

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kebutuhan manusia akan energi telah menjadi hal yang tidak dapat disanggah lagi karena energi merupakan elemen penting bagi kemajuan ekonomi dan sosial di berbagai negara. Menyediakan layanan energi yang dapat diandalkan, aman, dan terjangkau sangat penting untuk mengatasi banyak tantangan pembangunan global saat ini [1]. Di antara berbagai bentuk energi, listrik sangat penting bagi negara-negara berkembang karena mereka berupaya mencapai swasembada di berbagai sektor. Sebagai sumber energi sekunder, listrik dihasilkan dengan mengubah sumber energi primer seperti bahan bakar fosil, energi nuklir, atau energi terbarukan [2]. Bahan bakar fosil secara historis menjadi sumber utama energi listrik yang menyumbang 80% produksi listrik dalam beberapa tahun terakhir. Namun, karena penipisannya yang cepat dan pencemaran lingkungan yang diakibatkannya, banyak perusahaan pemakai listrik telah beralih ke sumber energi terbarukan [3].

Dalam hal ketenagalistrikan, pembangkit listrik tenaga air merupakan penyumbang energi terbarukan yang paling signifikan terhadap sumber pasokan energi primer. Energi ini menyumbang sekitar 14,3% dari seluruh energi terbarukan yang diproduksi secara global dan tetap menjadi sumber energi terbarukan yang paling penting [4]. Pembangkit listrik tenaga air yang besar memasok listrik ke jaringan listrik nasional, namun bagi masyarakat pedesaan, pembangkit listrik tenaga mikro hidro (PLTMh) dan pembangkit listrik tenaga piko hidro (PLTPh) *off-grid* adalah solusi elektrifikasi yang paling umum. Pembangkit ini biasanya menyediakan daya berkisar antara 5 hingga 100 kW, biasanya menggunakan sistem *run-of-the-river* untuk mengalihkan sebagian air dari sungai atau irigasi ke *penstock* bertekanan [5].

Sistem PLTMh dan PLTPh pada umumnya terdiri dari peralatan elektromekanis, struktur sipil, dan sistem distribusi energi [6], dengan turbin sebagai komponen teknologi utamanya [7]. Secara historis, instalasi PLTMh dan

PLTPh tidak mahal untuk dioperasikan namun mahal untuk dibangun. Salah satu hambatan dalam pengembangan pembangkit listrik hidro skala kecil (*small-scale hydropower plants*), terutama pikohidro, adalah pengadaan komponen penggerak mula atau turbin yang tidak mudah. Masyarakat harus memesan terlebih dahulu dimana harga per satuan turbin menjadi sangat mahal karena bertambahnya anggaran survey dan perencanaan. Akibatnya, investasi pembangkit pikohidro menjadi sangat mahal yaitu sekitar 5.000 US\$/kW [32]. Namun, hambatan ini berubah karena perkembangan peralatan turbin berkecepatan tinggi yang lebih kecil, ringan, dan lebih efisien [8]. Turbin, bersama dengan generator listrik, merupakan komponen penting dalam sebuah sistem pembangkit listrik, maka penting untuk mengupayakan efisiensi tertinggi untuk komponen-komponen ini tanpa melebihi anggaran [9].

Pendekatan penghematan biaya adalah dengan menggunakan unit pompa standar sebagai alternatif turbin konvensional [10-13]. Pompa diproduksi secara massal, sehingga menawarkan beberapa keunggulan bagi pembangkit listrik tenaga mikro dan piko hidro dibandingkan dengan turbin yang dibuat khusus, termasuk ketersediaan dalam berbagai ukuran standar untuk head dan aliran yang berbeda [10-12], waktu pengiriman yang singkat [12-16], masa pakai yang lama [13-17], pemasangan yang mudah, dan suku cadang yang mudah didapat seperti sebagai segel dan bantalan [12-16].

Pompa sebagai turbin (*pump as turbine/PAT*) pertama dipasang di sebuah peternakan terpencil di Yorkshire Dales, Inggris Utara pada tahun 1930. Setelah masa pengujian lima tahun yang sukses dan keandalannya dipastikan, skema ini kemudian diadopsi di negara lain [12]. Sejak itu, karakteristik PAT menjadi topik populer di kalangan peneliti dan insinyur lapangan. Teknologi ini telah banyak digunakan, terutama untuk menyediakan listrik di daerah terpencil dan berbukit-bukit yang tidak terhubung dengan jaringan listrik pusat [18-22].

