

## Pengaruh Head terhadap Kinerja Mekanis Sebuah Kompresor sebagai Turbin (*Compressor as Turbine/CAT*)

Muhammad Fikri Zahran<sup>1</sup>, Yul Hizhar<sup>2\*</sup>, Uyung Gatot Syafrawi Dinata<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Prodi Sarjana Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Andalas  
Kampus Limau Manis, Kec. Pauh, Kota Padang, Sumatera Barat, Indonesia

<sup>2,3</sup>Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Andalas  
Kampus Limau Manis, Kec. Pauh, Kota Padang, Sumatera Barat, Indonesia

\*Corresponding author: [yul\\_hizhar@eng.unand.ac.id](mailto:yul_hizhar@eng.unand.ac.id)

### Abstract

*This study aims to evaluate the mechanical performance of a turbocharger compressor operated as a water turbine. The article presents experimental results on the effect of head variation on the performance of a Compressor as Turbine (CAT). The experiments were conducted using a laboratory test rig under three head levels: 8, 10, and 12 meters. The main parameters analyzed include rotational speed, torque, turbine output power, and efficiency, all measured systematically. The experimental results indicate that the CAT system achieved stable operation and the highest energy conversion efficiency within the rotational speed range of 1000 to 2000 rpm. Within this range, flow rate, torque, and output power demonstrated a consistent relationship that produced a maximum efficiency of approximately 70%. The variation in head had a significant effect on performance, with applications at 10–12 meters head yielding more optimal results. These findings suggest that the turbocharger compressor has promising potential as an efficient and cost-effective water turbine solution, offering a balance between performance and economic feasibility. Moreover, this study contributes new experimental data to the development of CAT technology, which may accelerate its implementation in sustainable energy systems.*

**Keywords:** *Compressor as turbine (CAT), turbocharger, head variation, turbine power output, turbine efficiency*

### Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi performa mekanis dari kompresor *turbocharger* yang difungsikan sebagai turbin air. Artikel ini menyajikan hasil eksperimen mengenai pengaruh variasi head terhadap kinerja *Compressor as Turbine (CAT)*. Pengujian dilakukan menggunakan *test rig* laboratorium dengan tiga tingkat head: 8, 10, dan 12 meter. Parameter utama yang dianalisis meliputi kecepatan rotasi, torsi, daya keluaran turbin, dan efisiensi, yang diukur secara sistematis. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa sistem CAT mencapai kestabilan operasional dan efisiensi konversi energi tertinggi pada kisaran kecepatan rotasi antara 1000 hingga 2000 rpm. Pada rentang ini, debit aliran, torsi, dan daya keluaran menunjukkan keselarasan yang menghasilkan efisiensi maksimum sekitar 70%. Variasi head memberikan pengaruh signifikan terhadap performa, di mana aplikasi pada head 10–12 meter menunjukkan hasil yang lebih optimal. Temuan ini mengindikasikan bahwa kompresor *turbocharger* memiliki potensi sebagai solusi turbin air yang efisien dan ekonomis, dengan keseimbangan antara kinerja dan biaya. Penelitian ini juga menyumbangkan data eksperimental baru dalam pengembangan teknologi CAT, yang dapat mempercepat penerapannya dalam sistem energi berkelanjutan.

**Kata kunci:** Kompresor sebagai turbin (CAT), *turbocharger*, variasi head, daya keluaran turbin, efisiensi turbin

---

## 1. Pendahuluan

Energi merupakan kebutuhan esensial bagi umat manusia karena peranannya dalam mendorong kemajuan sosial dan ekonomi secara global. Ketersediaan energi yang andal, aman, dan terjangkau menjadi kunci dalam menghadapi tantangan pembangunan dunia [1]. Di antara berbagai bentuk energi, listrik memiliki peran strategis, terutama di negara berkembang yang berupaya mencapai kemandirian sektor. Sebagai energi sekunder, listrik dihasilkan dari konversi sumber energi primer seperti bahan bakar fosil, nuklir, dan energi terbarukan [2]. Selama beberapa dekade, bahan bakar fosil mendominasi pasokan listrik global, menyumbang lebih dari dua pertiga produksi. Namun, keterbatasan cadangan dan dampak lingkungan mendorong transisi ke energi terbarukan [3].

Tenaga air menjadi penyumbang terbesar dalam kategori energi terbarukan, mencakup lebih dari 92% dari total global [4]. Pembangkit listrik tenaga air skala besar biasanya terhubung ke jaringan nasional, sementara elektrifikasi pedesaan lebih mengandalkan sistem mikrohidro (MHP) dan pikohidro (PHP) yang bersifat *off-grid*. Sistem ini berkapasitas 5–100 kW dan menggunakan metode *run-of-the-river*, yaitu mengalirkan sebagian air sungai atau irigasi ke dalam pipa tekan (*penstock*) [5].

