

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Penerapan sumber Energi Baru Terbarukan (EBT) semakin ditekankan dalam upaya mengatasi perubahan iklim dan ketergantungan pada bahan bakar fosil. Oleh karena itu, sumber EBT dapat digunakan secara luas dan berguna untuk memerangi krisis energi. Salah satu sumber energi terbarukan yang menjadi fokus adalah energi angin. Dalam konteks ini, turbin angin menjadi solusi inovatif untuk merubah potensi energi angin menjadi listrik secara efisien.

Berdasarkan lokasinya turbin angin dibagi menjadi dua, turbin angin darat (*onshore Wind Turbine*) dan turbin angin lepas pantai (*offshore wind turbine*) atau OWT (Zimmermann et al., 2013). Di Indonesia terdapat pemanfaatan energi angin yaitu turbin angin darat yang dikembangkan Pemerintah dalam membangun Pembangkit Listrik Bertenaga Bayu (PLTB) komersial pertama sekaligus menjadi PLTB terbesar saat ini, yaitu PLTB Sidrap. PLTB adalah pembangkit listrik yang aman, ramah lingkungan, tanpa polusi sehingga dapat mengurangi dampak pemanasan global (Humas EBTKE, 2019). PLTB Sidrap mempunyai kapasitas 75 MW dengan total 30 turbin kincir berjari-jari 57 meter dan tinggi 80 meter (Humas EBTKE, 2018).

Berdasarkan Peraturan Pemerintah No. 79 Tahun 2014 tentang Kebijakan Energi Nasional, target kapasitas PLTB pada tahun 2025 yakni 255 MW sehingga hal ini masih menjadi tantangan nasional. Dalam menghadapi tantangan nasional, diperlukan studi kelayakan pembangunan OWT dengan mempertimbangkan kecepatan angin di wilayah yang berpotensi, misalnya Jawa Tengah. Jawa Tengah memiliki potensi energi angin dengan kecepatan rata-rata angin tahunan mencapai 5 m/s dan kecepatan angin maksimum mencapai 28 m/s (Badan Pusat Statistik Jawa Tengah, 2024) sementara kecepatan angin minimum untuk menggerakkan turbin tersebut adalah sebesar 3 m/s (Haryanti et al., 2023).

Kebutuhan energi listrik terus meningkat setiap tahun. Pemanfaatan energi angin melalui pembangunan OWT dapat membantu memenuhi kebutuhan energi listrik di Jawa Tengah, khususnya di kota Semarang dan Kota Demak dengan konsumsi listrik terbanyak setiap tahunnya (Badan Pusat Statistik Jawa Tengah, 2024). Provinsi Jawa Tengah adalah salah satu Provinsi dengan potensi pemanfaatan energi bayu tertinggi di Indonesia dengan potensi 8,56 GW (Sekretariat Jenderal Dewan Energi, 2023). Berdasarkan potensi kecepatan angin yang stabil setiap tahunnya dan untuk memenuhi kebutuhan energi listrik yang semakin meningkat di Jawa Tengah maka rencana pembangunan turbin angin lepas pantai akan dilaksanakan di lepas pantai Sayung, Kabupaten Demak.

OWT terdiri dari struktur pendukung dan pondasi. Struktur pondasi *Monopile* sejauh ini merupakan konsep pondasi yang paling banyak digunakan di dunia, karena desainnya yang sederhana dibandingkan model pondasi lainnya namun kokoh sangat cocok untuk fabrikasi massal dan metode pemasangannya yaitu metode *conventional impact driving*, kuat di sebagian besar kondisi tanah. Mayoritas penggunaan pondasi ini dibangun pada air yang memiliki kedalaman di bawah 40 meter (Kallehave et al., 2015). Pondasi *Monopile* dapat dibagi menjadi dua bagian, yaitu bagian yang tertanam di dalam tanah, dan struktur bawah yang berada di atas dasar laut. Untuk *Monopile*, beban dan momen yang diterapkan harus dilawan oleh tekanan tanah yang dimobilisasi di tanah sekitarnya, dengan faktor keamanan yang memadai. (Brendan C & Arshad, 2016)

Desain dan analisis dari pondasi *Monopile* untuk turbin angin menghadapi beberapa permasalahan. Permasalahan terjadi akibat gerusan di sekitar *Monopile* yang menopang OWT dapat menyebabkan penurunan kapasitas pondasi dan frekuensi alami sistem struktur tanah secara signifikan (Menéndez-Vicente et al., 2023). Tantangan pada penentuan pondasi *Monopile* OWT yang harus diselesaikan menggunakan konsep desain yaitu mencakup investigasi lokasi, kriteria desain, dan evaluasi stabilitas desain dengan menggunakan kombinasi pembebanan (Nasab et al., 2022) dapat memenuhi persyaratan desain utama untuk desain pondasi *Monopile*.

