

## **BAB V**

### **PENUTUP**

#### **5.1. Kesimpulan**

Berdasarkan hasil simulasi Computational Fluid Dynamics (CFD) yang telah dilakukan terhadap turbin angin Darrieus (VAWT) dan turbin Fibonacci-Spiral (HAWT) pada tiga kondisi kecepatan angin (2, 4, dan 10 m/s) yang merepresentasikan rentang angin laut offshore Jeneponto berdasarkan data BMKG, dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut.

1. Turbin Darrieus (VAWT) menunjukkan performa aerodinamis yang lebih baik dibandingkan dengan turbin Fibonacci-Spiral (HAWT) pada semua parameter yang telah diukur. Darrieus menghasilkan  $C_p$  rata-rata sebesar 0,576 (97,1% dari batas Betz) dengan TSR yang stabil di angka 1,813, sementara Fibonacci-Spiral hanya mencapai  $C_p$  rata-rata 0,254 (42,8% dari batas Betz) dengan TSR yang terus meningkat hingga 1,602 pada kecepatan angin 10 m/s, menunjukkan bahwa turbin tersebut belum mencapai kondisi optimal. Dalam hal  $C_t$ , Darrieus juga lebih unggul dengan nilai rata-rata 0,318 dibandingkan 0,165 milik Fibonacci-Spiral. Satu-satunya keunggulan dari Fibonacci-Spiral adalah kemampuan self-starting yang lebih baik pada kecepatan angin rendah, berkat geometri spiral asimetrisnya, yang berbeda dari bilah NACA 0015 Darrieus yang simetris.
2. Turbin Darrieus direkomendasikan sebagai pilihan utama untuk sistem listrik cadangan pada kapal FPSO, dengan turbin Fibonacci-Spiral berfungsi sebagai komponen pelengkap dalam konfigurasi hibrida. Darrieus lebih unggul untuk kebutuhan daya yang signifikan (880,12 W/unit pada 10 m/s), bersifat omnidirectional sehingga tidak memerlukan kontrol yaw yang sangat penting di lingkungan maritim dengan arah angin yang bervariasi serta memiliki kestabilan operasi yang tinggi. Turbin Fibonacci-Spiral lebih cocok untuk skenario yang mengutamakan kompakitas (diameter 700 mm) dan kemampuan start-up pada angin rendah.

#### **5.2. Saran**

Berdasarkan temuan dan keterbatasan penelitian yang telah dilakukan, beberapa saran untuk pengembangan penelitian selanjutnya adalah sebagai berikut:

1. Simulasi pada Rentang TSR yang Lebih Luas  
Hasil simulasi menunjukkan bahwa turbin Fibonacci-Spiral beroperasi di bagian rising dari kurva  $C_p$ -TSR dengan TSR maksimum 1,602 pada 10 m/s. Untuk mengidentifikasi TSR optimum dan  $C_p$  maksimum yang sebenarnya, diperlukan simulasi tambahan pada kecepatan angin di atas 10 m/s atau dengan variasi RPM yang lebih tinggi, khususnya pada rentang TSR 1,6 hingga 3,0 agar karakteristik kurva  $C_p$ -TSR turbin Fibonacci-Spiral dapat terpetakan secara lengkap.
2. Penerapan Simulasi Unsteady (Transient) dan Sliding Mesh  
Penelitian ini menggunakan pendekatan steady-state dengan Multiple Reference Frame (MRF), yang tidak dapat menangkap sepenuhnya fenomena aliran tidak tunak seperti dynamic stall, blade-wake interaction periodik, dan vortex shedding. Penelitian lanjutan disarankan menerapkan metode sliding mesh dengan time-stepping (simulasi transient/unsteady) untuk mendapatkan gambaran yang lebih akurat tentang fluktuasi torsi per rotasi dan fenomena dinamis lainnya, khususnya pada turbin Darrieus yang bersifat periodik dalam satu siklus rotasi penuh.
3. Validasi Eksperimental  
Seluruh hasil simulasi dalam penelitian ini divalidasi secara numerik melalui

perbandingan literatur, tanpa pengujian fisik langsung. Penelitian lanjutan disarankan melakukan validasi eksperimental melalui uji terowongan angin (*wind tunnel testing*) pada model skala untuk kedua jenis turbin, guna mengkonfirmasi hasil simulasi CFD dan mengidentifikasi kemungkinan deviasi antara model numerik dan perilaku fisik nyata, terutama pada kondisi aliran turbulen tinggi.

4. Analisis Interaksi Turbin dengan Struktur dan Gerak Kapal

Penelitian ini mensimulasikan turbin dalam kondisi aliran seragam tanpa mempertimbangkan pengaruh struktur superstruktur kapal maupun gerak kapal (rolling, pitching, yawing) yang terjadi di kondisi laut nyata. Penelitian lanjutan disarankan mengintegrasikan model turbin dengan geometri dek kapal FPSO yang realistik dan mensimulasikan pengaruh gerakan kapal terhadap pola aliran dan kinerja turbin, untuk mendapatkan pengaruh estimasi daya yang lebih representatif untuk aplikasi offshore sesungguhnya.

5. Optimasi Geometri Turbin Fibonacci-Spiral

Geometri turbin Fibonacci-Spiral yang digunakan dalam penelitian ini mengadopsi proporsi golden ratio ( $\phi \approx 1,618$ ) secara langsung tanpa optimasi khusus untuk kondisi angin offshore Indonesia. Penelitian lanjutan disarankan melakukan studi optimasi parametrik terhadap variabel geometri spiral seperti jumlah lilitan, sudut twist, ketebalan profil, dan aspect ratio menggunakan metode optimasi multi-objektif (misalnya algoritma genetika atau surrogate-based optimization) dengan tujuan memaksimalkan  $C_p$  pada rentang kecepatan angin offshore Jenepono.

6. Analisis Tekno-Ekonomi dan Integrasi Sistem Kelistrikan Kapal

Penelitian ini terbatas pada evaluasi kinerja aerodinamika melalui simulasi CFD tanpa memperhitungkan aspek biaya fabrikasi, pemasangan, dan pemeliharaan di lingkungan laut yang korosif. Penelitian lanjutan disarankan melakukan analisis tekno-ekonomi komprehensif yang mencakup capital expenditure (CAPEX), operational expenditure (OPEX), dan proyeksi penghematan bahan bakar auxiliary engine (AE), serta mengkaji integrasi turbin angin dengan sistem kelistrikan kapal FPSO termasuk sistem penyimpanan energi (baterai) dan manajemen beban—untuk mendukung konsep green shipping yang sejalan dengan regulasi IMO 2023.