

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Turbin air adalah unsur utama dalam sistem pembangkit listrik tenaga hidro yang berperan mengubah energi potensial serta kinetik air menjadi energi mekanik berupa rotasi poros, yang kemudian disalurkan ke generator untuk menghasilkan listrik. Kinerja turbin sangat memengaruhi efisiensi konversi energi, karena prosesnya bergantung pada interaksi antara aliran air dan bilah turbin yang memutar runner. Efisiensi ini dipengaruhi oleh beberapa faktor, antara lain desain turbin, jumlah dan bentuk bilah, kondisi aliran fluida, serta susunan komponen mekanis. Bila desain tidak sesuai dengan karakteristik aliran, akan terjadi kehilangan energi. Karena itu, pengembangan dan optimasi desain turbin, khususnya pada aspek teknis seperti variasi jumlah bilah, perlu dilakukan untuk meningkatkan performa turbin dan mendukung pemanfaatan energi terbarukan yang lebih efisien. Pola aliran fluida di dalam bucket turbin Pelton memiliki pengaruh langsung terhadap karakteristik konversi energi yang dihasilkan. Proses perubahan pola aliran dari saat jet masuk hingga keluar dari bucket menentukan besarnya energi efektif yang dapat dimanfaatkan, di mana kondisi optimal terjadi ketika aliran air tegak lurus terhadap bucket sehingga menghasilkan konversi energi yang paling efisien (Zhao, Zhu, et al., 2023a).

Energi air sebagai sumber energi terbarukan menawarkan keunggulan berupa pasokan yang cukup stabil, tingkat konversi yang tinggi, serta biaya operasional yang lebih murah bila dibandingkan dengan energi konvensional. Pemanfaatan potensinya didasarkan pada perbedaan tinggi air atau aliran fluida yang bergerak, yang selanjutnya diubah menjadi energi mekanik melalui turbin air. Rotasi turbin tersebut kemudian menggerakkan generator untuk memproduksi listrik. Sistem ini telah diterapkan dalam berbagai skala, mulai dari pembangkit listrik berkapasitas besar hingga mikrohidro di wilayah terpencil. Namun, performa sistem sangat dipengaruhi oleh efisiensi turbin, yang ditentukan oleh desain dan karakteristik alirannya. Oleh karena itu, diperlukan pengembangan serta optimasi desain turbin guna meningkatkan efisiensi konversi energi dan kinerja pembangkit tenaga air. Turbin Pelton termasuk tipe turbin dengan efisiensi tinggi dan sering dipakai dalam pembangkit listrik tenaga air, terutama pada situasi head tinggi dan aliran rendah. Efisiensi turbin dapat ditingkatkan dengan mengoptimalkan bentuk bucket menggunakan teknik numerik seperti *Computational Fluid Dynamics*

(CFD) serta algoritma optimasi, yang dapat memperbaiki konversi energi secara lebih efektif. Lebih jauh, hubungan antara aliran jet air dan profil bucket menjadi elemen kunci yang menentukan distribusi tekanan, torsi, serta efisiensi keseluruhan turbin (Barragan et al., 2025).

Kebutuhan energi listrik di dunia terus naik seiring bertambahnya penduduk, berkembangnya sektor industri, dan inovasi teknologi di berbagai bidang. Peningkatan ini terjadi baik di negara maju maupun berkembang, menuntut adanya sistem pasokan energi yang efisien, handal, serta berkelanjutan. Ketergantungan pada bahan bakar fosil masih tinggi, padahal sumber ini terbatas dan menghasilkan emisi karbon yang berkontribusi pada pemanasan global, pencemaran, serta potensi ketidakstabilan pasokan di masa mendatang. Kondisi ini mendorong upaya pengembangan energi terbarukan sebagai alternatif yang lebih ramah lingkungan dan lestari. Energi terbarukan unggul karena bersumber dari alam yang dapat diperbaharui dan menimbulkan dampak lingkungan yang lebih kecil. Salah satu sumber energi terbarukan yang potensial ialah energi air, yang dapat dimanfaatkan lewat pembangkit listrik tenaga air (PLTA) atau sistem mikrohidro. Pemanfaatan energi air melibatkan konversi energi potensial dan kinetik air menjadi energi mekanik melalui turbin, lalu menjadi listrik lewat generator. Sistem ini banyak dipakai karena tingkat efisiensinya tinggi dan dapat beroperasi stabil dalam jangka panjang. Selain itu, mikrohidro menawarkan solusi praktis untuk pasokan listrik di daerah terpencil yang belum terhubung jaringan utama. Namun, kinerja PLTA sangat tergantung pada performa turbin yang dipakai.

