

BAB 5

KESIMPULAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil rancangan desain, analisis struktur, dan validasi eksperimental *portable towing carriage* dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Rancangan desain *portable towing carriage* yang terdiri atas tiga sub-sistem utama, yaitu sasis *towing cart*, *towing arm*, dan *towing rod*, berhasil dirancang dengan mekanisme teleskopik yang mampu mencapai jangkauan operasional maksimum 6 m pada kondisi *extended* dan dapat diringkas hingga panjang 1.75 m pada kondisi *folded* dengan berat total rancangan 17.5 kg, sehingga secara konseptual telah memenuhi kriteria portabilitas dan mobilitas menggunakan kendaraan roda dua sebagaimana ditetapkan pada rumusan masalah dan batasan penelitian. Mekanisme penguncian antar segmen dengan baut dan mur terbukti mampu menjaga kekakuan sambungan pada kondisi terentang penuh, sementara sistem *towing rod* yang dilengkapi *linear bushing* berhasil memfasilitasi kebebasan gerak *pitch* model kapal tanpa mengorbankan kekakuan arah tarikan.
2. Hasil analisis struktur menggunakan *Finite Element Analysis* (FEA) pada kondisi ekstensi maksimum terhadap empat variasi material, yaitu *galvanized steel*, *stainless steel* 304, aluminium 6061, dan *carbon fibre reinforced polymer* (CFRP), menunjukkan adanya kompromi teknis antara portabilitas massa dan kekakuan struktural. Material ringan (CFRP dan aluminium 6061) unggul dalam menekan tegangan *von mises* maksimum, namun gagal secara fungsional karena mencatatkan lendutan yang jauh melampaui batas izin layan (*serviceability limit*, $L/240$) (SNI, 2002). Sebaliknya, *galvanized steel* dipilih sebagai material realisasi purwarupa karena menghasilkan lendutan terendah (38.67 mm) di antara seluruh kandidat, meskipun harus menerima konsentrasi tegangan yang tinggi. Namun demikian, nilai faktor keamanan (*safety factor*) yang diperoleh untuk seluruh material uji, termasuk *galvanized steel* (*safety factor* = 0.12), berada jauh di bawah ambang batas aman (*safety factor* > 1), yang mengindikasikan bahwa pemilihan material pada penelitian

ini didasarkan pada kriteria kekakuan (lendutan) sebagai parameter dominan, bukan pada kriteria kekuatan luluh material.

3. Fabrikasi purwarupa *portable towing carriage* dengan material *galvanized steel* berhasil direalisasikan dengan deviasi dimensi yang minimal terhadap rancangan CAD (deviasi berat +0.7 kg dan deviasi panjang +247 mm pada kondisi *extended*). Validasi lendutan statis menunjukkan hasil pengukuran eksperimental sebesar 41.3 mm berbanding hasil FEA sebesar 38.67 mm, dengan selisih +6.8%, yang tergolong wajar dan disebabkan oleh akumulasi kelonggaran mekanis pada sambungan teleskopik yang tidak sepenuhnya terepresentasi dalam simulasi.
4. Evaluasi operasional dinamis di perairan terbuka (Waduk Brigif) membuktikan bahwa purwarupa mampu memfasilitasi pengamatan karakteristik olah gerak model kapal berupa gerak *pitch* yang berlangsung natural serta *tracking* arah yang stabil sepanjang lintasan pengujian, tanpa terjadinya interferensi gelombang pantul dari tepian (*wall effect*). Meski demikian, ditemukan dua limitasi teknis, yaitu keterbatasan gerak bebas *heave* akibat celah dimensional pada sambungan *towing rod* dan kecenderungan *drift* ke kiri akibat *misalignment* sumbu roda *towing cart*. Kedua limitasi tersebut bersifat dapat diperbaiki dan tidak menggugurkan fungsionalitas dasar alat sebagai alternatif *portable towing tank* konvensional, sehingga secara keseluruhan tujuan penelitian ini telah tercapai secara fungsional. Pengukuran kuantitatif 6 *Degree of Freedom* (6-DOF) menggunakan sensor *Inertial Measurement Unit* (IMU) pada 11 kali pengujian dinamis menguatkan temuan visual di atas secara numerik: gerak *pitch* tercatat RMS rata-rata 3.83° (maksimum 9.04°) dan gerak *roll* RMS rata-rata 3.36° (maksimum 7.00°), menunjukkan model tetap stabil secara lateral sepanjang penarikan. Gerak *yaw* tercatat deviasi RMS rata-rata paling besar (7.65° , maksimum 16.11°) yang diduga disebabkan oleh interferensi medan magnetometer akibat struktur logam *carriage*, menjadi salah satu limitasi teknis konfigurasi sensor yang perlu ditindaklanjuti. Adapun nilai deviasi translasi (*surge*, *sway*, *heave*) yang diperoleh dari integrasi ganda data akselerasi lebih tepat dibaca sebagai indikator konsistensi kualitatif antar

