

**PENGARUH DIAMETER *NOZZLE OUTLET* DAN SUDUT KEMIRINGAN
INLET TERHADAP GAYA DORONG *WATER JET***

SKRIPSI

Diajukan untuk Memenuhi Persyaratan

Memperoleh Gelar Sarjana Teknik pada Departemen Teknik Sistem Perkapalan
Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin



NUR ASYAH ASSAHRAH

D091171305

DEPARTEMEN TEKNIK SISTEM PERKAPALAN

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS HASANUDDIN

2022

**PENGARUH DIAMETER *NOZZLE OUTLET* DAN SUDUT KEMIRINGAN
INLET TERHADAP GAYA DORONG *WATER JET***

SKRIPSI

Diajukan untuk Memenuhi Persyaratan

Memperoleh Gelar Sarjana Teknik pada Departemen Teknik Sistem Perkapalan
Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin



NUR ASYAH ASSAHRAH

D091171305

DEPARTEMEN TEKNIK SISTEM PERKAPALAN

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS HASANUDDIN

2022

LEMBAR PENGESAHAN

**PENGARUH DIAMETER *NOZZLE OUTLET* DAN SUDUT KEMIRINGAN
INLET TERHADAP GAYA DORONG *WATER JET***

**Disusun dan diajukan oleh:
NUR ASYAH ASSAHRAH
D091171305**

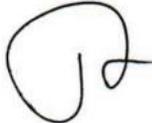
Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka
Penyelesaian Studi Program Sarjana Program Studi Teknik Sistem Perkapalan
Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin
Pada Tanggal 18 Oktober 2022

Menyetujui,

Pembimbing Utama,

Pembimbing Pendamping,


Andi Haris Muhammad, ST., MT., Ph.D
NIP. 196904042000031002


Muhammad Iqbal Nikmatullah, ST., MT.
NIP.198701312019031007

Ketua Departemen Teknik Sistem Perkapalan,


Dr. Eng Faisal Mahmud, ST., M.Inf.Tech., M.Eng
NIP. 198102112005011003

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Nur Asyah Assahrah

NIM : D091171305

Program Studi : Teknik Sistem Perkapalan

Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulis saya yang berjudul:

Pengaruh Diameter *Nozzle Outlet* dan Sudut Kemiringan *Inlet*
Terhadap Gaya Dorong *Water Jet*

Adalah karya tulis saya sendiri dan bukan merupakan pengambil alihan tulisan orang lain bahwa skripsi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya sendiri.

Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan skripsi ini hasil karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Gowa, 18 Oktober 2022

Yang membuat pernyataan,



Nur Asyah Assahrah

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah rabbil 'alamiin puji syukur kepada Allah SWT atas limpahan rahmat dan karunia-Nya sehingga penelitian ini dapat terselesaikan. Berbagai macam kendala telah penulis lewati dalam proses penyelesaian skripsi ini, namun dapat terselesaikan dengan baik berkat pertolongan dan hidayah-Nya.

Penelitian ini merupakan persyaratan untuk menyelesaikan studi di Departemen Teknik Sistem Perkapalan, Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin. Penulis menyadari bahwa skripsi yang berjudul “Pengaruh Diameter *Nozzle Outlet* dan Sudut Kemiringan *Inlet* Terhadap Gaya Dorong *Water Jet*” ini masih terdapat banyak kekurangan dan kesalahan di dalamnya. Namun, terlepas dari segala kekurangan tersebut penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Allah SWT sehingga penulis bisa menyelesaikan tugas akhir ini dan atas segala pertolongan-Nya.
2. Rasulullah Muhammad SAW.
3. Asruddin Untung, S.E. dan Sulviana selaku orang tua yang senantiasa memberikan doa, dukungan materi, dan segala hal yang pada akhirnya membuat penulis bisa menjalankan perkuliahan dengan baik.
4. Ahmad Jenar, Nurul Fashah Fajria, Muh. Baqir Taqiuddin, Nur Aqilah Shalihah, dan Nur Afiqah Shakira, selaku saudara penulis.
5. Bapak Andi Haris Muhammad, S.T., M.T, Ph.D selaku pembimbing 1 dan Bapak Muhammad Iqbal Nikmatullah, S.T., M.T. selaku pembimbing 2 yang telah meluangkan banyak waktu untuk membimbing dan memberikan arahan terkait penelitian ini.
6. Bapak M. Rusydi Alwi, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing akademik yang senantiasa memberikan sarannya selama proses perkuliahan.
7. Bapak Ir. Zulkifli, M.T. selaku dosen Teknik Sistem Perkapalan yang telah banyak memberikan dukungan dan motivasi dalam proses penyelesaian skripsi ini.
8. Seluruh dosen dan staf Departemen Teknik Sistem Perkapalan Universitas