Komponen utama MHP dan PHP meliputi unit elektromekanis, infrastruktur sipil, dan jaringan distribusi [6], dengan turbin sebagai teknologi inti [7]. Sistem ini dikenal murah dalam operasional namun mahal dalam pembangunan. Perkembangan turbin kecil berkecepatan tinggi yang lebih ringan dan efisien mulai mengubah kondisi tersebut [8]. Karena turbin dan generator merupakan komponen vital, efisiensi optimal dengan biaya terjangkau menjadi prioritas [9].

Salah satu pendekatan ekonomis adalah penggunaan pompa standar sebagai turbin, dikenal sebagai *Pump as Turbine* (PAT) [10–13]. Pompa diproduksi massal

dan tersedia dalam berbagai ukuran sesuai variasi head dan debit [10–12]. PAT juga menawarkan waktu pengiriman cepat [12–14], umur layanan panjang [13–14], kemudahan instalasi, serta ketersediaan suku cadang seperti bantalan dan *seal* yang mudah ditemukan [12–14].

Penggunaan PAT pertama kali tercatat pada tahun 1930 di Yorkshire Dales, Inggris, dan setelah lima tahun uji coba, sistem ini terbukti andal dan diadopsi secara luas [12]. Selain itu, *turbocharger*—komponen mesin yang mengubah energi panas dan tekanan gas buang menjadi energi mekanik—juga berpotensi digunakan sebagai turbin air [15]. Kompresor sentrifugal dalam *turbocharger*, berkat desain presisinya, diharapkan mampu memberikan efisiensi tinggi saat digunakan sebagai turbin.

Penelitian oleh Bachtiar dkk. [15–20] menunjukkan bahwa *turbocharger* dapat difungsikan sebagai *Compressor as Turbine* (CAT). Namun, studi tersebut masih terbatas karena belum mempertimbangkan variasi head akibat keterbatasan data pengambilan data dari saluran irigasi. Oleh karena itu, penelitian ini berfokus pada pemanfaatan kompresor *turbocharger* sebagai turbin air. Hingga kini belum ada studi eksperimental yang membahas pengaruh variasi debit terhadap kinerja mekanis CAT, menjadikan penelitian ini sebagai kontribusi baru. Tujuan studi ini adalah mengidentifikasi pengaruh variasi head terhadap performa mekanis CAT. Kebaruan penelitian terletak pada eksplorasi variasi head pada kompresor *turbocharger* sebagai turbin air yang diuji di laboratorium. Pemilihan kompresor dari *turbocharger* didasarkan pada biaya yang lebih ekonomis dan ketersediaannya dibandingkan turbin konvensional [16].

## 2. Metode Penelitian

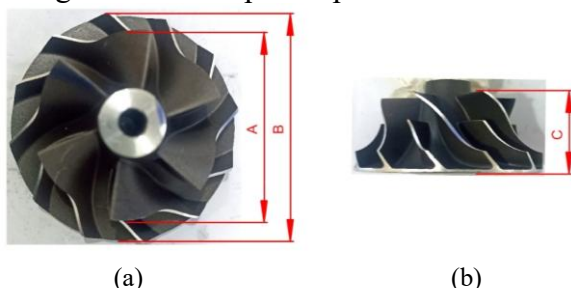
### 2.1 Bahan

Penelitian ini dimulai dengan pengadaan *turbocharger*, alat ukur, dan perlengkapan pendukung lainnya. Tahapan

berikutnya adalah mengonversi *turbocharger* menjadi *Compressor as Turbine* (CAT), dilanjutkan dengan pemasangan pada *test rig*, pelaksanaan eksperimen, serta analisis hasil. Karena *turbocharger* komersial tidak dirancang langsung sebagai turbin, diperlukan penambahan beberapa komponen seperti sambungan (*fitting*), rangka, dan puli agar sesuai dengan kebutuhan pengujian.

Langkah awal melibatkan pemisahan kompresor sentrifugal dari turbin gas, yang sebelumnya terpasang pada satu poros. Komponen *turbocharger* yang digunakan meliputi rumah spiral (*volute*), kompresor sentrifugal sebagai turbin, dan porosnya. Dalam konfigurasi CAT, saluran keluaran kompresor difungsikan sebagai saluran masuk air (*inlet*), sedangkan saluran masuk kompresor menjadi saluran keluaran air (*outlet*). Semua komponen dipasang pada rangka penyangga, dan ujung poros—yang semula terhubung ke turbin gas—diganti dengan puli untuk memungkinkan pengukuran torsi melalui sistem pengereman.