Turbin air menjadi elemen kunci dalam proses konversi, sehingga efisiensinya berpengaruh besar pada besarnya listrik yang dihasilkan. Faktor-faktor seperti desain turbin, jumlah serta bentuk sudu, dan karakteristik aliran cairan secara langsung memengaruhi kinerjanya. Desain yang kurang optimal dapat menimbulkan kehilangan energi dan menurunkan efisiensi sistem secara keseluruhan. Karena itu, diperlukan riset yang menitikberatkan pada pengembangan dan optimasi desain turbin air untuk meningkatkan efisiensi konversi energi. Salah satu cara adalah menganalisis pengaruh variasi jumlah sudu atau bentuk bucket pada turbin Pelton terhadap performanya. Penelitian ini diharapkan memberi kontribusi pada peningkatan efisiensi pembangkit listrik tenaga air serta mendukung pengembangan energi terbarukan yang lebih efektif dan berkelanjutan. Penurunan kinerja turbin Pelton dapat terjadi karena erosi dan kavitasi pada bucket, yang langsung memengaruhi efisiensi hidrolik turbin. Untuk mengatasinya,

dilakukan rekonstruksi serta optimasi desain bucket dengan pendekatan numerik seperti *Computational Fluid Dynamics* (CFD) dan metode optimasi berbasis kecerdasan buatan guna memulihkan performa turbin. Penelitian membuktikan bahwa optimasi bentuk bucket secara signifikan meningkatkan efisiensi turbin, menjadikan desain optimal sebagai faktor krusial dalam memperbaiki kinerja sistem pembangkit listrik tenaga air (Ibarra et al., 2024).

Penggunaan energi air sebagai sumber energi terbarukan terus digalakkan untuk menjawab peningkatan permintaan listrik. Di dalam pembangkit listrik tenaga air, turbin berperan utama dengan mengubah energi kinetik serta potensial air menjadi energi mekanik. Pemilihan tipe turbin harus menyesuaikan dengan kondisi aliran, seperti tinggi jatuh (*head*) dan debit, supaya kinerja maksimal tercapai. Turbin Pelton merupakan salah satu tipe yang umum dipakai pada head tinggi dengan debit relatif kecil. Turbin ini termasuk dalam kelas turbin impuls, yang beroperasi berdasarkan perubahan momentum jet air yang diarahkan ke sudu atau bucket pada runner. Energi kinetik jet air ditransfer ke sudu, menciptakan gaya yang memutar runner dan menghasilkan energi mekanik pada poros turbin. Ciri khas turbin Pelton terletak pada penggunaan nozzle yang menghasilkan jet air berkecepatan tinggi dan diarahkan langsung ke bucket. Interaksi antara jet dan bucket menimbulkan gaya impuls besar, sehingga turbin ini dapat beroperasi dengan efisien pada tekanan tinggi. Karena itu, turbin Pelton banyak diterapkan pada pembangkit listrik tenaga air dengan head besar, termasuk pada sistem mikrohidro di wilayah pegunungan. Meskipun memiliki tingkat efisiensi tinggi, performa turbin Pelton sangat dipengaruhi oleh desain bucket serta karakteristik aliran fluida selama proses konversi energi.

