

BAB I

PENDAHULUAN

1.1.Latar Belakang

Terowongan air memiliki beberapa kelebihan dibandingkan terowongan angin sehingga dapat menjadi alternatif pengujian aerodinamika. Terowongan air memiliki karakteristik densitas fluida yang lebih tinggi dikarenakan menggunakan air bukannya udara, dan juga terowongan air memiliki kecepatan *free-stream* (kecepatan fluida bebas tanpa pengaruh *boundary layer*) yang relatif lebih rendah dibandingkan terowongan angin, sehingga lebih cocok dalam penggunaan visualisasi aliran. Selain itu, terowongan air pada umumnya lebih murah dan mudah dalam pembangunannya. (Erm & Ol, n.d.).

Terowongan air sendiri adalah sebuah fasilitas eksperimen untuk mempelajari perilaku geometri benda dalam fluida. Terminologi dari terowongan air memiliki hubungan erat dengan terowongan angin dan saling berbagi komponen satu sama lain (Saeed et al., 2018). Terowongan air terbukti optimal dalam melakukan percobaan visualisasi perilaku fluida atau Particle Image Velocimetry (PIV)(Anwar et al., 2018; Saeed et al., 2018). Visualisasi dari perilaku fluida pada geometri dapat menjadi referensi dalam menganalisis sifat geometri pada keadaan fluida tertentu. Oleh karena itu, sebuah terowongan air yang dapat memberikan visualisasi terhadap berbagai fenomena tersebut dapat dijadikan objek pengembangan.

Pengembangan desain geometri kendaraan baik udara, laut maupun udara membutuhkan pertimbangan perilaku geometri kendaraan dalam kondisi lingkup fluida (Hucho, 1987). Metode eksperimen menggunakan pengujian langsung terhadap desain kadangkala membutuhkan biaya besar, sebagai contoh pengujian desain pesawat dalam bentuk *prototype*. Oleh karena itu pengujian secara eksperimen menggunakan terowongan angin ataupun air bisa dilakukan untuk mengurangi biaya pengembangan.

Metode CFD memiliki keunggulan dalam kecepatan dan biaya yang murah, namun di sisi lain penghitungan numerik tanpa data empiris sulit untuk dijadikan pertimbangan dalam pemilihan desain. Penggunaan terowongan angin dan terowongan air telah menjadi jembatan yang menghubungkan perhitungan numerik

CFD dan juga pertimbangan dalam pengujian empiris terhadap geometri kendaraan. Terowongan angin atau terowongan air dapat dibangun dengan skala yang lebih kecil dari benda asli, namun dapat memiliki hasil perhitungan yang ekuivalen dengan model pada skala asli dengan menggunakan manipulasi keadaan fluida yang memenuhi perhitungan non-dimensionalnya (Cattafesta et al., 2010).

Berbagai geometri benda bergerak pada masa kini dirancang untuk dapat bekerja optimal dalam rezim kecepatan *subsonic* dalam area *incompressible*. Berbagai geometri terutama dalam bidang otomotif /transportasi seperti mobil, kereta cepat, dan benda lainnya bergerak dalam rezim kecepatan *Subsonic incompressible* pada 0-371 km/h atau di bawah *Mach* 0,3. Terowongan air kecepatan rendah dapat dirancang bangun untuk memiliki karakteristik *subsonic incompressible* yang artinya memiliki karakteristik yang sama dengan fluida udara pada kecepatan tersebut. Pemenuhan karakteristik tersebut dapat dilakukan dengan melakukan uji non-dimensional dengan menggunakan Reynold Number. Pemilihan karakteristik kecepatan ini didasari terhadap tingkat kesulitan rancangan dan juga biaya pembangunan fasilitas yang lebih tinggi karena perlu menangani beban yang semakin besar (Cattafesta et al.).