pengujian, mengingat metode ini rentan terhadap akumulasi *drift* meski telah dilakukan koreksi bias dan tren linear.

5.2 Saran

Berdasarkan temuan dan keterbatasan yang teridentifikasi pada hasil dan pembahasan, berikut disampaikan beberapa saran perbaikan bagi pengembangan dan penelitian selanjutnya:

1. Peninjauan ulang kriteria pemilihan material berbasis faktor keamanan. Nilai faktor keamanan yang diperoleh pada seluruh variasi material (termasuk *galvanized steel* dengan $safety\ factor = 0.12$) berada jauh di bawah ambang batas aman ($safety\ factor > 1$) yang lazim digunakan dalam perancangan struktur teknik. Hal ini mengindikasikan bahwa profil penampang *square hollow section* yang digunakan pada *towing arm* berpotensi mengalami kegagalan luluh pada pembebanan operasional penuh meskipun kriteria lendutan telah terpenuhi. Penelitian selanjutnya disarankan untuk melakukan optimasi ulang dimensi profil (ketebalan dan lebar penampang) atau penambahan elemen perkuatan (*stiffener/truss* tambahan) pada titik konsentrasi tegangan tertinggi, yaitu persimpangan pangkal lengan dan tumpuan sasis, agar $safety\ factor$ struktur memenuhi standar keamanan rekayasa yang berlaku.
2. Validasi eksperimental tegangan, bukan hanya lendutan. Validasi eksperimental pada penelitian ini hanya membandingkan lendutan hasil FEA dengan pengukuran fisik, sementara nilai tegangan maksimum belum diverifikasi secara langsung di lapangan (misalnya melalui pemasangan *strain gauge* pada titik kritis). Penelitian selanjutnya disarankan untuk melakukan pengukuran regangan langsung agar keakuratan prediksi tegangan dari simulasi FEA dapat dipertanggungjawabkan secara empiris, tidak hanya berdasarkan parameter lendutan.
3. Analisis beban dinamis dan kelelahan (*fatigue*) belum dilakukan. Analisis struktur pada penelitian ini hanya menggunakan skenario pembebanan statis pada satu kondisi ekstrem (ekstensi maksimum), sedangkan pada penggunaan berulang, struktur akan menerima beban siklik akibat proses penarikan,

pelipatan, dan pemasangan berulang. Penelitian selanjutnya disarankan untuk melakukan analisis kelelahan material (*fatigue analysis*) serta simulasi beban dinamis akibat percepatan dan hentakan (*impact/shock loading*) saat model kapal ditarik, mengingat kondisi tersebut lebih merepresentasikan kondisi kerja aktual dibandingkan pembebanan statis semata.

4. Perbaiki toleransi manufaktur pada sambungan teleskopik *towing rod*. Celah dimensional antara segmen SHS 25×25 mm dan SHS 20×20 mm pada *towing rod* menyebabkan kecenderungan *yaw* pada model kapal, yang pada penelitian ini diatasi dengan pengganjalan (*shimming*) namun mengorbankan kebebasan gerak *heave*. Penelitian selanjutnya disarankan menggunakan profil dengan toleransi dimensi yang lebih presisi atau menambahkan *linear bushing* berdiameter sesuai pada sambungan tersebut, sehingga derajat kebebasan gerak *heave* dapat dikembalikan secara penuh tanpa menimbulkan deviasi yang tinggi antara *yaw* kondisi awal dengan kondisi pengujian alat.
5. Perbaiki sistem kemudi dan *alignment* roda *towing cart*. Kecenderungan *drift* ke kiri yang teramati selama pengujian dinamis disebabkan oleh *misalignment* sumbu roda. Penelitian selanjutnya disarankan untuk menambahkan mekanisme kemudi (*steering*) pada roda depan atau melakukan *realignment axle* yang lebih presisi pada tahap perakitan, sehingga lintasan penarikan model kapal dapat dijaga tetap lurus tanpa memerlukan koreksi manual dari operator.
6. Perbaiki konfigurasi sensor dan validasi silang instrumentasi 6-DOF. Pengujian dinamis pada penelitian ini telah dilengkapi dengan instrumentasi kuantitatif berupa sensor *Inertial Measurement Unit* (IMU) untuk merekam data gerak 6 *Degree of Freedom*, namun ditemukan deviasi *yaw* yang signifikan akibat interferensi magnetometer dari struktur logam *carriage*, serta akumulasi *drift* pada data translasi (*surge, sway, heave*) hasil integrasi ganda akselerasi. Penelitian selanjutnya disarankan untuk melakukan pemasangan pelindung magnetik (*magnetic shielding*) atau relokasi sensor menjauhi komponen logam untuk menekan interferensi *yaw*, memperpanjang durasi kalibrasi kondisi diam sebelum penarikan untuk memperbaiki akurasi koreksi bias, serta menambahkan instrumentasi validasi silang seperti