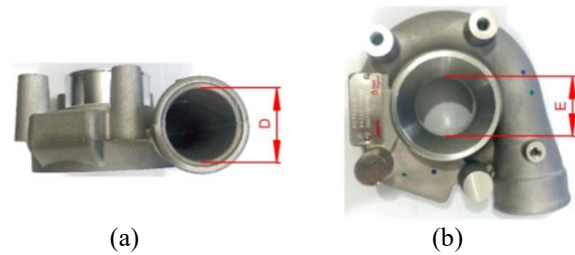
*Turbocharger* yang digunakan dalam studi ini adalah merek Garrett tipe PC500/PC400-6/TA4532. Tidak ada metode khusus dalam pemilihan spesifikasi, karena penelitian ini memanfaatkan sisi kompresor dari *turbocharger* yang tersedia secara komersial. Parameter dimensi yang diukur pada kompresor sebagai turbin mencakup diameter inducer (A), diameter *exducer* (B), dan tinggi sudu (*blade*) (C), sebagaimana ditampilkan pada Gambar 1.



Gambar 1. *Runner* turbin: (a) tampak atas dan (b) tampak samping.

Selain itu, dimensi penting pada rumah spiral yang diukur meliputi diameter

*inlet* (D) dan diameter *outlet* (E), seperti ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. *Volute* turbin: (a) sisi *inlet* dan (b) sisi *outlet*.

Prinsip dasar pemanfaatan rumah spiral kompresor sebagai turbin adalah dengan membalik fungsi saluran masuk dan keluar. Pendekatan ini didasarkan pada kesamaan geometris antara *volute* kompresor dan turbin Francis, sehingga prinsip operasional CAT diadaptasi dari turbin Francis. Dimensi detail *turbocharger* Garrett yang digunakan dalam penelitian ini ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Dimensi *turbocharger* Garrett sebagai CAT

Tipe	Dimensi (mm)				
	A	B	C	D	E
PC500/PC400-6/TA4532	60,6	84	32	58,5	77,2

A = diameter inducer, B = diameter *exducer*, C = tinggi sudu, D = diameter *inlet*, E = diameter *outlet*.

## 2.2 Metode Eksperimen

Penelitian ini dilakukan dengan pendekatan eksperimental yang melibatkan tiga jenis variabel. Variabel bebas dalam studi ini adalah ketinggian head air, yang divariasikan pada tiga tingkat: 8 meter, 10 meter, dan 12 meter. Variabel terikat mencakup parameter performa dari *Compressor as Turbine* (CAT), yaitu kecepatan rotasi (N), daya potensial air (Pp), torsi (Tt), daya keluaran turbin (Pt), serta efisiensi ( $\eta$ ). Sementara itu, variabel terkontrol adalah tipe CAT yang digunakan selama pengujian.

Beberapa instrumen utama digunakan untuk pengambilan data. Tachometer digunakan untuk mengukur kecepatan rotasi poros. Timbangan gantung (*hanging scale*) dimanfaatkan untuk mengukur beban pada pengujian torsi melalui mekanisme *rope brake dynamometer* [21]. Tekanan air dalam pipa dicatat menggunakan *pressure gauge*. Debit

aliran air dihitung dengan bantuan *weirmeter* berbentuk V-notch  $90^\circ$ , sedangkan tinggi muka air pada *weir* diukur menggunakan *hook gauge*.



(a)



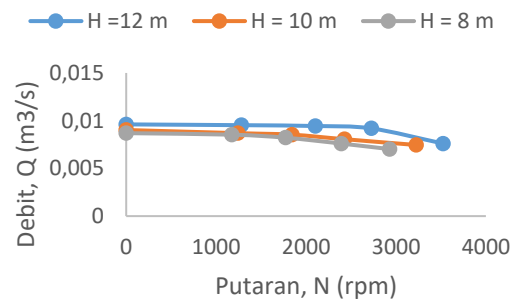
(b)

Gambar 3. a) *Test rig* CAT dan b) mekanisme *rope brake dynamometer* CAT

Eksperimen ini dilaksanakan di Laboratorium Dinamika Fluida, Departemen Teknik Mesin, Universitas Andalas, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3a. Rangkaian uji (*test rig*) terdiri dari sistem sirkulasi air yang mencakup tangki bawah, pompa, pipa utama, serta pipa *bypass* sebagai fitur pengaman. Tekanan fluida diukur menggunakan *pressure gauge* yang dipasang pada pipa sebelum masuk ke inlet CAT. Air kemudian menggerakkan unit CAT yang terhubung ke sistem *rope brake dynamometer* untuk pengukuran torsi (Gambar 3b), sebelum dialirkan menuju tangki atas melalui pipa hisap (*draft tube*). Tangki atas dilengkapi dengan *weirmeter* berbentuk V-notch  $90^\circ$  dan *hook gauge* untuk mengukur debit aliran. Setelah itu, air dikembalikan ke tangki bawah dan disirkulasikan kembali oleh pompa selama proses pengujian berlangsung.