Hubungan CFD sebagai acuan desain eksperimen sudah seringkali digunakan sebagai langkah awal pengembangan. Berbagai desain yang perlu keakuratan bentuk dan dimensi geometri yang akan berinteraksi dengan fluida menjadi sasaran utama dalam penggunaan CFD untuk validasi desain eksperimen. Metode pengembangan desain menggunakan CFD untuk terowongan angin juga digunakan oleh (Zhu et al., 2019) untuk memilih variasi desain terowongan angin berdasarkan desain sebelumnya untuk mendapatkan desain paling optimal. Hal tersebut menjadi rujukan dalam proses pengembangan desain terowongan air ini dengan bergantung terhadap hasil yang telah diuji secara numerik melalui CFD.

Penggunaan geometri primitif untuk melakukan perbandingan perilaku fluida pada satu model CFD dengan model CFD lain atau dengan model eksperimen sudah menjadi salah satu metode validasi desain CFD yang lumrah. Melakukan perbandingan dinamika nilai *coefficient of drag* dan *coefficient of lift* menjadi salah satu metode validasi yang dipilih untuk mendapatkan hasil validasi secara kuantitatif numerik (Erm & Ol, n.d.).

Terdapat berbagai aplikasi CFD yang telah terdistribusi dalam lingkungan akademik maupun komersial. Berbagai aplikasi CFD berbayar seperti ANSYS Fluent, Dassault Simulia, Altair Engineering, COMSOL digunakan pada bidang komersial seperti otomotif, riset, penerbangan dan lainnya. Aplikasi CFD berbayar seringkali memiliki harga yang cukup mahal untuk bidang akademisi, terlebih untuk akademisi individual. Selain aplikasi CFD berbayar, terdapat pula aplikasi CFD gratis yang dapat digunakan dalam berbagai keperluan tergantung lisensi yang dimilikinya. CFD gratis seperti OpenFoam, DualSPHysic, FluidX3D dan banyak aplikasi CFD lainnya tidak dikenakan biaya dan Batasan apapun dalam penggunaannya. Aplikasi CFD yang akan digunakan dalam penelitian ini adalah DualSPHysic, hal ini dikarenakan metode penghitungan CFD yang digunakan adalah SPH, yang merepresentasikan fluida sebagai partikel mikro dengan resolusi tertentu yang di-*track* pergerakannya dalam waktu tertentu dalam bidang 3d terbatas. Metode yang digunakan cocok dalam menganalisis fluida air yang secara visual berperilaku seperti partikel.

Dualsphysic yang menggunakan metode SPH memiliki kelebihan dalam melakukan kalkulasi perilaku fluida dengan prinsip hidrodinamis. Hal ini dikarenakan metode SPH memiliki keunggulan dalam melakukan kalkulasi mengenai interaksi antar partikel fluida dalam domain dibandingkan dengan metode FVM seperti yang dimiliki oleh ANSYS ataupun OpenFoam (Moradi et al., 2025). Kekurangan tersendiri dari metode ini adalah besarnya beban komputasi yang dibutuhkan dalam melakukan kalkulasi dibandingkan dengan metode FVM ataupun LBM, namun hal ini dapat diantisipasi dengan menggunakan perangkat GPU (*Graphic Procesing Unit*) yang memungkinkan Dualsphysic dikalkulasi secara parallel sehingga mengurangi waktu kalkulasi (J.C., 2024).

Desain terowongan air yang optimal dapat merujuk pada kesamaan karakteristik dinamis yang dapat diberikan oleh terowongan air dengan karakteristik perilaku geometri uji dalam skala penuh. Intensitas turbulensi menjadi salah satu kunci terhadap keakuratan hasil pengujian geometri pada terowongan air. Intensitas turbulensi merupakan karakteristik aliran yang berhubungan langsung dengan profil kecepatan pada bidang uji. Kedua parameter tersebut lumrah menjadi tolak ukur terhadap kualitas dari terowongan air itu sendiri. (Erm & Ol, n.d.)

Beberapa prinsip kerja dari terowongan air yang pernah dibuat seperti terowongan air dengan prinsip mengikuti aliran gravitasi (Anwar et al., 2018), dan juga menggunakan aliran yang dihasilkan oleh pompa dengan atap terbuka (Zahari & Dol, 2015), (Saeed et al., 2018). Terowongan yang akan dibahas pada tulisan ini akan menggunakan prinsip hidrodinamik (Asrori, 2021). Prinsip ini dipilih karena penerapannya mudah dalam mencapai kecepatan yang sangat rendah untuk kepentingan visualisasi aliran.