Penggunaan *blower as turbine* (BAT) merupakan kategori lain dari pemanfaatan ulang (*repurposing*) mesin fluida, khususnya untuk sistem pikohidro, karena biaya yang rendah dan ketersediaannya yang luas di pasaran. Pada sistem BAT, blower sentrifugal yang pada awalnya dirancang untuk menambahkan energi pada aliran udara dioperasikan secara terbalik, sehingga aliran air dapat

memutar impelernya sebagai runner turbin dan menghasilkan daya keluaran. Penelitian eksperimental menunjukkan bahwa kinerja BAT sangat dipengaruhi oleh parameter seperti variasi *head*, geometri impeler, dan debit aliran, dengan kecenderungan efisiensi yang sebanding dengan turbin skala kecil lainnya [23–24]. Unit BAT memiliki sejumlah keunggulan, antara lain konstruksi yang sederhana, kemudahan perawatan, serta kesesuaian untuk kondisi *head* rendah. Penerapan BAT sebagai produk turbin generator portabel dalam bentuk *water genset* yang kompak telah dianalisis potensi pasarnya [25]. Meskipun hasil tersebut cukup menjanjikan, penelitian lebih lanjut masih diperlukan untuk mengoptimalkan konfigurasi desain serta memperluas basis data kinerja pada rentang kondisi operasi yang lebih beragam.

Selain itu, kompresor yang terhubung dan digerakkan oleh turbocharger, yang memanfaatkan energi termal gas buang, juga memiliki potensi untuk diaplikasikan sebagai turbin hidraulik skala kecil [26–27]. Kompresor turbocharger yang dimanfaatkan kembali sebagai turbin air diperkirakan mampu menghasilkan daya keluaran dengan efisiensi tinggi berkat desainnya yang presisi. Kompresor dipilih sebagai turbin pada konsep *compressor as turbine* (CAT) karena biayanya relatif rendah dan mudah diperoleh di pasaran dibandingkan dengan turbin konvensional yang lebih mahal. Penelitian sebelumnya oleh Bachtiar *et al.* telah menunjukkan bahwa kompresor turbocharger dapat dioperasikan sebagai turbin, atau *compressor-as-turbine*, yang diuji pada kondisi *head* konstan melalui pengujian lapangan [26]. Pengujian sebuah CAT dengan variasi *head* telah dilakukan di laboratorium [27]. Namun demikian, penelitian-penelitian tersebut masih terbatas pada jumlah unit yang diuji, terutama ketika kompresor berasal dari keluarga (kelompok) produk turbocharger yang sama dengan merek dagang yang identik. Dalam praktiknya, data mengenai kinerja daya dan efisiensi masih sangat terbatas untuk dijadikan acuan dalam memilih berbagai jenis kompresor sebagai unit *Compressor as Turbine* (CAT), padahal kinerjanya sangat dipengaruhi oleh ukuran runner dan rumah spiral (*casing*), desain sudu, *head* (*head*), debit aliran, serta kecepatan putar. Selain itu, perilaku operasi komparatif dan karakteristik daya-efisiensi yang bergantung pada variasi *head* pada beberapa mesin turbodinamik yang hampir identik dalam satu keluarga produk masih belum

banyak dikaji. Hingga saat ini, belum terdapat penelitian yang menginvestigasi karakteristik beberapa kompresor sentrifugal yang memiliki kemiripan geometri untuk diaplikasikan sebagai turbin air. Oleh karena itu, penelitian ini difokuskan pada pemanfaatan kompresor-kompresor tersebut, yang berasal dari keluarga produk dan merek yang sama, untuk digunakan sebagai CAT.