### 3. Hasil dan Pembahasan

#### 3.1 Debit (Q) terhadap Pengaruh Kecepatan Putar (N)



Gambar 4. Debit (Q) terhadap pengaruh kecepatan putar (N)

Grafik pada Gambar 4 menunjukkan hubungan antara debit air ((Q), dalam  $m^3/s$ ) dengan kecepatan putar turbin ((N), dalam rpm) pada tiga kondisi tinggi jatuh air (head, (H)) yang berbeda, yaitu 8 m, 10 m, dan 12 m. Data ini memberikan wawasan penting mengenai performa hidrolis sistem turbin dalam berbagai kondisi head, yang secara langsung memengaruhi kapasitas aliran dan efisiensi konversi energi.

Secara umum, terlihat bahwa nilai debit menurun seiring peningkatan kecepatan putar (N) untuk semua variasi head. Fenomena ini dapat dijelaskan melalui prinsip konservasi energi fluida. Ketika kecepatan putar turbin meningkat, gaya sentrifugal dan turbulensi dalam saluran aliran meningkat pula, menyebabkan sebagian energi fluida berubah menjadi kehilangan energi (*head loss*) akibat gesekan dan turbulensi. Akibatnya, debit efektif yang melewati turbin berkurang.

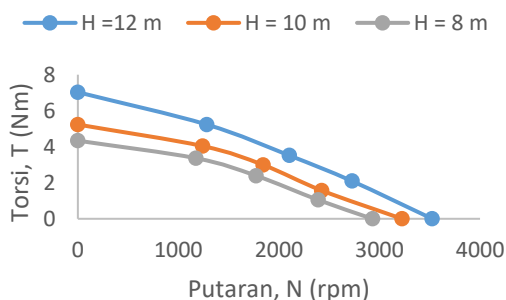
Untuk setiap nilai (N), debit terbesar selalu terjadi pada head tertinggi (H = 12 m). Hal ini konsisten dengan teori dasar hidraulika, di mana peningkatan head menghasilkan peningkatan energi potensial air yang masuk ke turbin, sehingga mendorong laju aliran lebih besar. Dengan demikian, kurva biru (H = 12 m) selalu berada di atas kurva lainnya. Perbedaan debit antara H = 12 m dan H = 8 m cukup signifikan, menunjukkan sensitivitas sistem terhadap perubahan head.

Pada rentang putaran rendah (0–1500 rpm), perubahan debit relatif kecil, yang menunjukkan bahwa sistem masih bekerja pada zona stabil, di mana peningkatan kecepatan putar belum cukup untuk menimbulkan kehilangan energi besar. Namun, setelah melebihi sekitar 2000 rpm, tren penurunan debit menjadi lebih nyata. Titik ini dapat diinterpretasikan sebagai awal terjadinya penurunan efisiensi hidraulik akibat pembentukan vorteks dan peningkatan gaya gesek fluida terhadap dinding saluran.

Pada kecepatan tertinggi (sekitar 3500 rpm), ketiga kurva menunjukkan penurunan tajam, terutama untuk  $H = 12$  m. Hal ini dapat menunjukkan bahwa sistem telah mencapai batas operasi optimal, di mana peningkatan putaran tidak lagi meningkatkan kinerja, melainkan menimbulkan kavitasi dan gangguan aliran. Dalam konteks desain turbin, fenomena ini menandakan perlunya menjaga operasi dalam rentang putaran optimum untuk menghindari kerugian energi dan potensi kerusakan mekanis.

Secara keseluruhan, hasil ini menegaskan bahwa head memiliki pengaruh positif langsung terhadap debit, sementara kecepatan putar memiliki pengaruh negatif setelah melewati ambang tertentu. Analisis ini sangat penting dalam optimasi desain turbin air, terutama untuk sistem mikrohidro, di mana keseimbangan antara head, debit, dan putaran menentukan efisiensi total konversi energi.

