

ANALISIS KINERJA TURBIN UAP BERDASARKAN PARAMETER EFISIENSI ISENTROPIS DAN EFISIENSI TERMAL INDUSTRI PEMBANGKIT LISTRIK

Karima Nur Faikoha dan Eko Naryono

Jurusan Teknik Kimia, Politeknik Negeri Malang, Jl. Soekarno Hatta No. 9, Malang 65141, Indonesia
karima.nur.136@gmail.com; [eko.naryono@polinema.ac.id]

ABSTRAK

Industri Pembangkit Listrik merupakan salah satu perusahaan pembangkit listrik dengan kapasitas 660 MW. Pembangkit ini menggunakan turbin uap untuk mengkonversi energi panas menjadi energi mekanik, lalu diubah menjadi energi listrik. Agar kinerja Industri Pembangkit Listrik dapat berjalan dengan efisien dan sesuai standar, diperlukan *performance test* secara berkala, khususnya pada turbin uap. Parameter yang sering digunakan untuk analisis kinerja turbin uap adalah efisiensi isentropis, efisiensi termal, dan *turbine heat rate*. Efisiensi isentropis digunakan untuk membandingkan kondisi aktual terhadap kondisi ideal alat. Efisiensi termal adalah persentase energi panas yang dapat diubah menjadi kerja. *Turbine heat rate* adalah jumlah kalor yang diperlukan untuk menghasilkan 1 kWh energi listrik. Tujuan analisis ini adalah mengevaluasi kinerja turbin uap pada Industri Pembangkit Listrik terhadap parameter efisiensi isentropis, efisiensi termal, *turbine heat rate*, dan membandingkan hasil perhitungan efisiensi isentropis dari hasil perhitungan nilai aktual dengan nilai teoritis. Berdasarkan hasil perhitungan didapatkan, nilai efisiensi isentropis pada *High Pressure Turbin* sebesar 82,45%, pada *Intermediate Pressure Turbin* sebesar 80,4%, dan pada *Low Pressure Turbin* sebesar 68,3%. Nilai *heat rate* dan efisiensi termal pada *net turbine heat rate* masing masing sebesar 2087,2 kcal/kWh dengan efisiensi termal sebesar 41,22% sedangkan nilai *gross turbine heat rate* 1987,8 kcal/kWh dengan efisiensi termal sebesar 43,28%.

Kata kunci: efisiensi isentropis, efisiensi termal, turbine heat rate, turbin uap

ABSTRACT

The Power Generation Industry is one of the power generation companies with a capacity of 660 MW. This power plant uses steam turbines to convert thermal energy into mechanical energy, which is then converted into electrical energy. In order for the Power Generation Industry to operate efficiently and in accordance with applicable standards, periodic performance tests are required, especially on steam turbines. Parameters commonly used in steam turbine performance analysis include isentropic efficiency, thermal efficiency, and turbine heat rate. Isentropic efficiency is used to compare actual operating conditions with ideal conditions. Thermal efficiency represents the percentage of heat energy that can be converted into useful work, while turbine heat rate indicates the amount of heat required to produce 1 kWh of electrical energy. The purpose of this analysis is to evaluate steam turbine performance in the Power Generation Industry based on isentropic efficiency, thermal efficiency, and turbine heat rate parameters, as well as to compare calculated isentropic efficiency values with theoretical values. Based on calculation results, the isentropic efficiency of the High Pressure Turbine is 82.45%, the Intermediate Pressure Turbine is 80.4%, and the Low Pressure Turbine is 68.3%. The net turbine heat rate is 2087.2 kcal/kWh with a thermal efficiency of 41.22%, while the gross turbine heat rate is 1987.8 kcal/kWh with a thermal efficiency of 43.28%.

Keywords: isentropic efficiency, termal efficiency, turbine heat rate, steam turbine

Corresponding author: Eko Naryono

Jurusan Teknik Kimia, Politeknik Negeri Malang

Jl. Soekarno-Hatta No. 9, Malang 65141, Indonesia

E-mail: eko.naryono@polinema.ac.id



1. PENDAHULUAN

Energi listrik menjadi salah satu kebutuhan dasar yang mendukung aktivitas sehari-hari. Kebutuhan energi listrik kian meningkat dengan pertumbuhan ekonomi dan peningkatan kualitas hidup masyarakat. Sebagai negara berkembang dengan jumlah penduduk yang besar, Indonesia menghadapi tantangan dalam memenuhi permintaan listrik yang terus meningkat. Oleh karena itu, pembangkit listrik memegang peranan penting dalam pemenuhan kebutuhan listrik.