Kriteria desain pondasi *Monopile* harus memenuhi syarat berikut. Pertama, ULS (*Ultimate Limit State*) daya dukung pondasi harus melebihi beban maksimum yang terjadi untuk beban horizontal dan vertikal, dan momen ($F_R > F_{ULS}$, $V_R > V_{ULS}$, $M_R > M_{ULS}$) syarat selanjutnya tegangan leleh *pile Monopile* (σ_m) harus lebih kecil dari tegangan maksimum (f_{yk}). Kedua, SLS (*Serviceability Limit State*) meliputi evaluasi nilai stabilitas pondasi *Monopile* yaitu defleksi yang terjadi pada pondasi *Monopile* (ρ_0) kurang dari 0,2 meter dan rotasi yang terjadi pada pondasi *Monopile* (θ_0) kurang dari $0,5^\circ$ serta frekuensi alami menara harus lebih besar dari (frekuensi rotasi rotor) dimana nilai frekuensi rotasi rotor adalah 0,24 Hz dan yang terakhir harus memenuhi FLS (*Fatigue Limit State*) yaitu ini akan memerlukan prediksi umur kelelahan *monopile*.

Dengan pertimbangan dan penjelasan di atas, maka perlu dilakukan penelitian tentang bagaimana merencanakan pondasi *Monopile* pada struktur turbin angin lepas pantai di lepas pantai Sayung, Kabupaten Demak yang sesuai dengan kriteria desain. Berdasarkan kondisi dan potensi energi angin yang dapat dimanfaatkan, Jawa Tengah memiliki potensi untuk menjadi lokasi dalam pengembangan turbin angin lepas pantai. Keberhasilan pembangunan ini dapat mendorong pertumbuhan ekonomi dan pengurangan ketergantungan pada sumber energi konvensional.

1.2 Rumusan Masalah

Sejalan dengan latar belakang di atas rumusan masalah pada penelitian ini adalah:

1. Bagaimana perencanaan pondasi *monopile* dapat memenuhi kapasitas daya dukung tanah berdasarkan kombinasi pembebanan angin ekstrim dan gelombang ekstrim pada turbin angin lepas pantai (*offshore*)?
2. Bagaimana mengevaluasi stabilitas pondasi *monopile* dapat memenuhi kriteria desain terhadap kombinasi pembebanan angin ekstrim dan gelombang ekstrim pada turbin angin lepas pantai (*offshore*)?

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah di atas tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Untuk mengetahui perencanaan pondasi *monopile* dapat memenuhi kapasitas daya dukung tanah berdasarkan kombinasi pembebanan angin ekstrim dan gelombang ekstrim pada turbin angin lepas pantai (*offshore*).
2. Untuk mengevaluasi stabilitas pondasi *monopile* dapat memenuhi kriteria desain terhadap kombinasi pembebanan angin ekstrim dan gelombang ekstrim pada turbin angin lepas pantai (*offshore*).

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Penelitian ini diharapkan mampu berkontribusi dalam pengembangan teknologi energi terbarukan, khususnya energi angin. Dengan adanya desain pondasi yang optimal, efisiensi dan keandalan turbin angin lepas pantai dapat ditingkatkan.
2. Ditemukannya perencanaan efektif dalam pembangunan Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) di di Perairan Sayung, Jawa Tengah.
3. Penelitian ini diharapkan menjadi acuan penyedia listrik ramah lingkungan dan pengembangan pembangunan Turbin Angin Lepas Pantai (*Offshore*) pertama di Indonesia sehingga dapat menjawab tantangan nasional tentang Kebijakan Energi Nasional.

1.5 Ruang Lingkup dan Batasan Penelitian

Pada penelitian ini, beberapa batasan masalah telah diterapkan untuk mengarahkan fokus penelitian pada aspek-aspek tertentu. Adapun batasan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Penelitian ini tidak membahas mengenai metode pelaksanaan konstruksi turbin angin, tidak membahas mengenai dampak lingkungan, tidak membahas mengenai perbandingan penggunaan pondasi yang efektif, tidak membahas pasang surut air laut, tidak membahas mengenai dampak ekonomi dan social, tidak menganalisis mengenai estimasi biaya proyek.
2. Kombinasi pembebanan terdiri dari beban angin ekstrim dan beban gelombang ekstrim sesuai dengan panduan filosofi *Limit State Design*.
3. Turbin menggunakan Turbin NREL 1,5 MW.