pelacakan video (*motion tracking camera*), agar data translasi 6-DOF dapat diverifikasi terhadap metode pengukuran independen di luar sensor inersia.

7. Variasi kondisi pengujian dan pengulangan (*repeatability*). Pengujian operasional dinamis pada penelitian ini hanya dilakukan pada satu lokasi (Waduk Brigif) dengan satu kondisi gelombang permukaan tenang serta jumlah pengulangan pengujian yang terbatas. Penelitian selanjutnya disarankan untuk melakukan pengujian berulang pada beberapa variasi kondisi perairan (kecepatan tarik, tinggi gelombang permukaan yang berbeda) guna menguji konsistensi dan keandalan (*repeatability*) data yang dihasilkan alat.
8. Kajian ketahanan korosi dan durabilitas jangka panjang. Pemilihan *galvanized steel* sebagai material realisasi purwarupa hanya didasarkan pada kriteria kekakuan dan tegangan, sementara aspek ketahanan korosi pada penggunaan berulang di lingkungan perairan tawar dan paparan cuaca belum dikaji dalam penelitian ini. Penelitian selanjutnya disarankan untuk melakukan pengujian atau kajian durabilitas material terhadap korosi dan kelelahan lingkungan (*environmental fatigue*) untuk memastikan usia pakai alat dalam penggunaan jangka panjang.
9. Peningkatan presisi manufaktur untuk mengurangi deviasi dimensi. Hasil fabrikasi menunjukkan adanya deviasi berat (+0.7 kg) dan deviasi panjang (+247 mm pada kondisi *extended*) terhadap rancangan CAD, yang berpotensi diakibatkan oleh proses pengelasan *Shielded Metal Arc Welding* (SMAW) yang menimbulkan penambahan material las serta distorsi termal pada profil tipis. Penelitian selanjutnya disarankan mempertimbangkan metode penyambungan alternatif dengan masukan panas lebih terkendali, seperti las *Tungsten Inert Gas* (TIG), untuk meminimalkan deviasi dimensi dan distorsi pada komponen ber dinding tipis.
10. Analisis kelayakan biaya (*cost analysis*) belum dilakukan. Pemilihan material pada penelitian ini murni didasarkan pada aspek kekuatan dan kekakuan struktural tanpa mempertimbangkan aspek keekonomian secara kuantitatif. Penelitian selanjutnya disarankan untuk menyertakan analisis biaya material dan fabrikasi antar variasi material, sehingga rekomendasi material yang

dihasilkan dapat mempertimbangkan aspek efisiensi biaya di samping kekuatan struktural, sejalan dengan tujuan penelitian ini sebagai solusi alternatif yang ekonomis.

Saran-saran tersebut diharapkan dapat menjadi acuan bagi peneliti selanjutnya dalam menyempurnakan desain, analisis struktur, dan pengujian *portable towing carriage*, sehingga alat ini dapat semakin andal digunakan sebagai alternatif fasilitas *towing tank* konvensional di lingkungan pendidikan dan penelitian teknik perkapalan.

Adapun beberapa kekurangan mengenai penelitian dalam skripsi ini, sehingga untuk tindak lanjut penelitian yang lebih rinci dapat diakses secara langsung dalam bentuk artikel ilmiah yang sedang/sudah dipublikasikan pada jurnal *International Journal of Marine Engineering Innovation and Research (IMEIR)*, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS).