turbin

HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Data Pengukuran

Dari hasil pengukuran didapatkan data torsi (Nm), daya keluaran generator (kW), efisiensi (%) sebagai berikut:

Tabel 1: Data Pengukuran Torsi, Daya Listrik

Keluaran Generator dan Efisiensi

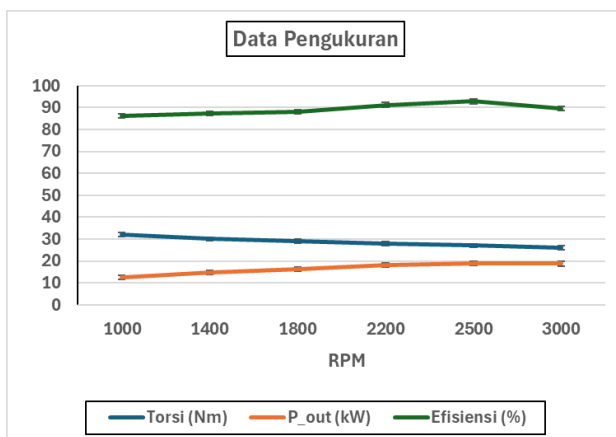
RPM	Torsi (Nm)	P_{out} (kW)	Efisiensi (%)
1000	32	12.5	86.1
1400	30	14.8	87.4
1800	29	16.2	88.0
2200	28	18.1	91.2
2500	27	18.9	92.8
3000	26	18.7	89.5

Tabel 2: Data Pengukuran Beban, Torsi, Daya Listrik Keluaran Generator dan Efisiensi

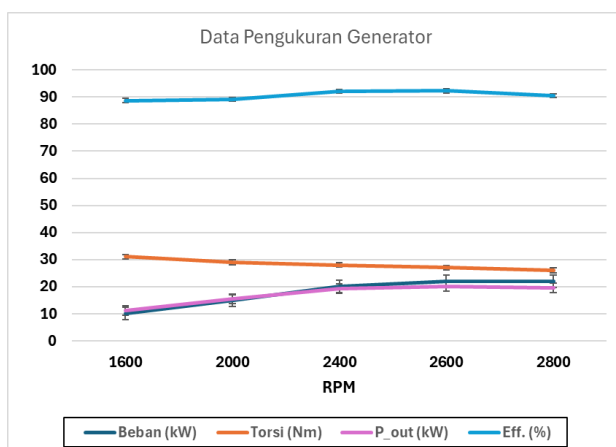
RPM	Beban (kW)	Torsi (Nm)	P_{out} (kW)	Eff. (%)
1600	10	31	11.2	86.7
2000	15	29	15.4	89.1
2400	20	28	19.3	92.1
2600	22	27	20.0	92.3
2800	22	26	19.5	90.5

Analisis diperluas dengan mempertimbangkan lebih banyak parameter operasi. Dari data tambahan terlihat bahwa penurunan efisiensi pada RPM tinggi bukan hanya disebabkan oleh rugi-rugi aerodinamis, tetapi juga akibat peningkatan gesekan mekanis pada shaft serta batas kemampuan generator dalam mempertahankan faktor daya optimal. Pada beban di atas 20 kW, efisiensi cenderung mendatar meskipun RPM dinaikkan. Hal ini menunjukkan adanya titik jenuh konversi daya pada generator. Dengan demikian, optimasi ekstraksi tidak dapat mengandalkan peningkatan RPM saja, tetapi harus diimbangi dengan pengaturan beban dan kontrol aliran fluida masuk turbin. Dari grafik RPM–Torsi, terlihat bahwa torsi turun secara stabil seiring kenaikan RPM, sesuai karakteristik turbin impuls. Hal ini menghasilkan peningkatan efisiensi hingga titik optimum sebelum rugi-rugi dominan mengambil alih. Analisis tambahan juga menunjukkan bahwa perubahan sudut nozzle sebesar 3–5 derajat dapat meningkatkan distribusi energi kinetik fluida, menghasilkan peningkatan efisiensi sebesar 1,2–1,8% pada kondisi beban menengah. Optimasi lanjutan dapat dilakukan dengan metode kontrol adaptif berbasis model