### 3.2 Torsi (T) terhadap Pengaruh Kecepatan Putar (N)



Gambar 5. Torsi (T) terhadap pengaruh kecepatan putar (N)

Grafik pada Gambar 5 memperlihatkan hubungan antara torsi turbin air ((T), dalam Nm) terhadap kecepatan putar ((N), dalam rpm) pada tiga kondisi head yang berbeda, yaitu ( $H = 8$ ) m, ( $H = 10$ ) m, dan ( $H = 12$ ) m. Secara umum, grafik menunjukkan pola penurunan torsi yang konsisten seiring meningkatnya kecepatan putar pada seluruh kondisi head. Pola ini mencerminkan karakteristik umum turbin air, di mana peningkatan kecepatan rotasi menyebabkan penurunan gaya reaksi fluida terhadap sudu turbin akibat berkurangnya momentum aliran yang efektif.

Pada kecepatan awal (sekitar 0–500 rpm), nilai torsi tertinggi dicapai, yaitu sekitar 7 Nm untuk ( $H = 12$ ) m, 5 Nm untuk ( $H = 10$ ) m, dan 4 Nm untuk ( $H = 8$ ) m. Nilai-nilai ini menunjukkan bahwa torsi berbanding lurus dengan tinggi head. Hal ini sesuai dengan teori energi potensial fluida, di mana semakin besar head berarti semakin besar energi yang tersedia untuk menggerakkan turbin. Energi potensial yang tinggi menghasilkan gaya impak fluida lebih besar terhadap sudu, sehingga menghasilkan torsi yang lebih tinggi.

Ketika kecepatan putar meningkat hingga sekitar 2000 rpm, penurunan torsi mulai terlihat signifikan. Fenomena ini terjadi karena pada putaran tinggi, kecepatan relatif antara fluida dan sudu berkurang, sehingga efisiensi transfer momentum fluida ke poros menurun. Selain itu, sebagian energi kinetik fluida berubah menjadi energi turbulensi dan mengalami kerugian head (*head loss*), yang mengurangi kemampuan fluida untuk memberikan gaya dorong optimal.

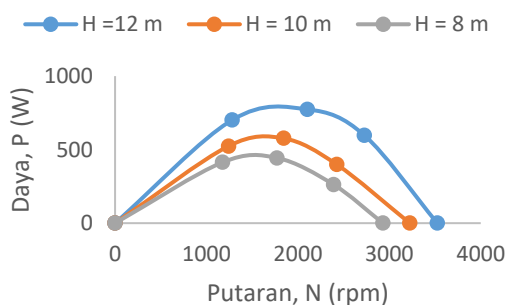
Pada kecepatan maksimum (sekitar 3000–3500 rpm), nilai torsi mendekati nol pada semua variasi head. Kondisi ini menandakan titik tanpa beban (*no-load condition*), di mana kecepatan rotasi telah melampaui kemampuan fluida untuk memberikan gaya putar efektif. Secara praktis, titik ini merupakan batas operasi turbin, di mana peningkatan kecepatan tidak lagi menghasilkan daya tambahan, melainkan dapat menimbulkan kavitasi,

getaran, dan keausan mekanis pada sistem turbin.

Jika dibandingkan antar head, kurva menunjukkan bahwa peningkatan head tidak hanya menaikkan torsi maksimum, tetapi juga memperluas rentang kecepatan operasi yang efektif. Hal ini mengindikasikan bahwa turbin dengan head lebih tinggi memiliki kinerja hidrodinamis lebih stabil dan mampu mempertahankan torsi lebih besar pada berbagai kecepatan rotasi.

Secara keseluruhan, grafik ini menunjukkan bahwa hubungan antara torsi dan kecepatan putar bersifat negatif dan nonlinier, serta dipengaruhi kuat oleh tinggi head. Pemahaman terhadap hubungan ini penting dalam desain turbin air untuk menentukan titik kerja optimum—yakni kombinasi antara torsi dan kecepatan yang menghasilkan daya maksimum.

### 3.3 Daya Turbin (P<sub>t</sub>) terhadap Pengaruh Kecepatan Putar (N)



Gambar 6. Daya keluaran turbin (P<sub>t</sub>) terhadap pengaruh kecepatan putar (N)

Gambar 6 memperlihatkan hubungan antara daya turbin air ((P), dalam Watt) terhadap kecepatan putar ((N), dalam rpm) untuk tiga variasi tinggi jatuh air, yaitu (H = 8) m, (H = 10) m, dan (H = 12) m. Secara umum, ketiga kurva memperlihatkan pola berbentuk parabola terbalik, yang menggambarkan peningkatan daya hingga titik maksimum pada kecepatan optimum, kemudian menurun secara signifikan pada kecepatan yang lebih tinggi. Pola ini merupakan karakteristik khas sistem turbin air, di mana daya keluaran bergantung pada kombinasi optimal antara torsi dan kecepatan putar.