Industri Pembangkit Listrik merupakan salah satu perusahaan pembangkit listrik dengan kapasitas 660 MW, yang berkontribusi dalam menyediakan energi listrik di pulau jawa hingga bali. Pembangkit ini mengandalkan energi termal yang dihasilkan dari pembakaran batu bara. Sebagai komponen utama sistem pembangkit, turbin uap mengonversi energi panas menjadi energi mekanik, yang kemudian digunakan generator untuk memproduksi energi listrik [1]. Pada pembangkit dengan kapasitas besar dengan siklus *reheat* terdapat tiga jenis turbin berdasarkan tekanan inputnya, yaitu *high pressure* (HP) turbin, *intermediate pressure* (IP) turbin, dan *low pressure* (LP) turbin. Proses konversi air laut menjadi energi listrik dengan sumber panas dari pembakaran batubara didasarkan pada pengubahan fase dari cair (air) ke uap (*steam*). Proses pembangkit uap dilakukan di dalam boiler yang dipanaskan dari pembakaran batubara.

Pembangkit listrik tenaga uap juga dapat disebut sebagai “*thermal plant*”, karena memanfaatkan energi kimia dari bahan bakar untuk menghasilkan energi panas yang diperlukan untuk mengubah air menjadi uap di dalam boiler [2]. Air yang dipanaskan akan berubah menjadi uap dengan tekanan dan suhu yang tinggi. Peralatan utama yang digunakan pada pembangkit listrik terdiri dari turbin, pompa, kondensor, dan boiler [3]. Uap tersebut kemudian dialirkan menuju turbin sehingga dapat memutar *shaft* turbin. Turbin ini terhubung langsung dengan generator melalui poros, sehingga rotasi turbin menghasilkan energi mekanik yang diubah generator menjadi energi listrik. Kinerja Turbin uap dapat dipengaruhi oleh suhu dan tekanan *steam* masuk dan keluar, nilai entalpi dan entropi, laju panas turbin, tekanan vakum kondensor, dan kehilangan energi [2,4,5].

Guna menjaga kinerja pada pembangkit listrik dapat berjalan dengan efisien dan sesuai standar, diperlukan *performance test* secara berkala pada peralatan, khususnya pada turbin uap. Pengujian pada turbin ini juga berfungsi untuk memonitor kondisi operasional terkini dan mengidentifikasi potensi masalah, seperti penurunan performa atau kerusakan pada komponen turbin. Kondisi ini dapat mengganggu sistem pembangkit secara keseluruhan sehingga menurunkan kinerjanya.

Energi uap yang dihasilkan oleh boiler tidak dapat 100% terkonversi menjadi energi mekanik pada turbin uap, karena adanya kerugian energi yang terjadi [1]. Menurut Suriaman dan Suprianto (2022), beberapa faktor yang dapat menyebabkan penurunan kinerja turbin yaitu laju uap, temperatur, tekanan, dan entalpi [6]. Untuk mengevaluasi performa turbin dapat dilakukan berdasarkan perhitungan efisiensi isentropis, efisiensi termal, dan *turbine heat rate*.

Efisiensi isentropis adalah selisih antara entalpi masuk dan entalpi keluar dibagi dengan entalpi masuk dan entalpi isentropis yang dinyatakan dalam persen yang rumusannya ditunjukkan pada Persamaan 1.

$$\eta = \frac{h_i - h_o}{h_i - h_2'} \times 100\% \quad (1)$$

Dimana:

η = Efisiensi turbin (%)

h_i = *Inlet Enthalpi* (kJ/kg)

h_o = *Exhaust Enthalpi* (kJ/kg)

h_2' = Entalpi isentropis (kJ/kg)

Efisiensi termal adalah hasil pembagian antara 1 kWh (860,421 kcal) dengan nilai *turbine heat rate* yang dinyatakan dalam persen yang ditunjukkan pada Persamaan 2.

$$\eta = \frac{860,421}{HR_T} \times 100\% \quad (2)$$

Dimana:

η = Efisiensi turbin (%)

HR_T = *Heat Rate Turbin*

1 kWh = 860,421 kilokalori (kcal)

Pada perhitungannya memerlukan data besarnya *turbine heat rate* yaitu jumlah kalor yang diperlukan untuk menghasilkan 1 kWh energi listrik [2].