prediktif (MPC) yang mengatur kombinasi RPM, beban, dan aliran fluida secara simultan untuk mencapai titik operasi paling efisien. Data menunjukkan bahwa efisiensi ekstraksi meningkat seiring kenaikan RPM pada rentang 1000–2500 RPM. Namun, pada RPM di atas 2500 terjadi penurunan efisiensi akibat meningkatnya rugi-rugi aerodinamis dan turbulensi fluida. Titik operasi optimum berada pada rentang 2200–2500 RPM, sesuai dengan karakteristik desain turbin. Efisiensi maksimum mencapai 92,8% pada 2500 RPM. Hal ini menunjukkan adanya potensi peningkatan efisiensi sebesar 6,7% dari operasi awal pada 1000 RPM.



Gambar 1: Data Pengukuran Torsi, Daya Listrik Keluaran Generator dan Efisiensi



Gambar 2: Data Pengukuran Beban, Torsi, Daya Listrik Keluaran Generator dan Efisiensi

PENUTUP

Simpulan

Penelitian ini berhasil mengidentifikasi parameter operasi optimum turbin generator untuk meningkatkan efisiensi ekstraksi daya. Efisiensi tertinggi dicapai pada 2500 RPM, dengan nilai efisiensi 92,8%. Pengoperasian turbin pada rentang 2200–2500 RPM direkomendasikan untuk kinerja optimal. Temuan ini dapat diterapkan pada pembangkit listrik untuk meningkatkan efisiensi energi dan mengurangi kerugian mekanis.

Saran

Penulis berharap penelitian ini dapat dikembangkan lebih lengkap dengan menambahkan parameter dan pengukuran yang lebih detail dan lengkap sehingga dapat dihasilkan sebuah hasil penelitian yang lebih komprehensif dan lebih akurat.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. P. Boyce, *Gas Turbine Engineering Handbook*. Elsevier, 2012.
- [2] H. I. H. Saravanamuttoo, G. F. C. Rogers, and H. Cohen, *Gas Turbine Theory*. Pearson Education, 2009.
- [3] C. K. N. Patel, "Performance Optimization of Turbine-Generator," 2020.
- [4] A. Suryadi and B. Pramono, "Analisis Efisiensi Turbin Uap pada Pembangkit Listrik," *Jurnal Energi dan Manufaktur*, vol. 5, no. 1, pp. 45–52, 2018.
- [5] M. Abdullah, S. Wibowo, and A. Haris, "Performance analysis of steam turbine with extraction control on Rankine cycle

- power plant,” *Energy Conversion and Management*, vol. 224, p. 113374, 2020.
- [6] Y. A. Çengel and M. A. Boles, *Thermodynamics: An Engineering Approach*, 9th ed. McGraw-Hill, 2021.
- [7] R. Kehlhofer, B. Rukes, F. Hannemann, and F. Stirnimann, *Steam Turbines for Modern Power Plants*. Elsevier, 2009.
- [8] T. J. Kotas, *The Exergy Method of Thermal Plant Analysis*. Elsevier, 2013.
- [9] M. J. Moran, H. N. Shapiro, D. D. Boettner, and M. B. Bailey, *Fundamentals of Engineering Thermodynamics*, 9th ed. Wiley, 2018.
- [10] M. S. Rahman and M. R. Karim, “Thermodynamic modeling and optimization of feedwater heating system using turbine extraction,” *Energy Reports*, vol. 6, pp. 227–236, 2020.
- [11] A. Z. Sahin, A. A. Al-Haddad, and B. S. Yilbas, “Thermodynamic performance evaluation of extraction–condensing steam turbines,” *Energy*, vol. 140, pp. 1232–1241, 2017.
- [12] Z. Wang, Y. Li, and C. Xu, “Extracted steam flow optimization for large-scale thermal power plant using PSO,” *Energy Conversion and Management*, vol. 254, p. 115109, 2022.
- [13] F. Zhang and N. Lior, “Energy and exergy optimization of steam turbine regenerative systems,” *Energy*, vol. 167, pp. 569–584, 2019.