Hasanuddin.

9. Muh. Aditya Dwi Syandhy, S.T. yang senantiasa mendoakan penulis, memberi dukungan, semangat, dan menemani penulis baik suka maupun duka.
10. Pihak-pihak yang telah berjasa dan telah membantu penulis dalam proses penyelesaian skripsi ini.

Penulis berharap dengan segala kekurangan yang terdapat dalam skripsi ini bisa menjadi pembelajaran untuk penelitian di masa yang akan datang agar menjadi lebih baik lagi. Tentu saja penulis masih sangat membutuhkan kritik dan saran dari para pembaca untuk bisa menjadi bahan bagi penulis dalam proses pbenahan diri.

Gowa, September 2022

Nur Asyah Assahrah

DAFTAR ISI

SAMPUL	ii
LEMBAR PENGESAHAN	ii
LEMBAR PERNYATAAN	iii
ABSTRAK.....	x
<i>ABSTRACT</i>	xi
KATA PENGANTAR	iv
DAFTAR ISI.....	vi
DAFTAR GAMBAR	viii
DAFTAR TABEL.....	ix
BAB 1. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Batasan Masalah	3
1.4 Tujuan Penelitian	3
1.5 Manfaat Penelitian	3
1.6 Sistematika Penulisan.....	4
BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 <i>Water jet Propulsion System (WPS)</i>	5
2.2 Gaya Dorong (<i>Thrust</i>)	6
2.4 Rasio Kecepatan <i>Inlet</i> dan <i>Outlet</i> (<i>Vu</i>).....	8
2.5 Konsep <i>Computational Fluid Dynamic (CFD)</i>	8

2.6 Model Viskos	13
BAB 3. METODE PENELITIAN	18
3.1 Tempat dan Waktu Penelitian	18
3.2 Prosedur Penelitian.....	18
3.3 Diagram Alir Penelitian	20
BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN	21
4.1 Gambaran Umum	21
4.2 Tahap Pelaksanaan	21
4.3 Validasi	30
4.5 Hasil Simulasi CFD dan Pembahasan	31
BAB 5. PENUTUP	38
5.1 Kesimpulan	38
5.2 Saran	38
DAFTAR PUSTAKA	39
LAMPIRAN	
Lampiran 1	Perhitungan <i>Thrust Water Jet</i> dan <i>Thrust Impeller</i>
Lampiran 2	Perhitungan Dimensi <i>Water Jet</i>
Lampiran 3	Desain Konfigurasi Dimensi <i>Water Jet</i>
Lampiran 4	Proses <i>Modeling</i> Menggunakan <i>Solidworks</i>
Lampiran 5	Hasil Simulasi Menggunakan <i>Ansys CFX R2 2020</i>

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Contoh <i>water jet</i>	6
Gambar 3.2 Diagram alir.....	20
Gambar 4.1 Desain <i>water jet</i>	22
Gambar 4.2 Desain <i>impeller</i>	22
Gambar 4.3 Proses <i>modeling</i> menggunakan <i>solidworks</i>	24
Gambar 4.4 Simulasi CFX pada <i>Ansys R2 2020</i>	25
Gambar 4.5 <i>Boundary condition</i>	26
Gambar 4.6 Hasil <i>meshing</i>	27
Gambar 4.7 Domain <i>set up</i>	27
Gambar 4.8 Visualisasi aliran pada tahap <i>result</i>	30
Gambar 4.9 Grafik nilai <i>thrust</i> hasil simulasi CFD	31
Gambar 4.10 Grafik hubungan antara <i>thrust water jet</i> dan <i>thrust impeller</i> dengan diameter <i>nozzle outlet</i>	33
Gambar 4.11 Grafik nilai <i>velocity hasil simulasi CFD</i>	34