Faktor-faktor seperti bentuk bucket, jumlah sudu, sudut masuk dan keluar aliran, serta distribusi tekanan berperan penting dalam menentukan besarnya energi yang dapat diubah menjadi energi mekanik. Desain yang tidak optimal dapat menimbulkan kehilangan energi akibat turbulensi, percikan air, atau ketidaksempurnaan transfer momentum. Oleh sebab itu, diperlukan penelitian yang memusatkan kajian pada analisis dan optimalisasi desain turbin Pelton untuk meningkatkan efisiensi serta kinerja sistem. Pendekatan yang dapat diambil meliputi studi pengaruh parameter desain, seperti variasi jumlah sudu atau geometri bucket, terhadap performa turbin. Diharapkan hasil penelitian ini dapat berkontribusi pada pengembangan teknologi turbin air yang lebih efisien dan mendukung pemanfaatan energi terbarukan secara optimal. Kinerja turbin Pelton sangat

dipengaruhi oleh faktor operasional seperti erosi dan kavitasasi pada bucket, yang dapat menurunkan efisiensi hidrolis serta performa keseluruhan turbin. Karena itu, diperlukan upaya rekonstruksi dan optimasi desain bucket dengan menggunakan metode numerik seperti *Computational Fluid Dynamics* (CFD) untuk memulihkan dan meningkatkan efisiensi turbin. Penelitian menunjukkan bahwa optimasi bentuk bucket dapat meningkatkan efisiensi dan mengurangi kehilangan energi, sehingga desain yang tepat menjadi kunci utama dalam memperbaiki kinerja pembangkit listrik tenaga air (Xiao et al., 2024).

Kinerja turbin Pelton, yang termasuk dalam jenis turbin impuls, sangat dipengaruhi oleh desain runner, khususnya bucket atau sudu yang bersentuhan langsung dengan jet air. Salah satu faktor desain yang berperan penting ialah jumlah sudu pada runner. Perbedaan jumlah sudu menentukan cara jet air menabrak permukaan bucket, sehingga memengaruhi proses konversi energi fluida menjadi energi mekanik. Jumlah sudu yang tepat dapat meningkatkan kemampuan turbin dalam menangkap energi jet air secara efisien. Bila jumlah sudu selaras dengan karakteristik aliran, distribusi fluida pada runner menjadi lebih seragam sehingga energi kinetik air dapat dimanfaatkan secara optimum. Sebaliknya, jumlah sudu yang tidak sesuai akan menurunkan efisiensi turbin. Sudu yang terlalu sedikit membuat sebagian energi jet tidak tertangkap optimal, sedangkan sudu yang berlebihan dapat menimbulkan gangguan aliran, seperti turbulensi dan interaksi antar sudu, yang meningkatkan kehilangan energi. Selain itu, variasi jumlah sudu juga memengaruhi kontinuitas aliran jet pada runner. Susunan yang tidak tepat dapat menimbulkan ketidakseimbangan gaya pada runner, yang berdampak pada stabilitas putaran dan performa keseluruhan turbin. Oleh karena itu, pemilihan jumlah sudu tidak hanya mempertimbangkan faktor geometris, melainkan juga harus disesuaikan dengan kondisi operasi seperti debit air, kecepatan jet, dan karakteristik head. Dengan mempertimbangkan hal-hal tersebut, analisis variasi jumlah sudu pada turbin Pelton menjadi penting untuk menemukan konfigurasi runner yang optimal. Kinerja turbin Pelton dipengaruhi oleh berbagai faktor, termasuk jumlah sudu pada runner yang berfungsi menangkap energi aliran air. Pengujian mengindikasikan bahwa menambah jumlah sudu dari 24 menjadi 28 meningkatkan daya turbin serta kecepatan rotasinya, sehingga sudu yang lebih banyak cenderung memberikan performa yang lebih optimal. Selain itu, variasi jumlah sudu juga memengaruhi efisiensi dan penyebaran energi dalam

turbin, menjadikan pemilihan jumlah sudu yang tepat sebagai aspek krusial dalam desain turbin Pelton (Mahardika et al., 2024).