Ketiga parameter tersebut menjadi indikator pada evaluasi performa turbin uap. Pada penelitian Alber (2022) dilakukan analisis efisiensi isentropis turbin uap didapatkan sebesar 67,74%. Efisiensi isentropis dipengaruhi oleh temperatur uap dan *exhaust turbine pressure*. Daya yang dihasilkan pada pembangkit listrik bergantung pada besarnya efisiensi turbin uap yang dihasilkan [7]. Pada penelitian yang dilakukan Setiawan, Melkias, dan Slameto (2022) di PLTU Cirebon Power didapatkan hasil analisis kinerja turbin uap sebagai berikut: efisiensi isentropis pada HP turbin sebesar 82,73%, pada IP turbin sebesar 86,76 %, dan pada LP turbin sebesar 87,71% sedangkan nilai *turbine heat rate* yang dihasilkan sebesar 7909,33 kJ/kWh dengan efisiensi termal sebesar 45,52% [4]. Pada penelitian Jamaludin (2017) efisiensi termal di PLTU Banten 3 Lontar sebesar 43,63%, yang dianggap baik karena nilai efisiensi berada diatas nilai 35% [8].

Guna melakukan *performance test* secara berkala di Industri Pembangkit Listrik, maka pada penelitian ini dilakukan analisis kinerja turbin uap berdasarkan ketiga parameter tersebut. Analisis ini dilakukan berdasarkan hasil perhitungan efisiensi isentropis, nilai *turbine heat rate* dan efisiensi termal. Penelitian bertujuan untuk mengevaluasi kinerja turbin uap pada Industri Pembangkit Listrik terhadap parameter efisiensi isentropis, efisiensi termal, *turbine heat rate*, dan membandingkan hasil perhitungan efisiensi isentropis dari hasil perhitungan nilai aktual dengan nilai teoritis yang dilakukan satu kali *performance test* pada bulan Agustus 2024 dengan data yang berasal dari ruang CCR (*Central Control Room*).

2. METODOLOGI PENELITIAN

Tahapan penelitian yang dilakukan untuk melakukan analisis kinerja turbin uap dengan studi literatur, pengumpulan data, pengolahan data dan perhitungan efisiensi isentropis, *turbine heat rate*, efisiensi termal masing masing dapat dijelaskan sebagai berikut:

2.1. Teknik Pengumpulan Data

Data untuk menghitung ketiga parameter tersebut di atas diperoleh dari pengamatan langsung di lapangan yang dilakukan selama satu bulan untuk sekali *performance test* pada bulan Agustus 2024 dengan pengumpulan data yang dilakukan berasal dari ruang CCR (*Central Control Room*). Data yang dikumpulkan dari lapangan terdiri dari daya *output nett* dan *gross*; *pressure*, temperatur, dan laju alir *steam*; tekanan, temperatur, dan laju alir *cold reheat*; *pressure*, temperatur, dan laju alir *hot reheat*; tekanan, temperatur, dan laju alir *feed water*; tekanan, temperatur, dan laju alir *superheater spray*; tekanan dan temperatur *inlet steam* HP turbin; tekanan dan temperatur *exhaust steam* HP turbin; tekanan dan *temperatur inlet steam intermediate pressure turbin*; tekanan dan temperatur *exhaust steam intermediate pressure turbin*; tekanan dan temperatur *inlet steam low pressure turbin*; tekanan dan temperatur *exhaust steam low pressure turbin*.

2.2. Pengolahan Data

Data yang diperoleh digunakan untuk menentukan entalpi dan entropi pada setiap bagian yang dievaluasi. Entalpi adalah sifat termodinamika yang mengukur energi dalam suatu sistem [9]. Entalpi adalah jumlah energi internal suatu sistem dan hasil perkalian tekanan dan volumenya. Entropi adalah besaran dalam termodinamika yang dapat mengukur tingkat ketidak teraturan atau kebebasan energi dalam suatu sistem [10]. Entalpi dan entropi ditentukan menggunakan *steam table*.

Tabel 1. Pengolahan data *turbine heat rate*

Komponen Sistem	Laju Alir Massa (kg/h)	Temperature (°C)	Pressure (bar)	Entalpi (kJ/kg)
Steam	1.889.328	538,314	167,408	3.399,043
Cold Reheat	1.629.062	326,676	35,524	3.045,970
Hot Reheat	1.716.315	540,257	33,500	3.544,238
Feed Water	1.896.868	268,535	186,658	1.175,001
Superheater Spray	97.042	178,302	201,520	765,900