DAFTAR TABEL

Tabel 3.2 Parameter desain <i>impeller</i>	19
Tabel 4.1 Parameter desain <i>water jet</i>	23
Tabel 4.2 Kondisi fisik dan aliran pada domain <i>wall</i>	28
Tabel 4.3 Kondisi domain <i>impeller</i>	28
Tabel 4.4 Kondisi domain <i>stator</i>	29
Tabel 4.5 Validasi untuk nilai <i>thrust</i>	30
Tabel 4.6 Nilai <i>thrust</i> hasil simulasi CFD	32
Tabel 4.7 Nilai <i>velocity</i> hasil simulasi CFD	34
Tabel 4.8 Nilai V_u	36

**PENGARUH DIAMETER *NOZZLE OUTLET* DAN SUDUT KEMIRINGAN
INLET TERHADAP GAYA DORONG *WATER JET***

Nur Asyah Assahrah ¹⁾

Andi Haris Muhammad ²⁾

Muhammad Iqbal Nikmatullah ²⁾

¹⁾ Mahasiswa Teknik Sistem Perkapalan FT-UH

²⁾ Dosen Teknik Sistem Perkapalan FT-UH

email: asyahassahrah@gmail.com

ABSTRAK

Sistem propulsi dengan menggunakan *water jet* dapat berpotensi meningkatkan kecepatan kapal. Aplikasi dari sistem propulsi *water jet* ini sering dijumpai terutama untuk kapal – kapal yang dirancang berkecepatan tinggi karena berdasarkan penelitian – penelitian yang telah dilaksanakan menunjukkan bahwa sistem propulsi *water jet* memiliki beberapa keuntungan yang tidak ada kaitannya dengan efisiensi propulsifnya. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh variasi diameter *nozzle outlet* dan sudut kemiringan *inlet* terhadap gaya dorong *water jet*. Berbagai variabel penentu seperti *thrust* dan kecepatan aliran diperoleh dari simulasi CFD menggunakan *Ansys CFX R2 2020*. Simulasi menggunakan 28 variasi model dengan perbedaan diameter *nozzle outlet* dan sudut kemiringan *inlet water jet*. Nilai *thrust* yang diperoleh untuk variasi model yang paling memenuhi kriteria performa yang baik yaitu sebesar 69969,6 N. Ini berarti ada sebesar 7443,8 N peningkatan nilai *thrust* yang dihasilkan dengan penggunaan *water jet*.

Kata kunci: *Water Jet Propulsion System, Computational Fluid Dynamic, Thrust.*

***THE EFFECT OF NOZZLE OUTLET DIAMETER AND INLET ANGLE ON
WATER JET THRUST***

Nur Asyah Assahrah ¹⁾

Andi Haris Muhammad ²⁾

Muhammad Iqbal Nikmatullah ²⁾

¹⁾ Student of Marine Engineering FT-UH

²⁾ Lecturer of Marine Engineering FT-UH

email: asyahassahrah@gmail.com

ABSTRACT

The propulsion system using a water jet can potentially increase the speed of the ship. The application of the water jet propulsion system is often found, especially for ships that are designed at high speed because based on research that has been carried out shows that the water jet propulsion system has several advantages that have nothing to do with propulsive efficiency. This study aims to determine the effect of variations in the diameter of the outlet nozzle and the angle of inlet slope on the thrust of the water jet. Various determinant variables such as thrust and flow velocity were obtained from CFD simulation using Ansys CFX R2 2020. The simulation used 28 variations of models with different diameters of outlet nozzles and angles of inlet water jet inlet. The thrust value obtained for the variation of the model that best meets the criteria for good performance is 69969.6 N. This means that there is a 7443.8 N increase in the thrust value generated by the use of a water jet.