Berdasarkan hasil observasi tersebut, pengembangan desain geometri kendaraan, baik udara, laut, maupun darat, memerlukan pemahaman mendalam tentang perilaku mereka dalam fluida. Sementara metode eksperimental langsung mahal dan memakan waktu, Computational Fluid Dynamics (CFD) menawarkan alternatif yang lebih cepat dan murah. Untuk menjembatani kesenjangan antara CFD dan pengujian empiris, terowongan angin dan terowongan air digunakan, memungkinkan pengujian skala kecil dengan hasil yang ekuivalen. Terowongan air, khususnya, sangat efektif untuk visualisasi aliran fluida dan mempelajari fenomena seperti vortex dan laminar flow, terutama pada rezim kecepatan subsonik dan rendah. Desain terowongan air yang optimal mengedepankan keseragaman aliran dan konsistensi parameter eksperimen, dan sering divalidasi dengan CFD (seperti DualSPHysics yang cocok untuk simulasi air sebagai partikel). Prinsip hidrostatik dipilih untuk terowongan air ini karena kemudahannya dalam mencapai kecepatan rendah yang ideal untuk visualisasi, memanfaatkan sifat difusi tinta dalam air untuk analisis detail. Maka dari itu, akan penelitian terkait rancang bangun prototipe terowongan air perlu dilakukan. Pengembangan desain terowongan air kecepatan rendah dengan software CFD DualSPHysics menjadi topik utama dalam pembahasan ini.

1.2. Identifikasi Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, dapat diidentifikasi beberapa masalah sebagai berikut:

1. Terowongan air dapat menjadi jembatan antara CFD dan pengujian empiris berupa purwarupa dengan biaya yang lebih murah.

2. Terowongan air dapat menyediakan kondisi yang semirip mungkin dengan perilaku fluida yang menimpa kendaraan dalam kecepatan maupun tekanan udara tertentu.
3. Terowongan air dapat menjadi alat visualisasi aliran dengan menggunakan metode pewarnaan, laser maupun *particle image velocimetry*.
4. Mayoritas kendaraan masa kini berada dalam rezim kecepatan *subsonic* dan *incompressible* sehingga cocok dalam pengujian terowongan air kecepatan rendah.
5. Uji non-dimensional menjadi salah satu alat dalam memprediksi perilaku geometri terhadap fluida pada keadaan yang berbeda-beda
6. Pengembangan desain terowongan air berfokus pada pencarian desain terowongan air yang memiliki intensitas turbulensi terendah menggunakan software CFD Dualsphysic.
7. Software CFD Dualsphysic memiliki prinsip smoothed particle hydrodynamic yang sesuai dengan perilaku fluida cair berupa air.
8. Software CFD Dualsphysic dapat diatur untuk memenuhi *boundary condition* yang sesuai dengan kasus pengembangan terowongan air.
9. Software CFD Dualsphysic dapat mensimulasikan perilaku hidrodinamis menggunakan pendekatan interaksi antar partikel dalam domain.
10. Software CFD Dualsphysic dapat mensimulasikan karakteristik aliran berupa kecepatan partikel, posisi dari setiap partikel, sehingga dapat menghasilkan data profil kecepatan, intensitas turbulensi, reynold number dan berbagai karakteristik aliran lainnya.

1.3.Pembatasan Masalah

Berdasarkan identifikasi masalah di atas, permasalahan yang dibahas dalam penelitian ini dibatasi pada :

1. Pengujian dimensi benda uji terbatas pada seksi uji berbentuk penampang persegi berdimensi 20 cm x 20 cm dengan panjang seksi uji 1 meter dan 2 meter.
2. Pengujian terowongan air akan terbatas pada pengujian satu fasa menggunakan fasa air dengan massa jenis 1000 kg/m^3 , nilai viskositas

kinematis yang digunakan adalah 8.179×10^{-4} , yang berada pada suhu udara 30°C .