Beberapa penelitian sebelumnya telah mencoba menganalisis pengaruh variasi jumlah sudu terhadap kinerja turbin Pelton melalui pendekatan eksperimen maupun simulasi numerik. Penelitian tersebut umumnya bertujuan untuk mengetahui hubungan antara konfigurasi desain runner dengan efisiensi turbin yang dihasilkan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa perubahan jumlah sudu dapat mempengaruhi efisiensi turbin, torsi yang dihasilkan, serta stabilitas aliran fluida pada runner turbin. Interaksi antara jet air yang keluar dari *nozzle* dengan bucket pada runner menjadi faktor utama yang menentukan keberhasilan proses konversi energi. Penelitian menunjukkan bahwa interaksi antara jumlah bucket dan karakteristik aliran jet memiliki peran penting dalam menentukan efisiensi konversi energi pada turbin Pelton (Xiao et al., 2024). Penelitian lain juga menunjukkan bahwa variasi jumlah bucket dapat mempengaruhi distribusi aliran dan performa turbin secara keseluruhan (Rizky et al., 2022).

Meskipun demikian, penelitian mengenai pengaruh variasi jumlah sudu pada turbin Pelton masih memiliki keterbatasan, terutama pada aspek penentuan jumlah sudu yang paling optimal untuk menghasilkan efisiensi maksimum pada kondisi operasi tertentu. Sebagian penelitian lebih banyak menitikberatkan pada analisis bentuk bucket atau karakteristik aliran fluida menggunakan pendekatan simulasi numerik. Penelitian eksperimental yang mengkaji variasi jumlah sudu secara langsung pada sistem turbin Pelton masih relatif terbatas jumlahnya. Selain itu, kondisi operasi turbin pada setiap penelitian seringkali berbeda sehingga hasil yang diperoleh belum dapat memberikan kesimpulan yang bersifat umum. Perbedaan konfigurasi runner, karakteristik aliran air, serta metode pengujian yang digunakan juga menjadi faktor yang mempengaruhi hasil penelitian sebelumnya. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa kajian mengenai variasi jumlah sudu pada turbin Pelton masih memerlukan penelitian lebih lanjut untuk memperoleh pemahaman yang lebih komprehensif (Fan et al., 2024). Sehubungan pada permasalahan tersebut, peneliti berminat untuk mengangkat judul “**Analisis Pengaruh Variasi Jumlah Sudu Terhadap Kinerja Turbin Air Tipe Pelton**”.

1.2 Rumusan Masalah

Beberapa masalah telah diidentifikasi untuk penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Bagaimana pengaruh variasi jumlah sudu terhadap kinerja turbin air tipe Pelton yang ditinjau dari putaran turbin dan daya yang dihasilkan?
2. Berapa jumlah sudu yang menghasilkan kinerja turbin air tipe Pelton yang paling optimal pada kondisi pengujian yang dilakukan?

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan penjelasan rumusan masalah di atas, maka tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Menganalisis pengaruh variasi jumlah sudu terhadap kinerja turbin air tipe Pelton, yang ditinjau dari parameter putaran turbin dan daya yang dihasilkan pada kondisi pengujian tertentu.
2. Menentukan konfigurasi jumlah sudu yang menghasilkan kinerja turbin air tipe Pelton paling optimal, sehingga dapat menjadi acuan dalam pengembangan desain runner turbin yang lebih efisien pada sistem pembangkit listrik tenaga air.