Keywords: WaterJet Propulsion System, Computational Fluid Dynamic, Thrust.

BAB 1. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kapal patroli merupakan kapal yang telah diinstruksikan untuk melakukan Patroli Keselamatan Maritim secara rutin untuk melakukan pengawasan, penjagaan, dan penegakan hukum terkait keselamatan pelayaran di seluruh wilayah perairan Indonesia. Dalam proses pengembangannya, kapal patroli didesain untuk mencapai kecepatan yang optimal atau dapat dikatakan bahwa kecepatan yang tinggi sampai saat ini merupakan salah satu faktor utama yang harus dimiliki oleh kapal patroli. Salah satu cara untuk meningkatkan kecepatan pada suatu kapal adalah dengan mengubah sistem propulsinya [1].

Secara umum kapal yang bergerak di media air dengan kecepatan tertentu akan mengalami gaya hambat (*resistance*) yang berlawanan dengan arah gerak kapal tersebut. Besarnya gaya hambat yang terjadi harus mampu diatasi oleh gaya dorong kapal (*thrust*) yang dihasilkan dari kerja alat gerak kapal (*propulsor*) [2].

Sistem propulsi terdiri dari tiga komponen utama, yaitu mesin penggerak (*prime mover*), sistem transmisi (*gear box*), dan alat penggerak kapal (*propeller*). Pada kenyataannya, kombinasi komponen tersebut bukan merupakan sesuatu yang bersifat *deterministic* atau dapat diterapkan pada seluruh kapal, khususnya dalam hal pemenuhan daya penggerak yang diperlukan. Beberapa hal yang berpengaruh diantaranya adalah tipe lambung atau tipe sistem propulsi yang digunakan [3].

Pengoperasian kapal yang paling lazim adalah dengan menggunakan kendali baling-baling (*propeller*). Untuk melaju, kapal memanfaatkan daya dorong dari putaran baling-baling dan untuk berhenti, baling-baling tersebut diputar ke arah yang berlawanan. Penggunaan *propeller* sangat rentan dan rawan dengan kerusakan, baik retak maupun patah. Pada kapal berkecepatan tinggi, diperlukan performa kapal yang mampu beroperasi dengan cepat, aman, dan andal. Selain bentuk lambung, sistem propulsi merupakan sistem yang sangat mendukung performa kapal berkecepatan tinggi [1].

Sistem propulsi kapal merupakan salah satu faktor yang paling berpengaruh pada performa, olah gerak, dan pola pengoperasian kapal. Kapal patroli

membutuhkan sistem propulsi khusus untuk mendapatkan performa dan kecepatan yang sangat tinggi, dan tentunya memiliki bobot yang ringan [4].

Water jet merupakan salah satu sistem penggerak yang diaplikasikan pada kapal. Prinsip kerja *water jet* berupa mengambil air yang nantinya masuk ke dalam putaran *jet*/turbin untuk dihembuskan atau dilemparkan kembali keluar yang nantinya akan menjadi daya dorong kapal. Aplikasi dari sistem propulsi *water jet* ini sering dijumpai terutama untuk kapal-kapal yang dirancang berkecepatan tinggi karena berdasarkan penelitian-penelitian yang telah dilaksanakan menunjukkan bahwa sistem propulsi *water jet* memiliki beberapa keuntungan yang tidak ada kaitannya dengan efisiensi propulsifnya [5].

Kapal dengan sistem propulsi *water jet* adalah kapal yang menggunakan *water jet* sebagai *propeller* atau penggerak yang pengoperasiannya menggunakan air sebagai media penggerak sehingga kapal dapat bergerak sesuai dengan kecepatan yang diinginkan [6].

Untuk pengemudiannya, dapat dilakukan hanya dengan membelokkan arah aliran dari *jet nozzle*. Sistem kemudi *water jet* ini ditempatkan pada bagian dimana aliran keluar, hal ini dapat menyebabkan pengurangan hambatan tambahan, seperti hambatan gelombang dan hambatan bentuk [4].