Pada kecepatan rendah (di bawah 1000 rpm), daya masih relatif kecil karena

meskipun torsi tinggi, kecepatan sudut belum cukup besar untuk menghasilkan daya signifikan. Hal ini sesuai dengan persamaan dasar daya mekanik, ( $P = T \cdot \omega$ ), di mana  $\omega$  adalah kecepatan sudut (rad/s). Ketika kecepatan meningkat, terjadi peningkatan simultan antara torsi efektif dan kecepatan rotasi hingga mencapai titik optimum — sekitar 1500–2000 rpm tergantung pada kondisi head. Pada titik ini, sistem mencapai daya maksimum (P<sub>max</sub>) yang masing-masing sekitar 780 W untuk (H = 12) m, 580 W untuk (H = 10) m, dan 450 W untuk (H = 8) m. Nilai-nilai ini menunjukkan bahwa daya berbanding lurus dengan tinggi head, yang konsisten dengan hukum Bernoulli dan prinsip energi potensial fluida: semakin besar head, semakin besar energi potensial air yang dikonversi menjadi energi mekanik.

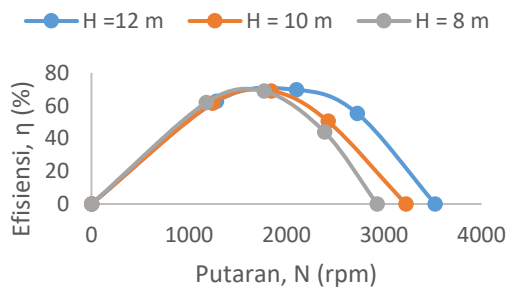
Setelah melewati titik optimum, daya menurun secara bertahap hingga mendekati nol pada kecepatan sekitar 3000–3500 rpm. Penurunan ini terjadi karena torsi menurun lebih cepat daripada kenaikan kecepatan sudut, seperti yang ditunjukkan pada grafik torsi sebelumnya. Pada fase ini, fluida tidak lagi memberikan impuls yang efektif terhadap sudu turbin; sebagian energi berubah menjadi energi turbulensi dan gesekan internal, sehingga efisiensi sistem menurun tajam. Fenomena ini menandai batas operasi maksimum turbin (*runaway speed*), di mana peningkatan kecepatan justru mengakibatkan daya keluaran menurun.

Selain itu, grafik memperlihatkan bahwa peningkatan head tidak hanya meningkatkan puncak daya, tetapi juga memperluas rentang kecepatan di mana daya relatif tinggi dapat dipertahankan. Hal ini menunjukkan bahwa turbin dengan head lebih tinggi memiliki performa dinamis yang lebih stabil, mampu menghasilkan daya besar dalam rentang operasi yang lebih lebar.

Secara keseluruhan, hubungan antara daya dan kecepatan putar bersifat nonlinier dan bergantung kuat pada head. Hasil ini menegaskan pentingnya penentuan

kecepatan operasi optimum untuk memaksimalkan efisiensi sistem. Dalam konteks aplikasi mikrohidro, titik puncak dari masing-masing kurva dapat digunakan sebagai acuan untuk menentukan kecepatan nominal turbin, sehingga daya yang dihasilkan mendekati maksimum dengan efisiensi konversi energi tertinggi.

### 3.4 Efisiensi Turbin ( $\eta$ ) terhadap Pengaruh Kecepatan Putar (N)



Gambar 7. Efisiensi turbin ( $\eta$ ) terhadap pengaruh kecepatan putar (N)

Gambar 7 menunjukkan hubungan antara efisiensi turbin air ( $\eta$ ), dalam % terhadap kecepatan putar (N), dalam rpm untuk tiga variasi tinggi head, yaitu ( $H = 8$ ) m, ( $H = 10$ ) m, dan ( $H = 12$ ) m. Ketiga kurva menunjukkan pola berbentuk lonceng (*bell-shaped curve*), yang merupakan karakteristik umum dari turbin air dan mesin aliran fluida. Pola ini mengindikasikan bahwa efisiensi meningkat seiring bertambahnya kecepatan putar hingga mencapai nilai maksimum pada kecepatan optimum, kemudian menurun tajam pada kecepatan yang lebih tinggi.