Kebaruan penelitian ini terletak pada pendekatan komparatif terhadap beberapa kompresor turbocharger seri PC yang memiliki karakteristik hampir serupa dan dioperasikan sebagai turbin, dengan tujuan menghasilkan peta kinerja (*performance maps*) untuk aplikasi pembangkit listrik tenaga air skala pico. Oleh sebab itu, penelitian orisinal ini bertujuan untuk menyelidiki secara eksperimental kinerja daya dan efisiensi enam model CAT yang berasal dari kompresor turbocharger Garrett seri PC berbiaya rendah, yang menggunakan impeler enam sudu dengan kesamaan geometri di dalam rumah spiral (*spiral casing*), pada variasi head (*head*) sebesar 6, 8, 10, dan 12 m. Selain itu, penelitian ini secara khusus menyajikan grafik empat parameter untuk analisis kinerja terbaik dengan mempertimbangkan hubungan antara *head*, debit, kecepatan putar, daya keluaran, dan efisiensi. Peta kinerja yang dihasilkan diharapkan dapat menjadi acuan praktis dalam memilih turbin hidro skala pico yang paling sesuai berdasarkan kondisi head dan debit yang tersedia di lokasi pemasangan, sehingga mampu menghasilkan kecepatan putar optimum dan daya serta titik operasi dengan efisiensi maksimum (Best Efficiency Point/BEP).

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian latar belakang dan kesenjangan penelitian yang telah dipaparkan, maka permasalahan umum yang hendak dijawab dalam penelitian ini adalah bagaimana karakteristik mekanik (*mechanical performance*) Compressor as Turbine (CAT) yang dikembangkan dari keluarga kompresor turbocharger pada berbagai kondisi operasi. Selanjutnya, rumusan masalah khusus dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Bagaimana karakteristik performa berbagai tipe Compressor as Turbine (CAT) yang berasal dari keluarga kompresor turbocharger yang sama?
2. Bagaimana karakteristik pengaruh variasi head operasi terhadap putaran, torsi, daya keluaran, dan efisiensi CAT?

3. Bagaimana karakteristik pengaruh variasi unit CAT terhadap titik operasi dengan efisiensi maksimum masing-masing CAT?
4. Bagaimana karakteristik performa CAT direpresentasikan melalui grafik 4 parameter (4-parameter charts) berdasarkan kombinasi parameter operasi yang digunakan?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan Umum:

Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji secara eksperimental karakteristik mekanik (*mechanical performance*) *Compressor as Turbine* (CAT) yang dikembangkan dari keluarga kompresor turbocharger pada berbagai kondisi operasi sebagai alternatif turbin berbiaya rendah untuk pembangkit listrik tenaga pikohidro.

Tujuan Khusus:

1. Menghasilkan karakteristik performa berbagai tipe *Compressor as Turbine* (CAT) yang berasal dari keluarga kompresor turbocharger yang sama.
2. Menghasilkan karakteristik pengaruh variasi head operasi terhadap putaran, torsi, daya keluaran, dan efisiensi CAT.
3. Menghasilkan karakteristik pengaruh variasi unit CAT terhadap titik operasi dengan efisiensi maksimum masing-masing CAT.
4. Membuat karakteristik grafik 4 parameter (*4-parameter charts*) yang merepresentasikan karakteristik operasi CAT berdasarkan kombinasi parameter performa yang diperoleh dari hasil pengujian eksperimental.

1.4 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan memberikan manfaat secara teoretis maupun praktis sebagai berikut.

Manfaat Teoretis:

1. Memperkaya khasanah ilmu pengetahuan di bidang mesin fluida, khususnya mengenai karakteristik performa *Compressor as Turbine* (CAT) yang dikembangkan dari keluarga kompresor turbocharger.
2. Menyediakan basis data eksperimental mengenai karakteristik performa berbagai tipe CAT pada berbagai kondisi operasi yang dapat menjadi referensi bagi penelitian lanjutan maupun pengembangan teknologi CAT.

Manfaat Praktis:

1. Menghasilkan peta karakteristik performa (*performance map*) CAT yang dapat dijadikan acuan dalam pemilihan tipe CAT sesuai dengan kondisi head dan debit operasi sehingga mendukung pencapaian kinerja pembangkit listrik tenaga pikohidro yang lebih optimal.
2. Memberikan alternatif teknis dalam pemilihan turbin untuk sistem pembangkit listrik tenaga pikohidro melalui pemanfaatan kompresor turbocharger sebagai turbin air.
3. Mendorong pemanfaatan kembali (*repurposing*) kompresor turbocharger sebagai *Compressor as Turbine* (CAT) yang menawarkan biaya pengadaan relatif rendah, kemudahan instalasi, dan potensi peningkatan akses terhadap teknologi pembangkit listrik tenaga pikohidro, terutama di wilayah terpencil.

1.5 Batasan Penelitian

Untuk menjaga agar penelitian tetap terarah dan sesuai dengan rumusan masalah yang telah ditetapkan, maka ruang lingkup penelitian ini dibatasi sebagai berikut.