Water jet mempunyai kelebihan lain seperti nilai *propulsive coefficient* yang cukup tinggi disertai dengan tingkat efisiensi yang cukup tinggi pula. *Propulsive coefficient* yang dapat dicapai sebesar 60 hingga 70 persen untuk kapal-kapal berkecepatan sangat tinggi dan menggunakan *water jet* [4].

Kapal berkecepatan tinggi memerlukan *power* yang cukup besar untuk beberapa alasan komersil dan tingkat *propulsive efficiency* yang tinggi akan menjadi suatu pertimbangan penting untuk aspek ekonomis dan dampak yang timbul pada kapal. Pemilihan jenis sistem propulsi ini tidak hanya bergantung pada desain tingkat kecepatan saja, akan tetapi juga ukuran dari sistem propulsinya. Dalam hal ini tentu saja sangat berhubungan dengan ukuran kapal dan *space* pemasangan mesin sehingga dapat diperoleh kapal yang memiliki efisiensi yang tinggi untuk standar kecepatan, *thrust*, dan *powering* serta sesuai dengan jenis, ukuran, fungsi, serta pola operasi dari kapal tersebut [4].

Berdasarkan uraian di atas, sistem propulsi dengan menggunakan *water jet* dapat berpotensi meningkatkan kecepatan kapal. Pada penelitian ini, penulis akan menganalisis pengaruh diameter *nozzle outlet* dan sudut kemiringan *inlet* terhadap gaya dorong *water jet* dengan menggunakan *software* CFD.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian diatas, dapat dirumuskan permasalahan yang ada, yaitu:

1. Bagaimana pengaruh diameter *nozzle outlet* dan sudut kemiringan *inlet* terhadap gaya dorong *water jet*?
2. Bagaimana rasio kecepatan inlet dan outlet pada sistem propulsi *water jet* akibat perubahan diameter *nozzle outlet* dan sudut kemiringan *inlet*?

1.3 Batasan Masalah

Berikut adalah batasan masalah pada penelitian ini:

1. Pengaruh *trim* diabaikan, simulasi dilakukan di air tenang.
2. Tidak diikutsertakan lambung/objek kapal dalam permodelan dan simulasi, yang disimulasikan hanya *water jet*.
3. Variasi dimensi *water jet* didasarkan pada penelitian terdahulu.
4. Diameter *inlet* tetap.

1.4 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan penelitian ini dilakukan yaitu sebagai berikut:

1. Mengetahui pengaruh diameter *nozzle outlet* dan sudut kemiringan *inlet* terhadap gaya dorong *water jet*.
2. Mengetahui rasio kecepatan *inlet* dan *outlet* pada sistem propulsi *water jet* akibat perubahan diameter *nozzle outlet* dan sudut kemiringan *inlet*.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat dilakukannya penelitian ini adalah:

1. Sebagai referensi untuk penggunaan *water jet* pada kapal.
2. Dapat menjadi referensi dalam penelitian selanjutnya yang berkaitan dengan masalah ini.

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan digunakan untuk mempermudah dalam menemukan gambaran dalam penulisan. Adapun sistematika penulisan dalam skripsi sebagai berikut:

BAB 1 PENDAHULUAN

Pada bab ini diuraikan latar belakang, rumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah, manfaat penelitian, dan sistematika penulisan.

BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

Pada bab ini diuraikan teori-teori yang berkaitan dengan *water jet* dan *thrust* yang dapat membantu dalam menyelesaikan masalah.

BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

Pada bab ini diuraikan penjelasan jenis metode penelitian yang digunakan untuk memperoleh data-data yang dibutuhkan dan cara penyelesaiannya.

BAB 4 PEMBAHASAN

Pada bab ini diuraikan hasil pengolahan data, hasil penelitian yang diperoleh dan pembahasan hasil penelitian tersebut.

BAB 5 PENUTUP

Bab ini akan disajikan secara singkat kesimpulan yang diperoleh dari pembahasan dan juga memuat saran-saran bagi pihak yang berkepentingan untuk pengembangan penelitian lebih lanjut.

BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 *Water jet Propulsion System (WPS)*

2.1.1 *Komponen Sistem Propulsi Water jet*

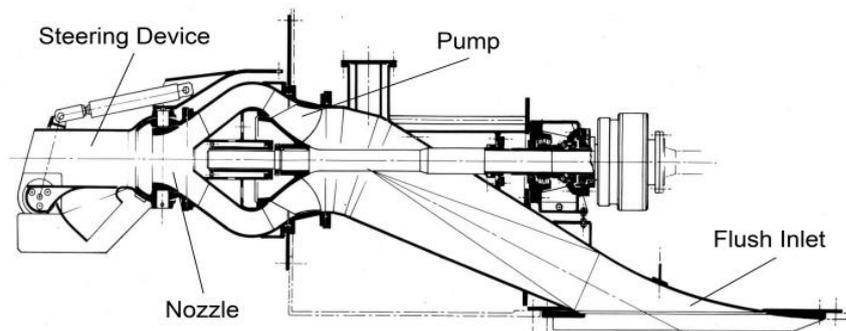
Sistem *water jet* pada umumnya terdiri atas sistem pompa (*pump system*) dan sistem saluran (*ducting system*). Sistem pompa berfungsi untuk mengubah tenaga mekanik menjadi tenaga hidrolis, sedangkan sistem saluran berfungsi untuk mengarahkan laju aliran dari lingkungan ke pompa dan dari pompa untuk kembali ke lingkungan. Sistem propulsi *water jet* memiliki komponen-komponen utama dalam pengoperasiannya, komponen-komponen tersebut meliputi sistem transmisi dan mesin penggerak, pompa, *thrust nozzle* yang dilengkapi dengan *deflector*, *thrust vectoring*, mekanisme pembalik, *diffuser*, *inlet*, *ducting* [1].

Seperti halnya propulsi dengan penggerak baling-baling konvensional, gaya dorong (*thrust*) yang dihasilkan *water jet* adalah dengan cara mempercepat sejumlah aliran fluida yang melalui sistem propulsi tersebut [3].

2.1.2 *Prinsip Kerja Water jet*

Dalam proses sistem propulsi *water jet*, fluida atau air dari lingkungan akan dihisap melalui *intake* sebagai lubang masuknya fluida yang ada di dasar kapal, kemudian laju aliran fluida yang terhisap akan dipercepat oleh actuator yang biasanya berupa pompa mekanis dan selanjutnya fluida disebarkan kembali ke lingkungan melalui *nozzle* sebagai lubang keluarnya fluida yang terletak di atas permukaan air. Semburan air melalui *nozzle* diatur oleh *deflector* untuk mengatur laju pergerakan kapal maju atau mundur sesuai dengan kecepatan yang diinginkan [1].

Pada karakteristik sistem propulsi *water jet*, penerapan prinsip reaksi hanya berbeda pada metode dan mekanisme yang digunakan untuk menghasilkan suatu aksi gerakan. Dengan adanya aksi gaya dorong akan menyebabkan kapal dapat bergerak ke depan dengan kecepatan tertentu dan reaksi dari fluida terdapat kapal akan menimbulkan tahanan [8].



Gambar 2.1 Contoh *water jet*

2.2 Gaya Dorong (*Thrust*)

Dalam pengukuran gaya dorong sistem penggerak *water jet*, pendekatan yang dilakukan adalah dengan menggunakan hukum kekekalan momentum dan energi untuk menghitung gaya dorong dari sistem propulsi *water jet*nya. Bersamaan dengan berkembangnya penggunaan sistem propulsi *water jet* di kapal, pengkajian yang lebih intensif dan mendalam telah dilakukan dan menghasilkan kesimpulan bahwa penggunaan teori momentum dasar saja tidak dapat dibenarkan karena teori ini mengabaikan pengaruh-pengaruh sekunder yang juga berperan dalam pencapaian efisiensi propulsive untuk dapat dibandingkan dengan *propeller* [7].