Pada kecepatan awal (di bawah 1000 rpm), efisiensi relatif rendah, mendekati nol. Hal ini disebabkan oleh rendahnya energi kinetik fluida yang dikonversi menjadi kerja mekanik akibat kecepatan rotasi yang belum cukup untuk mengatasi kerugian mekanis seperti gesekan bantalan dan turbulensi awal. Seiring peningkatan kecepatan hingga sekitar 1500–1800 rpm, efisiensi meningkat signifikan karena terjadi keseimbangan antara gaya fluida dan kecepatan sudu turbin, yang memungkinkan transfer energi paling efektif. Pada titik ini, efisiensi maksimum tercapai, yaitu sekitar 70% untuk ( $H = 12$ ) m, 68% untuk ( $H = 10$ ) m, dan 67%

untuk ( $H = 8$ ) m. Perbedaan kecil di antara ketiganya menunjukkan bahwa variasi head berpengaruh terhadap magnitudo daya dan torsi, tetapi tidak terlalu signifikan terhadap pola efisiensi maksimum.

Setelah melewati titik optimum, efisiensi menurun secara bertahap hingga mendekati nol pada kecepatan sekitar 3000–3500 rpm. Fenomena ini terjadi karena pada kecepatan tinggi, sudu turbin bergerak lebih cepat daripada aliran fluida yang masuk, sehingga terjadi slip dan kehilangan energi akibat turbulensi serta kavitasi di sekitar sudu. Selain itu, peningkatan gesekan internal dan kehilangan energi hidrolis memperbesar kerugian sistem, menyebabkan efisiensi turun drastis.

Menariknya, kurva ( $H = 12$ ) m menunjukkan rentang efisiensi tinggi yang lebih lebar dibandingkan head lainnya. Hal ini menandakan bahwa turbin dengan head lebih tinggi lebih stabil terhadap variasi kecepatan putar, karena energi potensial fluida yang lebih besar mampu mempertahankan kinerja konversi energi yang baik meskipun terjadi fluktuasi putaran. Sebaliknya, pada ( $H = 8$ ) m, efisiensi menurun lebih cepat setelah melewati titik optimum, menandakan bahwa sistem dengan head rendah lebih sensitif terhadap perubahan kecepatan dan beban.

Secara keseluruhan, grafik ini menunjukkan bahwa efisiensi turbin sangat bergantung pada kecepatan operasi dan head. Bentuk kurva yang simetris mengindikasikan adanya kecepatan optimum yang harus dijaga untuk memperoleh performa maksimum. Dalam konteks desain dan operasi turbin mikrohidro, hasil ini penting untuk menentukan kecepatan nominal generator dan rasio transmisi mekanik agar sistem bekerja pada zona efisiensi tinggi. Dengan demikian, grafik ini menegaskan prinsip fundamental bahwa efisiensi tertinggi tercapai ketika kecepatan aliran fluida dan kecepatan sudu berada dalam kondisi kesetimbangan hidrodinamis yang ideal.

#### 4. Kesimpulan

Secara umum, head memiliki pengaruh positif terhadap peningkatan debit, torsi, dan daya, sementara peningkatan kecepatan putar cenderung memberikan efek sebaliknya setelah melewati titik optimum. Hal ini menegaskan bahwa sistem turbin bekerja paling efisien dalam rentang kecepatan tertentu yang menjaga keseimbangan antara energi potensial, kinetik, dan kehilangan energi fluida.

Pada grafik debit terhadap putaran, peningkatan  $N$  menyebabkan penurunan debit akibat meningkatnya kehilangan energi karena turbulensi dan gesekan. Namun, debit selalu lebih besar pada head tinggi ( $H = 12$  m), menegaskan bahwa energi potensial fluida berperan dominan dalam mengatur laju aliran. Fenomena serupa terlihat pada grafik torsi, di mana torsi awal tinggi berbanding lurus dengan head, tetapi menurun tajam setelah 2000 rpm karena penurunan momentum efektif fluida terhadap sudu.

Daya turbin menunjukkan pola parabola terbalik: meningkat seiring kenaikan  $N$  hingga mencapai puncak sekitar 1500–2000 rpm, kemudian menurun akibat berkurangnya torsi efektif. Hal tersebut sejalan dengan grafik efisiensi yang berbentuk lonceng, menggambarkan bahwa efisiensi tertinggi dicapai saat kecepatan fluida dan kecepatan sudu berada dalam kesetimbangan hidrodinamis ideal. Head tinggi menghasilkan daya maksimum lebih besar (hingga 780 W pada 12 m). Analisis efisiensi terhadap putaran menunjukkan kurva lonceng, dengan efisiensi maksimum pada 1500–2000 rpm. Head tinggi mempertahankan efisiensi lebih lama, sedangkan head rendah mengalami penurunan cepat pada putaran tinggi. Efisiensi maksimum tercatat 70% pada head 12 m.