Tabel 2. Pengolahan data efisiensi isentropis

Komponen Sistem	Satuan	HP Turbin	IP Turbin	LP Turbin
Inlet Entalpi	kJ/kg	3.397,14	3.543,59	3.169,09
Exhaust Entalpi	kJ/kg	3.036,89	3.169,09	2.578,76
H_2^I	kJ/kg	1.059,97	743,59	173,84
H_2^V	kJ/kg	2.802,28	2.773,25	186,65
Inlet Entropi	kJ/kg.C	6,41	7,30	7,36
Exhaust Entropi	kJ/kg.C	6,53	7,37	8,24
S_2^I	kJ/kg.C	2,74	2,09	0,59
S_2^V	kJ/kg.C	6,11	6,62	8,23

2.3. Perhitungan Efisiensi Isentropis

Perhitungan efisiensi isentropis dapat dihitung menggunakan Persamaan (1), yang memerlukan data entalpi isentropis. Data ini dihitung menggunakan Persamaan (4), yang memerlukan data fraksi uap pada proses kompresi turbin yang dihitung menggunakan

Persamaan (3) [9]. Entalpi isentropis adalah energi yang dimiliki suatu zat pada proses isentropis [11], yang berdasarkan tinjauan termodinamika diasumsikan berlangsung secara adiabatis, *reversible*, tanpa perubahan entropi, dan tidak ada kehilangan energi [12].

$$\dot{S}_2 = \dot{S}_2^I + x_2 (\dot{S}_2^V - \dot{S}_2^I) \quad (3)$$

Keterangan:

x_2 = fraksi uap

\dot{S}_2 = Entropi isentropis (kJ/kg.C)

\dot{S}_2^I = Entropi *saturated liquid* (kJ/kg.C)

\dot{S}_2^V = Entropi *saturated vapor* (kJ/kg.C)

2.4. Perhitungan Entalpi Isentropis

$$\dot{H}_2 = \dot{H}_2^I + x_2 (\dot{H}_2^V - \dot{H}_2^I) \quad (4)$$

Keterangan:

\dot{H}_2 = Entalpi isentropis (kJ/kg)

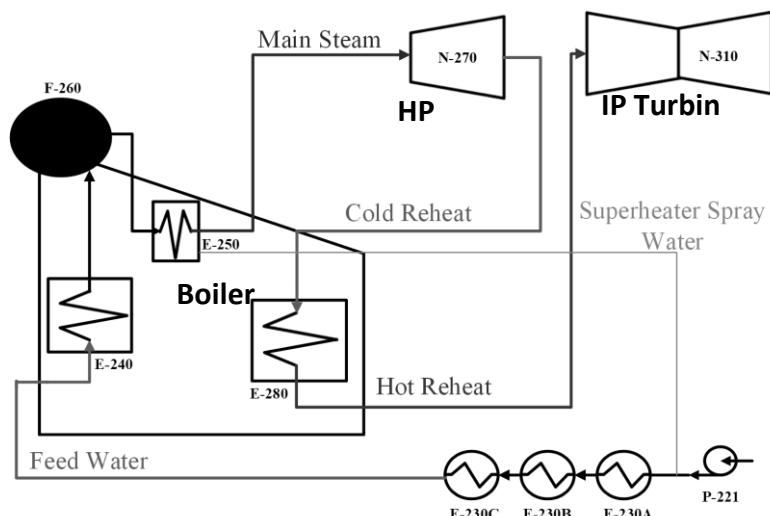
\dot{H}_2^I = Entalpi *saturated liquid* (kJ/kg)

\dot{H}_2^V = Entalpi *saturated vapor* (kJ/kg)

x_2 = fraksi uap

2.5. Perhitungan Turbine Heat Rate

Diagram alir untuk perhitungan *turbine heat rate* digambarkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Skematik diagram *turbine heat rate*

Perhitungan *turbine heat rate* dilakukan menggunakan Persamaan (5).

$$HR_T = \frac{(\dot{m}_1 \times h_1 + \dot{m}_3 \times h_3) - (\dot{m}_f \times h_f + \dot{m}_2 \times h_2 + \dot{m}_{is} \times h_{ss})}{P} \quad (5)$$

Keterangan:

HR_T : *Turbine Heat Rate*

- m' 1 : Laju Aliran Massa *Steam* (kg/h)
 m' 2 : Laju Aliran Massa *Cold Reheat* (kg/h)
 m' 3 : Laju Aliran Massa *Hot Reheat* (kg/h)
 m' is : Laju Aliran Massa *Superheater Spray* (kg/h)
 m' f : Laju Aliran Massa *Feed Water* (kg/h)
 h_1 : Entalpy *Uap* (kJ/kg)
 h_2 : Entalpy *Cold Reheat* (kJ/kg)
 h_3 : Entalpy *Hot Reheat* (kJ/kg)
 h_{ss} : Entalpy *Superheater Spray* (kJ/kg)
 h_f : Entalpy *Feed Water* (kJ/kg)
 P : Daya *Output Gross/ Nett* (kWh)