Secara garis besar, teori dasar momentum tetap dapat digunakan karena memuat hukum dasar untuk perhitungan sistem penggerak *water jet*. Tetapi, selanjutnya dalam penggunaan teori momentum dasar tersebut harus dikoreksi dengan pengaruh praktis di lapangan melalui pengujian model fisik. Gaya dorong merupakan aksi dari pompa yang mengakibatkan fluida mengalir melalui saluran dengan memberikan energi pada sistem, kemudian diubah oleh *nozzle* sehingga terjadi kenaikan momentum aliran [7].

Secara umum kapal yang bergerak di media air dengan kecepatan tertentu maka akan mengalami gaya hambat (*resistance*) yang berlawanan dengan arah gerak kapal tersebut. Besarnya gaya hambat yang terjadi harus mampu diatasi oleh gaya dorong kapal (*thrust*) yang dihasilkan dari kerja alat gerak kapal (*propulsor*). Pada kondisi yang sangat ideal, besarnya gaya dorong yang dibutuhkan mungkin sama besar dengan gaya hambat yang terjadi di kapal. Namun, kondisi tersebut sangat tidak realistis karena pada faktanya di badan kapal tersebut terjadi fenomena

hidrodinamis yang menimbulkan degradasi terhadap nilai besaran gaya dorong kapal [10].

Gaya dorong merupakan aksi dari pompa yang mengakibatkan fluida mengalir melalui saluran dengan memberikan energi pada sistem, kemudian dirubah oleh *nozzle* sehingga terjadi kenaikan momentum aliran.

Dimana resultan gaya (ΣF) merupakan penjumlahan dari semua gaya yang bekerja pada sistem analog dengan gaya dorong (T). Dengan adanya gesekan aliran pada permukaan bawah dari badan kapal maka akan menimbulkan *boundary layer* yang akan mempengaruhi profil kecepatan pada lubang *inlet*.

Dimana:

- T = Gaya dorong (N)
- \dot{m} = Laju aliran massa fluida (kg/s)
- ρ = Massa jenis fluida kerja (kg/m³)
- An = Luas penampang outlet *nozzle* (m²)
- Vj = Kecepatan aliran jet (m/s)
- Vi = Kecepatan aliran saluran inlet (m/s)

Adapun persamaan untuk menghitung *thrust impeller* yaitu[11]:

$$T = \rho Q(c_j - c_m) = \rho Q c_m (a - 1) \dots \dots \dots (2.1)$$

Dimana:

- ρ = Massa jenis fluida kerja (kg/m³)
- Q = debit aliran (m³/s)
- c_j = *jet velocity* pada *nozzle*
- c_m = *jet velocity* pada *impeller*
- a = *jet ratio*
- Dj = diameter *water jet* (m)
- D = diameter *impeller* (m)

Untuk memperoleh nilai c_j , c_m , dan a, digunakan persamaan di bawah ini:

$$c_j = 4Q/(\pi D_j^2) \dots \dots \dots (2.2)$$

$$c_m = 4Q/(\pi D^2) \dots \dots \dots (2.3)$$

$$a = (D/D_j)^2 \dots \dots \dots (2.4)$$

2.4 Rasio Kecepatan *Inlet* dan *Outlet* (V_u)

Pola aliran masuk *impeller* merupakan faktor penting yang mempengaruhi operasi yang aman dan efisien. Jika distribusi kecepatan pada bagian *inlet* tidak seragam pada saat *impeller* berputar, permukaan tekanan atau permukaan hisap *blade* akan dipengaruhi oleh aliran yang mengakibatkan peningkatan kerugian hidrolis pada *impeller*. Ini juga akan mengakibatkan perubahan pada kecepatan *inlet* dan sudut aliran yang menghasilkan pola liran yang buruk pada bagian yang berada di dekat saluran masuk *impeller*. Keseragaman distribusi kecepatan pada bagian yang terukur diwakili oleh koefisien distribusi kecepatan aksial V_u . Koefisien distribusi kecepatan aksial yang paling optimal adalah saat nilainya mendekati 100%. Persamaan yang digunakan untuk menghitung koefisien distribusi kecepatan aksial adalah sebagai berikut:

$$V_u = \left[1 - \frac{1}{u_a} \sqrt{\frac{\sum (u_{ai} - \bar{u}_a)^2}{m}} \right] \times 100\% \dots\dots\dots(2.5)$$