Secara keseluruhan, hubungan keempat parameter tersebut memperlihatkan bahwa peningkatan head memperbesar performa total dan memperluas zona operasi efisien. Sebaliknya, kecepatan berlebih memicu kavitasi dan penurunan efisiensi.

#### Ucapan terimakasih

Penelitian ini dibiayai oleh UNIVERSITAS ANDALAS sesuai dengan Kontrak Penelitian Skema Penelitian Skripsi Sarjana Batch I Nomor: 355/UN16.19/PT.01.03/PSS/2025 Tahun Anggaran 2025

#### Referensi

- [1] Bazilian, M. et al. 2012. Energy access scenarios to 2030 for the power sector in sub-Saharan Africa. *Utilities Policy*, 20(1), 1–16.
- [2] Ismail, M.A. et al. 2014. End suction centrifugal pump operating in turbine mode for microhydro applications. *Advances in Mechanical Engineering*, 6.
- [3] Mishra, S. et al, 2011. Optimal installation of small hydropower plant—a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(8), 3862–3869.
- [4] Kaunda, C.S. et al, 2014. A technical discussion on microhydropower technology and its turbines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 35, 445–459.
- [5] Motwani, K. et al, 2013. Cost analysis of pump as turbine for pico hydropower plants – a case study. *Procedia Engineering*, 51, 721–726.
- [6] Kusakana, K., 2014. A survey of innovative technologies increasing the viability of micro hydropower as a cost effective rural electrification option in South Africa. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 37, 370–379.
- [7] Arriaga, M., 2010. Pump as turbine – a pico hydro alternative in Lao People's Democratic Republic. *Renewable Energy*, 35, 1109–1115.
- [8] Maher, P. et al, 2003. Assessment of pico hydro as an option for off grid electrification in Kenya. *Renewable Energy*, 28, 1357–1369.
- [9] Jain, S.V. and Patel, R.N., 2014. Investigations on pump running in turbine mode: a review of the state of

- the art. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 30, 841–868.
- [10] Derakhshan, S. and Nourbakhsh, A., 2008. Theoretical, numerical and experimental investigation of centrifugal pumps in reverse operation. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 32, 1620–1627.
- [11] Fernandez, J. et al, 2004. Performance of a centrifugal pump running in inverse mode. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 218, 265–271.
- [12] Derakhshan, S. and Nourbakhsh, A., 2008. Experimental study of characteristic curves of centrifugal pumps working as turbines in different specific speeds. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 32(3), 800–807.
- [13] Yang, S.S. et al, 2012. Theoretical, numerical and experimental prediction of pump as turbine performance. *Renewable Energy*, 48, 507–513.
- [14] Binama, M. et al, 2017. Investigation on pump as turbine (PAT) technical aspects for micro hydropower schemes: A state of the art review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 79, 148–179.
- [15] Bachtiar, A.N. et al, 2019. Performance on Compressor as Turbine (CAT) Pico Hydro Scale. *International Journal of Renewable Energy Research*, 9(4), 2073–2081.
- [16] Bachtiar, A.N. et al, 2020. Effect of Head Variations on Performance of Four Sizes of Blowers as Turbines (BAT). *International Journal of Renewable Energy Research*, 10(1), 343–353.
- [17] Bachtiar, A.N. et al, 2021. Effect of Geometric Differences in Impeller Blades on Performance of Blower-As-Turbine (BAT) on Pico-Hydro Scale. *International Journal of Renewable Energy Research*, 11(3), 1124–1135.
- [18] Bachtiar, A.N. et al, 2019. Performance of a Centrifugal Pump as a Pico Hydro Scale Turbine. *Advances in Applied Sciences*, 4(4), 88–96.
- [19] Bachtiar, A.N. et al, 2021. Performance of Water Wheel Knock Down System (W2KDS) for Rice Milling Drive. *International Journal on Advanced Science, Engineering and Information*, 8, 117–126.
- [20] Dinata, U.G.S. et al, 2023. Analysis of a Portable Generator Turbine for Small and Medium Industry by Using a Business Model Approach. *Quality – Access to Success*, 25(200), 274–280.
- [21] Alfath, M.R.R. dan Adiwidodo, S., 2023. Pengaruh perubahan sudut sirip tepi (tip fin) terhadap kinerja turbin ulir. *TURBO*, 12 (2), 239-245.