Terdapat dua jenis perhitungan *turbine heat rate* yang dilakukan, yaitu *net turbine heat rate* dan *gross turbine heat rate*. *Net turbine heat rate* adalah jumlah energi panas yang diperlukan turbin untuk menghasilkan satu satuan energi listrik netto (kWh) dengan mempertimbangkan seluruh kerugian yang terjadi dalam sistem pembangkit. *Gross turbine heat rate* adalah jumlah energi panas yang dibutuhkan turbin untuk memproduksi satuan energi listrik bruto (kWh), tanpa memperhitungkan energi yang digunakan untuk kebutuhan internal pembangkit listrik [1].

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan perhitungan, diperoleh nilai efisiensi isentropis, efisiensi termal, dan *turbine heat rate* sebagai berikut:

3.1. Analisis Efisiensi Isentropik Turbin Uap

Berdasarkan perhitungan, diperoleh nilai efisiensi isentropis yang disajikan pada Tabel 3.

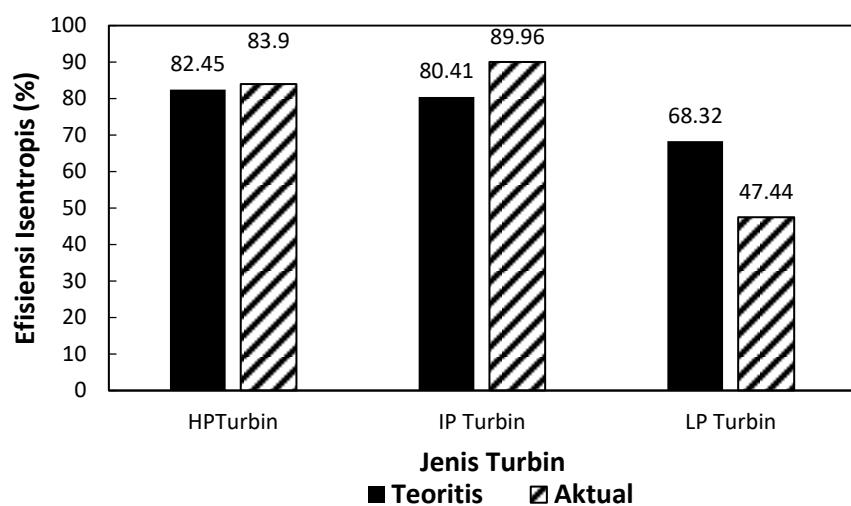
Tabel 3. Data efisiensi isentropis aktual dan teoritis

Jenis Turbin	Vapor Fraction Teoritis	Entalpi Isentropis Teoritis (kJ/kg)	Efisiensi Isentropis Teoritis (%)	Entalpi Isentropis Aktual (kJ/kg)	Efisiensi Isentropis Aktual (%)
HP Turbin	1	2960,221	82,452	2.967,75	83,897
IP Turbin	1	3077,874	80,414	3.127,27	89,955
LP Turbin	0,887	2305,071	68,324	1924,601	47,436

Berdasarkan Tabel 3, dapat ditunjukkan bahwa nilai *vapor fraction* pada HP turbin secara teoritis didapatkan nilai sebesar 1 yang menunjukkan bahwa fase pada HP turbin semuanya uap. Hasil perhitungan nilai efisiensi isentropis teoritis sebesar 82,452%, sedangkan kondisi aktual yang diperoleh dari data pabrik nilai efisiensinya 83,897%. Apabila kedua efisiensi ini dibandingkan terdapat selisih 1,445%, selisih ini relatif kecil yang menunjukkan metode rumusan untuk perhitungan efisiensi teoritis valid. Efisiensi HP turbin masih cukup tinggi apabila dibandingkan dengan yang standarnya untuk efisiensi turbin uap sebesar 70-90% [12].

IP turbin secara teoritis didapatkan nilai *vapor fraction* sebesar 1, hal tersebut menunjukkan bahwa fase pada IP turbin semuanya uap. Selanjutnya didapatkan pula nilai entalpi isentropis teoritis sebesar 3077,88 kJ/kg sehingga berdasarkan hasil perhitungan didapatkan nilai efisiensi sebesar 80,414%. Pada kondisi aktual didapatkan nilai entalpi isentropis sebesar 3127,273 kJ/kg dan nilai efisiensi isentropis sebesar 89,955%. Dari hasil efisiensi isentropis dapat dilihat terjadi perbedaan yang relatif jauh. Hal tersebut dapat dikarenakan perbedaan metode penentuan entalpi isentropis yang digunakan. Pada entalpi isentropis teoritis dilakukan dengan berdasarkan buku *Chemical Engineering Thermodynamics* oleh Smith J.M sedangkan pada kondisi aktual didapatkan berdasarkan perhitungan software tertentu [9]. Efisiensi IP turbin ini relatif tinggi masih pada rentang standar untuk nilai efisiensi turbin uap yang sebesar 70-90% [12].