3. Terowongan air diasumsikan memiliki tekanan hidrostatik yang tetap dan kontinu untuk semua model pada ketinggian kolom air (*head total*) setinggi 40 cm, atau setara dengan 6 cm di atas pipa terowongan air.
4. Model terowongan air di analisis pada *timestep* yang sama, yaitu pada detik ke 5 untuk semua hasil simulasi CFD Dualsphysic.
5. *Water tunnel* belum memiliki perangkat instrument pengukuran benda uji (*scale*).
6. Kecepatan fluida air akan ditentukan berdasarkan nilai reynold number yang didapatkan untuk menghasilkan aliran dengan karakteristik laminar dan turbulensi pada air dalam pipa.
7. Terowongan air mengandalkan gravitasi, tekanan hidrostatik dari air itu sendiri untuk menggerakkan sistem.
8. Variasi yang digunakan dalam mencapai kriteria desain yang diinginkan akan dilakukan dengan melakukan variasi kontraksi pada bidang horizontal ,pemanjangan seksi uji, pengaturan diameter outlet, dan penambahan *honeycomb*.
9. Merancang prototipe terowongan air yang berfungsi dan mengidentifikasi karakteristik aliran fluida di dalamnya terbatas pada kecepatan yang didapatkan, profil kecepatan fluida pada seksi uji, dan persebaran intensitas turbulensi dalam seksi uji.
10. Analisis karakteristik terowongan air terbatas pada perbandingan model CFD dengan keadaan eksternal flow pada skala penuh. Karakteristik tersebut mencakup profil kecepatan, intensitas turbulensi, kesamaan karakteristik dinamis yaitu bilangan Reynold serta kesamaan karakteristik interaksi fluida dengan geometri dalam hal koefisien gesek (Cd) dan koefisien angkat (Cl).

1.4. Perumusan Masalah

Berdasarkan pembatasan masalah di atas, masalah pada penelitian ini dapat dijabarkan sebagai berikut :

1. Bagaimana melakukan pengembangan desain terowongan air yang dapat memiliki persamaan karakteristik terbaik dengan model skala penuh?
2. Bagaimana mengimplementasikan software CFD Dualsphysic dengan prinsip *smoothed particle hydrodynamic* untuk mengevaluasi dan mengeliminasi desain terowongan air demi mendapatkan performa visualisasi yang optimal?

1.5. Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan desain terowongan air kecepatan rendah dengan kriteria berikut :

1. Mengidentifikasi karakteristik desain terowongan air pada desain terowongan air, dan menganalisis perbedaan perilaku dari masing-masing terowongan air yang dikembangkan.
2. Melakukan analisis dengan perangkat lunak CFD Dualsphysic untuk mensimulasikan berbagai desain terowongan air dan memilih desain terbaik melalui metode eliminasi.
3. Menentukan desain terowongan air terbaik berdasarkan kualitas yang berupa intensitas turbulensi yang rendah, vortisitas aliran, dan kecepatan aliran yang dapat dikendalikan.
4. Menganalisis kualitas desain yang telah dikembangkan terbatas pada intensitas turbulensi, kesamaan karakteristik dinamis yaitu nilai reynold number, serta kesamaan karakteristik dalam interaksi fluida dengan geometri dalam hal ini menggunakan Ahmed Body
5. Melakukan validasi desain terowongan air dalam memvisualisasikan aliran fluida pada model kendaraan dengan menggunakan metode pewarnaan dan perbandingan dengan model CFD.

1.6. Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat:

1. Merancang bangun terowongan air kecepatan rendah yang dapat menyediakan keadaan fluida yang menyerupai keadaan nyata kendaraan pada skala yang disediakan.
2. Merancang bangun sebuah terowongan air berprinsip hidrostatis yang dapat digunakan untuk visualisasi aliran.
3. Dapat menjadi fasilitas pengujian yang dapat dikembangkan untuk mengukur perilaku geometri kendaraan pada kondisi fluida tertentu sehingga dapat didapatkan data yang empiris dan selaras dengan pengujian numerik CFD.
4. Dapat menjadi bahan pembelajaran CFD bagi mahasiswa lain di lingkungan teknik mesin UNJ.