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah berfungsi untuk memberikan gambaran mengenai cakupan atau jangkauan area penelitian. Jelaskan aspek atau area mana saja yang akan diteliti dan mana yang tidak. Hal ini penting untuk menghindari kesalahpahaman mengenai lingkup penelitian. Berikut batasan masalah pada penelitian ini :

1. Penelitian ini dilakukan pada turbin air tipe Pelton skala laboratorium yang digunakan sebagai alat uji dalam proses pengambilan data penelitian.
2. Variasi yang diteliti dalam penelitian ini hanya difokuskan pada jumlah sudu (*bucket*) yang terpasang pada runner turbin Pelton, sedangkan parameter desain lainnya seperti bentuk sudu, diameter runner, dan sudut *nozzle* tidak mengalami perubahan.
3. Parameter kinerja turbin yang dianalisis dalam penelitian ini meliputi putaran turbin (rpm) dan daya turbin yang dihasilkan selama proses pengujian.
4. Kondisi aliran air selama pengujian diasumsikan stabil dan dikontrol melalui sistem katup pada instalasi pipa, sehingga variasi penelitian hanya dipengaruhi oleh perubahan jumlah sudu.
5. Pengujian dilakukan pada alat uji turbin air yang tersedia di laboratorium dengan kondisi operasi yang telah ditentukan sesuai dengan spesifikasi alat.

1.5 Manfaat

Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat praktis yang dapat diterapkan dalam pengembangan dan pemanfaatan teknologi turbin air, antara lain sebagai berikut:

1. Memberikan informasi mengenai konfigurasi jumlah sudu yang menghasilkan kinerja turbin Pelton yang lebih optimal sehingga dapat menjadi acuan dalam perancangan turbin air.
2. Menjadi referensi bagi praktisi atau teknisi dalam mengembangkan desain runner turbin Pelton pada sistem pembangkit listrik tenaga air skala kecil maupun mikrohidro
3. Mendukung pengembangan teknologi pembangkit listrik tenaga air yang lebih efisien sehingga dapat meningkatkan pemanfaatan energi air sebagai sumber energi terbarukan.
4. Menjadi bahan pembelajaran dan referensi praktikum bagi mahasiswa atau peneliti di bidang teknik mesin yang mempelajari turbin air dan sistem konversi energi.
5. Memberikan dasar pertimbangan bagi pengembangan teknologi turbin air yang lebih sederhana namun memiliki performa yang lebih baik untuk diterapkan pada daerah yang memiliki potensi energi air.

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan dalam skripsi ini disusun untuk memberikan gambaran yang jelas mengenai isi dan alur pembahasan penelitian. Penyusunan laporan pada penelitian ini menjelaskan sistematika penulisan yang terbagi dari beberapa bab, antara lain :

Bab I merupakan pendahuluan yang berisi latar belakang masalah, rumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah, manfaat penelitian, serta sistematika penulisan. Bab ini bertujuan untuk memberikan gambaran umum mengenai alasan dilakukannya penelitian dan arah penelitian yang akan dilakukan.

Bab II merupakan kajian teori yang berisi landasan teori yang relevan dengan penelitian, seperti konsep turbin air tipe Pelton, prinsip kerja turbin, serta penelitian terdahulu yang mendukung penelitian ini. Bab ini digunakan sebagai dasar teoritis dalam melakukan analisis dan pembahasan penelitian.

Bab III merupakan metode penelitian yang menjelaskan jenis penelitian, variabel penelitian, alat dan bahan yang digunakan, rancangan percobaan, serta teknik pengolahan dan analisis data. Bab ini bertujuan untuk menjelaskan secara rinci bagaimana penelitian akan dilaksanakan.

Bab IV merupakan hasil dan pembahasan yang berisi penyajian data hasil pengujian, analisis pengaruh variasi jumlah sudu terhadap putaran turbin (RPM) dan daya turbin, serta pembahasan hasil penelitian yang dikaitkan dengan teori dan penelitian terdahulu. Pada bab ini juga dilakukan analisis statistik menggunakan metode One-Way ANOVA untuk mengetahui pengaruh variasi jumlah sudu terhadap kinerja turbin air tipe Pelton.

Bab V merupakan penutup yang berisi kesimpulan dan saran. Kesimpulan disusun berdasarkan hasil penelitian dan analisis yang telah dilakukan untuk menjawab rumusan masalah dan tujuan penelitian. Sementara itu, saran diberikan sebagai masukan untuk pengembangan penelitian selanjutnya maupun perbaikan dalam pengujian turbin air tipe Pelton.