1. Penelitian ini merupakan penelitian eksperimental yang dilaksanakan pada kondisi laboratorium yang terkendali sehingga seluruh variabel pengujian dapat dikendalikan secara sistematis.
2. Objek penelitian dibatasi pada kompresor turbocharger yang telah disesuaikan (*adjusted*) menjadi *Compressor as Turbine* (CAT).
3. Setiap CAT diuji menggunakan casing (*volute*) asli yang sesuai dengan serinya sehingga pengaruh perubahan geometri casing tidak menjadi variabel penelitian.
4. Analisis rugi-rugi aliran (*flow losses*) pada sistem perpipaan tidak dikaji secara khusus karena penelitian difokuskan pada evaluasi karakteristik performa CAT, sedangkan konfigurasi sistem perpipaan dipertahankan tetap pada seluruh pengujian sehingga pengaruhnya dianggap konstan.
5. Perancangan maupun optimasi *draft tube* tidak dibahas karena penelitian difokuskan pada karakteristik performa CAT tanpa modifikasi komponen hidraulik tambahan.

6. Kinerja CAT yang dievaluasi dibatasi pada aspek *mechanical performance*, yaitu putaran poros, torsi, daya keluaran, dan efisiensi turbin.
7. Fluida kerja yang digunakan selama pengujian adalah air pada kondisi laboratorium, sehingga pengaruh perubahan sifat fluida akibat variasi temperatur tidak menjadi objek penelitian.
8. Penelitian ini tidak mencakup analisis numerik maupun simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD), tetapi berfokus pada pengujian eksperimental.

1.6 Kebaruan Penelitian

Kebaruan (novelty) penelitian ini terletak pada aspek objek penelitian, pendekatan eksperimen, serta kontribusi ilmiah yang dihasilkan. Berbeda dengan penelitian-penelitian sebelumnya yang umumnya hanya mengevaluasi satu jenis atau satu ukuran Compressor as Turbine (CAT), penelitian ini melakukan kajian karakteristik beberapa tipe CAT yang berasal dari keluarga kompresor turbocharger yang sama melalui pengujian eksperimental pada berbagai variasi head dalam kondisi laboratorium yang terkendali.

Kontribusi ilmiah penelitian ini adalah penyusunan performa mekanik karakteristik pengaruh variasi head beberapa tipe CAT terhadap putaran, torsi, daya keluaran, efisiensi, dan titik operasi dengan efisiensi maksimum (BEP), sehingga menghasilkan basis data performa yang dapat digunakan sebagai acuan dalam pemilihan CAT sesuai dengan kondisi operasi ketersediaan head dan debit pada pembangkit listrik tenaga pikohidro.

Selain itu, penelitian ini mengembangkan representasi karakteristik performa CAT menggunakan pendekatan grafik empat parameter (4-parameter charts) untuk memvisualisasikan hubungan antarparameter operasi secara lebih komprehensif. Pendekatan ini memberikan informasi yang lebih sistematis mengenai perilaku operasi CAT sehingga dapat mendukung proses seleksi dan pengembangan CAT pada penelitian maupun aplikasi selanjutnya.

1.7 Sistematika Penulisan

Penulisan laporan disertasi ini disusun dalam beberapa bab. Bab 1 Pendahuluan yang mencakup latar belakang, rumusan masalah, tujuan penelitian, manfaat

penelitian, batasan masalah, kebaruan, dan sistematika penulisan. Bab 2 Tinjauan Pustaka yang mereview turbin air, kompresor sentrifugal, penelitian terdahulu tentang PAT, BAT, dan CAT, serta karakterisasi turbin pada pengujian sistem pengereman. Bab 3 Metodologi menjelaskan langkah-langkah dalam menyelesaikan penelitian ini seperti tahapan penelitian, instalasi pengujian, variabel penelitian, instrumen, prosedur pengujian, dan perhitungan. Bab 4 Hasil dan Pembahasan menguraikan hasil dan pembahasan yang telah dicapai dalam penelitian. Bab 5 Penutup berisi kesimpulan pernyataan-pernyataan penting terkait jawaban dari tujuan penelitian dan saran yang dibutuhkan untuk penelitian lebih lanjut. Lampiran ditambahkan untuk melengkapi data, informasi pendukung penelitian, dan luaran penelitian yang telah dihasilkan.