LP turbin secara teoritis didapatkan nilai *vapor fraction* sebesar 0,887 yang menunjukkan bahwa fase pada LP turbin tidak semuanya uap sebagian fase cair. Nilai entalphi isentropis sebesar 2305,07 kJ/kg, berdasarkan hasil perhitungan didapatkan nilai efisiensi sebesar 68,324%. Pada kondisi aktual didapatkan nilai entalphi isentropis sebesar 1.924,60 kJ/kg dan nilai efisiensi isentropis sebesar 47,436%. Pada kedua efisiensi isentropis terdapat perbedaan yang relatif jauh. Kondisi ini kemungkinan disebabkan karena perbedaan metode penentuan entalpi isentropis. Perhitungan entalpi isentropis teoritis dilakukan dengan berdasarkan buku *Chemical Engineering Thermodynamics* oleh Smith J.M, sedangkan pada kondisi aktual didapatkan berdasarkan perhitungan software tertentu [9]. Selain itu, pada LP turbin A didapatkan hasil yang sama dengan B dikarenakan mereka dioperasikan secara *parallel*. Efisiensi LP turbin ini cukup baik, karena efisiensi isentropis dari turbin aktualnya berada diatas efisiensi isentropis spesifikasi yakni 67,37% [7].



Gambar 2. Perbandingan efisiensi isentropis aktual dan teoritis

Efisiensi isentropis yang tinggi menunjukkan kinerja turbin yang optimal dalam mentransfer energi fluida kerja menjadi energi kinetik. Meskipun dalam kondisi nyata selalu ada kerugian energi, efisiensi isentropik tetap digunakan sebagai acuan teoritis dalam analisis dan perancangan turbin [13]. Besarnya efisiensi mempengaruhi daya yang dihasilkan pada sistem pembangkit listrik, besar efisiensinya berbanding lurus dengan

daya yang dihasilkan[11]. Selain itu, efisiensi isentropik turbin uap juga dipengaruhi oleh suhu dan tekanan uap. Peningkatan suhu dan tekanan uap akan meningkatkan efisiensi isentropik turbin, karena ketersediaan energi panas yang diubah menjadi energi mekanik dalam turbin semakin besar [14]. Menurut penelitian Yohana (2017) nilai *vapor fraction* juga memegang peranan penting dalam efisiensi isentropis, karena semakin mendekati nilai *vapor fraction* ideal yakni fraksi uap dalam kondisi operasi isentropik atau tanpa kehilangan energi, maka semakin tinggi efisiensi isentropis yang dihasilkan [11].

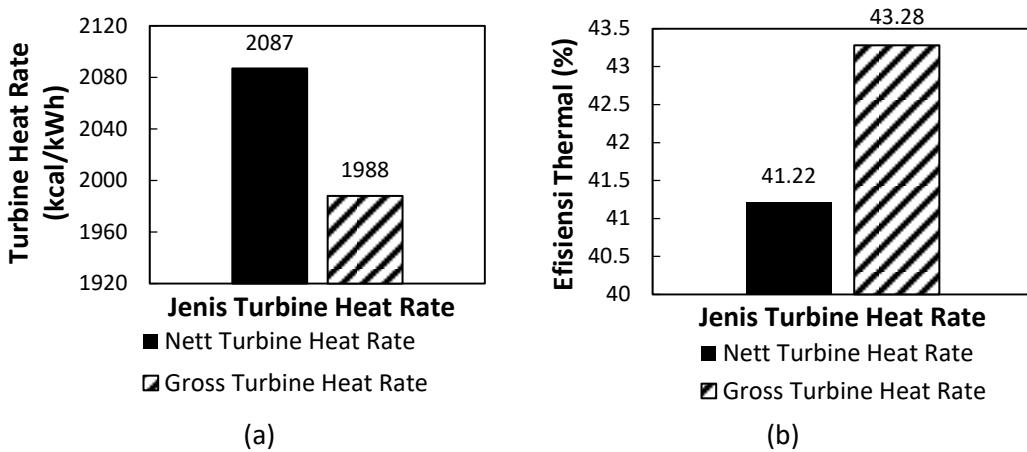
3.2. Analisis Efisiensi Termal dan *Turbine heat rate*