1.6 Metode Penelitian

Pada penelitian ini menggunakan metode kuantitatif dikarenakan menerapkan metode matematis dan memperoleh hasil yang terukur. Pada penelitian ini menggunakan metode *limit state design* yang terdiri dari beberapa kriteria desain yaitu *Ultimate Limit State* (ULS), *Serviceability Limit State* (SLS) dan *Fatigue Limit State* (FLS). Berikut tahapan-tahapan yang dilakukan pada penelitian ini:

- A. Memperoleh data (*Metoccean data, basic turbine data, geological dan geotechnical data*).
- B. Analisa kecepatan angin parameter Weibull.
- C. Menentukan dimensi *Monopile*
 1. Menghitung momen akibat beban angin tertinggi untuk menentukan kekuatan leleh *pile*
 2. Menghitung dimensi *Monopile*.
- D. Memperkirakan beban yang bekerja di atas pondasi
 1. Menghitung beban dorong serta gaya angin yang bekerja.
 2. Menghitung beban gelombang kala ulang 1 tahun dan 50 tahun.
 3. Beban kombinasi untuk desain ULS.
- E. Perkirakan daya dukung beban (Berdasarkan kapasitas dukung beban horizontal, beban vertikal dan kapasitas dukung momen).
- F. Memperkirakan *deformasi* dan kekakuan pondasi (untuk menentukan K_L , K_{LR} , dan K_R serta *defleksi* (ρ_0) dan *rotasi* (θ_0) *Monopile*).
- G. Menghitung *system natural frequency and dynamic amplification factors*.

1.7 Hasil Penelitian

Hasil penelitian pada skripsi ini adalah sebagai berikut:

A. *Ultimate Limit State* (ULS)

Nilai daya dukung beban horizontal dan momen yang terjadi dengan eksentrisitas beban 94 meter adalah 1,92 MN dan 191,93 MNm serta daya dukung beban vertikal 11,38 MN. Nilai ini cukup menahan beban horizontal maksimum 1,28 MN, momen maksimum 50,62 MNm dan beban vertikal maksimum 7,677 MN.

B. *Serviceability limit state (SLS)*

Pada perhitungan SLS, lapisan atas dominan untuk perhitungan *defleksi* dan kekakuan. Dalam prosedur yang disederhanakan untuk mendapatkan dua parameter kekakuan pondasi diperlukan untuk mendefinisikan tanah (tanah kekakuan pada $1D_p$ di bawah garis lumpur). Tanah pada lapisan $1D_p$ di bawah garis lumpur adalah tanah kohesif *very soft clay*. profil kekakuan tanah termasuk dalam *parabolic soil*. Stabilitas desain terdiri dari *defleksi* dan *rotasi*. Nilai *defleksi* dan *rotasi* yang terjadi berdasarkan nilai kekakuan pondasi $K_L = 56,16 \text{ MN/m}$, $K_{LR} = -1381,62 \text{ MN/m}$ dan $K_R = 61608,38 \text{ MN/rad}$. Berdasarkan nilai kekakuan pondasi, maka *defleksi* yang terjadi $0,086 \text{ m} < 0,2 \text{ m}$ dan nilai *rotasi* yang terjadi $0,0028^\circ < 0,5^\circ$.

C. Sistem natural frekuensi

Sistem natural frekuensi dihitung untuk memperhitungkan fleksibilitas pondasi dan tower. Tower direncanakan diameter atas (D_t) = 2 m dan diameter bawah (D_b) = 3,25 m dengan $L_T = 64 \text{ m}$ dan tebal dinding tower (t_T) = 0,038 m. Maka, sistem natural frekuensi.

$$f_0 = C_L C_R C_S F_{FB} = 0,952 (0,857)(0,841)(0,357) = 0,245 > 0,24 \text{ Hz (OK)}$$

D. *Fatigue Limit State (FLS)*

Momen maksimum yang terjadi adalah 50,62 MNm. *Stress maximum* dapat dihitung menggunakan **Persamaan 2.55**. Nilai *stress maximum* ($\sigma_{m,max}$) yang terjadi adalah 151,1 MPa. Momen minimum terjadi pada skenario beban (E-4). Momen minimum yang terjadi adalah 17,76 MPa. *Maximum cyclic stress amplitude* dapat dihitung dengan **Persamaan 2.57**. Nilai *Maximum cyclic stress amplitude* ($\sigma_{c,max}$) yang terjadi adalah 49,04 MPa. Dengan nilai *stress maximum* ($\sigma_{m,max}$) dan *Maximum cyclic stress amplitude* ($\sigma_{c,max}$) lebih kecil dari *fatigue endurance limit* dari baja S355 adalah (σ_{end}) adalah 260 MPa maka pondasi aman terhadap umur kelelahan baja struktural dan dapat direncanakan berumur 50 tahun.