

BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Setelah melalui serangkaian proses simulasi, pengolahan data, dan analisis pada bab-bab sebelumnya, maka pada bab ini akan disajikan kesimpulan yang menjawab rumusan masalah penelitian serta saran yang dapat menjadi acuan untuk pengembangan penelitian selanjutnya dan aplikasi praktis di industri maritim.

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan, dapat ditarik beberapa kesimpulan utama sebagai berikut:

1. Metode penelitian yang menggunakan *virtual captive model test* berbasis CFD terbukti sebagai alat yang valid dan efektif untuk mengekstrak *hydrodynamic derivatives*. Hasil validasi terhadap data eksperimen menunjukkan tingkat akurasi yang tinggi, sehingga mengkonfirmasi bahwa pendekatan numerik ini dapat diandalkan untuk menganalisis pengaruh parameter hidrodinamik seperti kedalaman air.
2. Hasil simulasi menunjukkan bahwa penurunan kedalaman air (rasio H/d) menyebabkan peningkatan magnitudo pada gaya lateral (Y) dan momen *yaw* (N). Peningkatan ini disebabkan oleh menguatnya *blockage effect* hidrodinamik, di mana terbatasnya ruang aliran antara lambung dan dasar laut meningkatkan perbedaan tekanan secara signifikan di sekitar badan kapal.
3. Hubungan antara kedalaman air dan nilai *hydrodynamic derivatives* tidak bersifat linear secara sederhana atau seutuhnya. Penelitian ini menemukan bahwa magnitudo dari semua derivatif meningkat seiring menurunnya H/d dari kondisi laut dalam, namun mencapai nilai puncaknya pada rasio $H/d = 1.4$, sebelum akhirnya sedikit menurun kembali pada kondisi paling dangkal ($H/d = 1.2$).
4. Pola osilasi pada nilai derivatif dapat dijelaskan oleh adanya pergeseran dominasi antara dua fenomena fisika. Peningkatan magnitudo hingga $H/d = 1.4$ didominasi oleh *blockage effect*. Namun, pada $H/d = 1.2$, di mana celah lunas-dasar laut sangat kecil, *cushioning effect* (efek bantalan) menjadi lebih dominan. Efek ini meningkatkan redaman viskos secara drastis, yang "melunakkan"

respons kapal dan menyebabkan sedikit penurunan kembali pada magnitudo derivatif.

5. Peningkatan magnitudo pada derivatif stabilitas utama (khususnya $N'v$) secara jelas mengindikasikan bahwa kapal KCS menjadi lebih stabil secara arah (*directionally stable*) di perairan dangkal. Puncak stabilitas tercapai pada $H/d = 1.4$, di mana kapal memiliki kecenderungan paling kuat untuk mempertahankan arah lurus dan menolak gangguan yang menyebabkan gerak *yaw*.
6. Sebagai konsekuensi dari peningkatan stabilitas arah dan redaman, kapal menjadi lebih "kaku" dan "lamban" untuk bermanuver di perairan dangkal. Ini berarti kapal akan membutuhkan gaya atau sudut kemudi yang lebih besar untuk memulai dan mempertahankan sebuah manuver putar. Secara praktis, ini menyiratkan bahwa radius putar kapal akan membesar dan responsivitasnya terhadap kontrol akan berkurang secara signifikan saat beroperasi dengan *under-keel clearance* yang terbatas.

5.2 Saran

Berdasarkan temuan dan keterbatasan yang ada dalam penelitian ini, penulis mengajukan beberapa saran yang detail untuk pengembangan penelitian di masa mendatang guna mendapatkan pemahaman yang lebih komprehensif mengenai hidrodinamika manuver kapal:

1. Penelitian ini dilakukan pada satu kecepatan servis konstan. Disarankan untuk melakukan studi serupa pada berbagai variasi kecepatan untuk menginvestigasi interaksi antara efek kecepatan dan efek kedalaman air. Analisis ini dapat mengungkap apakah tren non-monotonik pada derivatif yang ditemukan hanya terjadi pada Bilangan Froude tertentu atau merupakan fenomena yang lebih umum.
2. Untuk mendekati kondisi operasional yang lebih realistis, penelitian selanjutnya dapat memasukkan pengaruh gelombang reguler. Analisis dapat difokuskan pada bagaimana parameter gelombang (seperti panjang dan arah gelombang) memengaruhi gaya hidrodinamik dan *hydrodynamic derivatives* di berbagai kedalaman air.

3. Studi ini terbatas pada model 3-DOF (*surge, sway, yaw*). Pengembangan menjadi model 4-DOF dengan menyertakan gerak *roll* sangat direkomendasikan. Ini akan memungkinkan analisis *roll-yaw coupling effect*, yang diketahui sangat signifikan untuk kapal kontainer dan dapat memengaruhi stabilitas arah secara drastis di perairan dangkal.
4. Penelitian ini telah berhasil mengekstrak derivatif linear. Langkah selanjutnya yang sangat logis adalah melakukan perhitungan kuantitatif untuk derivatif orde tinggi (kuadratik dan kubik) dengan melakukan *fitting* polinomial pada kurva gaya dan momen. Analisis ini akan menghasilkan model matematika yang lebih lengkap dan mampu memprediksi manuver pada amplitudo besar secara akurat.
5. Untuk mendapatkan pemahaman yang lebih utuh, disarankan untuk mengintegrasikan pemodelan propeller dan kemudi secara eksplisit dalam simulasi CFD, bukan hanya pada lambung. Ini akan memungkinkan perhitungan derivatif interaksi (misalnya, a_H , x_H) dan analisis mengenai bagaimana *shallow water effect* memodifikasi aliran masuk ke propeller dan efektivitas kemudi.
6. Studi ini berfokus pada efek dasar laut (*seabed effect*). Disarankan untuk memperluas domain komputasi dengan menyertakan dinding vertikal di salah satu atau kedua sisi kapal untuk mensimulasikan *bank effect* di kanal atau alur pelayaran sempit. Analisis ini dapat mengungkap gaya dan momen asimetris yang timbul akibat interaksi dengan dinding.
7. Untuk mengeliminasi ketidakpastian yang mungkin timbul akibat *scale effects* antara simulasi model skala dengan kondisi nyata, validasi di masa depan dapat dilakukan dengan membandingkan hasil prediksi dengan data dari uji coba kapal skala penuh (*full-scale trial data*) akan meningkatkan tingkat kepercayaan pada hasil simulasi secara signifikan.
8. Penelitian ini menganalisis beberapa kondisi kedalaman konstan. Sebuah studi lanjutan yang menarik adalah melakukan simulasi dinamis di mana kapal bergerak melintasi area dengan perubahan kedalaman yang abrupt (mendadak), misalnya saat melewati gundukan dasar laut atau tepi kanal. Ini akan mengungkap gaya-gaya transien yang tidak teramati dalam kondisi statis.