Efisiensi termal adalah persentase energi panas yang dapat diubah menjadi kerja [3]. Ukuran untuk menganalisis efisiensi termal turbin menggunakan nilai *heat rate*, yaitu jumlah energi panas yang diperlukan untuk menghasilkan 1 kWh listrik [2]. *Turbine heat rate* adalah perbandingan dari energi total yang digunakan untuk menggerakkan turbin, dengan energi listrik nett yang dihasilkan oleh generator, dinyatakan dalam (kJ/kWh). Variabel yang berpengaruh pada *turbine heat rate* yaitu temperatur, tekanan, dan laju aliran massa uap; temperatur dan tekanan uap masuk *cold reheat*; temperatur dan tekanan uap keluar *hot reheat*; temperatur, tekanan, dan laju aliran massa *superheater spray water*; temperatur, tekanan, dan laju aliran massa *final feed water*; dan daya *gross output*. Terdapat dua macam perhitungan dalam penentuan *turbine heat rate* yakni *net turbine heat rate* dan *gross turbine heat rate*.

Berdasarkan perhitungan didapatkan nilai *net turbine heat rate* sebesar 2087,2027 kcal/kWh dengan efisiensi termal sebesar 41,22% sehingga turbin uap dapat mengubah 41,22% energi kimia batu bara menjadi kerja mekanis. Sedangkan nilai *gross turbine heat rate* didapatkan sebesar 1987,812128 kcal/kWh dengan efisiensi termal sebesar 43,28%. Menurut Mustofa, dkk. (2014), nilai *turbine heat rate* berbanding terbalik dengan kinerja dari turbin uap tersebut [2]. Hal tersebut dapat dilihat dari efisiensi siklus turbin.

Nilai *turbine heat rate* juga berbanding terbalik dengan efisiensi siklus turbin uap, semakin kecil *turbine heat rate* maka efisiensi siklus turbin semakin tinggi, dan sebaliknya semakin besar *turbine heat rate* maka efisiensi siklus turbin semakin kecil, seperti ditunjukkan pada Gambar 3 [15]. Menurut Çengel, dkk. (2019) efisiensi termal mesin diesel dan pembangkit listrik tenaga uap yang berkapasitas besar memiliki nilai efisiensi termal minimal sebesar 40% [3]. Berdasarkan hasil perhitungan, efisiensi termal di Industri Pembangkit Listrik baik karena masih lebih tinggi dari nilai efisiensi termal mesin diesel dan pembangkit listrik tenaga uap.

Kinerja turbin uap dipengaruhi oleh laju massa dan entalpi uap yang diperlukan untuk memutar turbin. Dari sisi energi, semakin besar energi input yang masuk ke dalam turbin, maka kinerjanya akan semakin optimal. Sebaliknya, semakin kecil energi input yang diterima, kinerja turbin akan menurun. Tingkat vakum kondensor juga berpengaruh terhadap kinerja turbin uap khususnya pada LP turbin. Vakum kondensor yang tinggi dapat meningkatkan efisiensi turbin, tetapi juga berisiko menyebabkan uap berubah menjadi titik-titik embun yang dapat merusak turbin sedangkan vakum kondensor yang rendah akan mengakibatkan hilangnya daya yang dibangkitkan turbin [5].



Gambar 3. (a) Perbandingan *nett turbine heat rate* dan *gross turbine heat rate* (b) perbandingan efisiensi termal terhadap jenis *turbine heat rate*

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil perhitungan turbin uap pada Industri Pembangkit Listrik didapatkan hasil untuk nilai efisiensi isentropis pada HP turbin sebesar 82,452% pada IP turbin sebesar 80,414%, dan pada LP turbin A dan B sebesar 68,324%. Hasil ini menunjukkan bahwa efisiensi turbin menurun seiring dengan tahapan ekspansi uap. Perhitungan nilai *heat rate* dan efisiensi termal menunjukkan bahwa *nett turbine heat rate* sebesar 2087,202735 kcal/kWh dengan efisiensi termal 41,22%. Sementara itu, nilai *gross turbine heat rate* sebesar 1987,812128 kcal/kWh dengan efisiensi termal 43,28%. Nilai efisiensi termal ini dapat dikatakan memenuhi persyaratan berdasarkan hasil yang diperoleh. Kinerja sistem tenaga uap secara keseluruhan sangat dipengaruhi oleh efisiensi konversi energi dalam turbin serta kinerja kondensor. Faktor-faktor seperti tekanan, temperatur, dan kualitas uap juga berperan penting dalam menentukan efisiensi keseluruhan sistem tenaga uap. Oleh karena itu, pemantauan dan pengoptimalan kondisi operasi sangat diperlukan agar sistem tetap bekerja secara efisien dan stabil.

Untuk penelitian selanjutnya, disarankan untuk melakukan sinkronisasi antara metode perhitungan entalpi isentropis penulis dan software, guna meningkatkan keakuratan hasil analisis serta memverifikasi kevalidan kevalidan data kinerja turbin uap secara lebih komprehensif.

REFERENSI

- [1] R. Apriandi dan A. Mursadin, "Analisis Kinerja Turbin Uap Berdasarkan Performance Test PLTU PT. Indo cement P-12 Tarjun," *Scientific Journal of Mechanical Engineering Kinematika*, vol. 1, no. 1, hal. 37–46, 2016.
- [2] B. A. Mustofa, Sunarwo, dan Supriyo, "Analisa Heat Rate Pada Turbin Uap Berdasarkan Performance Test PLTU Tanjung Jati B Unit 3," *Eksperi Jurnal Teknik Energi*, vol. 10, no. 3, hal. 72–77, 2014.
- [3] M. Çengel, Y. A., Boles, M. A., & Kanoğlu, *Thermodynamics An Engineering Approach (Ninth ed.)*, Ninth. New York, 2019.
- [4] F. Setiawan, A. Melkias, dan Slameto, "Analisis Kinerja Turbin Uap Unit 1 Di Cirebon Power," *Jurnal Teknik Energi*, vol. 11, no. 2, hal. 7–11, 2022.

- [5] S. Wuryanti, S. H. Sya'diah, dan A. A. Melkias, "Analisis Pengaruh Perubahan Tekanan Vakum Kondensor Terhadap Performa Turbin Uap," *Prosiding Industrial Research Workshop and National Seminar*, vol. 15, no. 1, hal. 82–89, 2024.
- [6] I. Suriaman dan A. Suprayitno, "Analisis Pengaruh Laju Uap Terhadap Efisiensi Turbin Uap Condensing Pada PLTU Pt. Xxx," *Jurnal Teknologika*, vol. 12, no. 2, hal. 205–215, 2022.
- [7] I. D. Alber, B. F. T. Kiono, dan U. Harmoko, "Analisa Efisiensi Isentropik Turbin pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap," *Jurnal Syntax Admiration*, vol. 4, no. 8, 2023.
- [8] J. Permana dan I. Kurniawan, "Analisis Perhitungan Daya Turbin Yang Dihasilkan Dan Efisiensi Turbin Uap Pada Unit 1 Dan Unit 2 Di Pt. Indonesia Power Uboh Ujp Banten 3 Lontar," *Motor Bakar : Jurnal Teknik Mesin*, vol. 1, no. 2, hal. 1–8, 2017.
- [9] J. M. Smith, *Introduction to chemical engineering thermodynamics*, Eight. New York: McGraw Hill Education, 1996.
- [10] M. Arrazi, Zamzami, dan Maimun, "Analisis Efisiensi Turbin Uap Sebagai Penggerak Generator Pabrik Minyak Kelapa Sawit PT. Syaukath Sejahtera (Gandapura)," *Jurnal Tektro*, vol. 7, no. 1, hal. 91–97, 2023.
- [11] E. Yohana dan R. Romadhon, "Analisa Efisiensi Isentropik dan Exergy Destruction Pada Turbin Uap Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Gas dan Uap," *Rotasi*, vol. 19, no. 3, hal. 134, 2017.
- [12] M. J. Moran, *Engineering Thermodynamics*, Fifth. USA: John Wiley & Sons Inc., 2011.
- [13] V. Usai, C. Cordalonga, dan S. Marelli, "Experimental evaluation of isentropic efficiency in turbocharger twin-entry turbines," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 2385, no. 1, 2022.
- [14] P. F. Wulandari, D. Lutfiananda, dan K. Sumada, "Unjuk Kerja Dan Efisiensi Turbin Uap Dan Generator (Tg-65) Pada Pembangkit Listrik Unit Sistem Utilitas Departemen Produksi Iiiia Pt Petrokimia Gresik," *Sinergi Polmed: Jurnal Ilmiah Teknik Mesin*, vol. 4, no. 1, hal. 67–74, 2023.
- [15] Sahid dan Prasetyo Budhi, "Heat Rate Pembangkit Listrik Tenaga Uap Paiton Baru (Unit 9) Berdasarkan Performance Test Tiap Bulan Dengan Beban 100%," *Jurnal Teknik Energi*, vol. 12, no. 2, hal. 30–36, 2016.