

## BAB 5 KESIMPULAN

### 5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD) yang telah dilakukan terhadap turbin angin vertikal tipe Fibonacci dan Savonius pada variasi kecepatan angin 2 m/s, 3 m/s, dan 5 m/s, diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Hasil analisis komparatif performa aerodinamis menunjukkan bahwa turbin Fibonacci secara konsisten menghasilkan nilai parameter performa yang lebih tinggi dibandingkan turbin Savonius pada seluruh variasi kecepatan angin yang diuji. Turbin Fibonacci memiliki nilai TSR pada rentang 1,43–1,52, nilai  $C_t$  pada kisaran 0,034–0,035, serta  $C_p$  maksimum sebesar 0,061 yang dicapai pada kecepatan angin 2 m/s. Sementara itu, turbin Savonius menunjukkan nilai TSR yang konstan sebesar 1,23,  $C_t$  sebesar 0,018, dan  $C_p$  sebesar 0,011 pada seluruh variasi kecepatan angin. Torsi maksimum turbin Fibonacci mencapai 1,701 Nm pada kecepatan angin 5 m/s, sedangkan turbin Savonius hanya menghasilkan torsi maksimum sebesar 0,339 Nm pada kondisi yang sama. Perbedaan performa ini mengindikasikan bahwa geometri sudu berbasis spiral *golden ratio* pada turbin Fibonacci mampu menghasilkan distribusi gaya tangensial yang lebih efektif, sehingga konversi energi kinetik angin menjadi energi mekanik berlangsung lebih optimal dibandingkan profil sudu setengah silinder pada turbin Savonius.
2. Berdasarkan hasil analisis komparatif performa aerodinamis, turbin Fibonacci direkomendasikan sebagai desain yang lebih optimal untuk aplikasi *auxiliary power* pada kapal *bulk carrier* kondisi *at-berth*. Nilai  $C_p$  turbin Fibonacci yang mencapai 0,061 menunjukkan efisiensi konversi energi yang sekitar 5,5 kali lebih tinggi dibandingkan turbin Savonius, sementara torsi yang dihasilkan mencapai sekitar 5 kali lebih besar pada setiap kondisi kecepatan angin yang diuji. Nilai TSR turbin Fibonacci yang lebih tinggi dan bervariasi sesuai kecepatan angin juga mengindikasikan kemampuan adaptasi yang lebih baik terhadap kondisi angin di lingkungan pelabuhan, yang umumnya berfluktuasi pada rentang kecepatan rendah hingga menengah. Dengan demikian, turbin Fibonacci dinilai lebih layak diterapkan sebagai sumber daya tambahan pada kapal *bulk carrier* saat kondisi *at-berth* karena memiliki efisiensi energi yang lebih tinggi, kemampuan menghasilkan torsi yang lebih besar, serta karakteristik operasional yang lebih stabil dibandingkan turbin Savonius konvensional.

### 5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, beberapa saran dapat dikemukakan untuk pengembangan penelitian selanjutnya. Simulasi CFD pada penelitian ini dilakukan dalam kondisi *steady-state* dengan kecepatan angin konstan, sehingga disarankan untuk melakukan simulasi lanjutan menggunakan pendekatan transient atau unsteady guna menangkap dinamika aliran yang lebih realistis sesuai kondisi angin aktual di lingkungan pelabuhan. Selain itu, perlu dilakukan pengujian eksperimental secara fisik terhadap prototipe turbin Fibonacci untuk memvalidasi hasil simulasi numerik yang telah diperoleh, serta memperluas variasi parameter geometri sudu seperti jumlah sudu, rasio diameter, dan tinggi turbin guna mengoptimalkan nilai  $C_p$  dan torsi yang dihasilkan. Pengembangan analisis juga dapat diarahkan pada kajian kelayakan teknis dan ekonomis penerapan turbin Fibonacci sebagai sistem *auxiliary*

*power* terintegrasi pada kapal *bulk carrier*, sehingga potensi penghematan energi dan reduksi emisi yang dapat dicapai dapat dikuantifikasi secara lebih komprehensif.