Dimana:

u_a = kecepatan *inlet pump* (m/s)

u_{ai} = kecepatan aksial setiap elemen dari bagian yang dihitung (m/s)

m = jumlah elemen

2.5 Konsep *Computational Fluid Dynamic* (CFD)

Computational Fluid Dynamics menggunakan metode numerik dan algoritma untuk menyelesaikan dan menganalisis masalah yang terlibat dalam aliran fluida, perpindahan panas, perpindahan massa dan yang terkait fenomena melalui pemodelan matematika (persamaan diferensial parsial), metode numerik (diskritisasi dan teknik solusi), alat perangkat lunak (*solvers, pre- and post-processing utilities*). CFD sangat berguna untuk menyelesaikan dasar-dasar persamaan yang memodelkan gerakan aliran. Mayoritas persamaan ini tidak memiliki solusi analitis. Untuk alasan ini, kami menggunakan analisis numerik dengan CFD. Tujuan dari alat ini adalah untuk menyelesaikan perkiraan (secara numerik) aliran persamaan dasar yang solusinya memberi kita gerakan dan

karakteristik lain dari aliran. Teknik-teknik ini mematahkan domain spasial dan waktu untuk mencapai *solution*.

Seperti pada persamaan matematis lainnya, persamaan dinamika fluida memerlukan variabel *input*-an untuk mendapatkan suatu nilai hasil. CFD memanfaatkan kondisi batas (*boundary condition*) pada domain fluida sebagai variabel yang di-*input* guna menjalankan persamaan tersebut. Sebagai contoh, ketika suatu model yang akan dianalisis melibatkan temperatur maka perhitungan yang dilakukan akan menggunakan persamaan energi atau konversi dari energi tersebut. Sehingga dapat dikatakan bahwa inisialisasi awal dari persamaan dinamika fluida adalah *boundary condition*.

Dalam prosesnya, metode yang digunakan dalam sebuah analisa data dapat berupa eksperimen maupun solusi numerik dalam hal ini CFD. Perbedaan tingkat akurasi eksperimen dengan CFD berdasarkan pada alat yang digunakan. Sedangkan, akurasi dari CFD bergantung pada kualitas diskritisasi yang digunakan. Diskritisasi merupakan persamaan yang digunakan untuk menghasilkan persamaan *continue* yang dapat di-*input* ke dalam komputer. Diskritisasi sendiri adalah proses untuk membagi suatu domain ke dalam bentuk *cell* atau *grid*. CFD disusun berdasarkan algoritma numerik yang mampu mengatasi masalah aliran fluida. Komponen-komponen yang dibutuhkan dalam algoritma numerik adalah model matematika dan metode diskritisasi. Terdapat tiga macam teknik solusi numerik yaitu beda hingga (*finite difference*), elemen hingga (*finite element*) dan metode *spectral*. Berikut penjelasan dari ketiga teknik tersebut:

Metode beda hingga bekerja dengan mengganti suatu persamaan differensial dengan syarat batas menjadi sebuah sistem persamaan linear yang dilakukan dengan mendiskretisasi daerah asal dan mengubah turunan pada persamaan.

Metode elemen hingga merupakan suatu metode yang membagi benda yang akan dianalisa menjadi beberapa bagian dengan jumlah hingga (*finite*). Bagian-bagian ini disebut elemen yang dihubungkan dengan nodal (*node*). Kemudian dibangun persamaan matematika yang menjadi representasi benda tersebut. Proses pembagian benda ini disebut *meshing*.

Metode *spectral* yaitu formulasi dari metode elemen hingga yang

menggunakan polinomial *Piecewise*. Metode *spectral* lebih memilih fungsi-fungsi basis *polynomial* berdimensi tinggi yang tidak seragam.

Pada proses penyelesaian masalah dengan menggunakan CFD-*Ansys CFX* terdapat tiga tahap yang harus dilalui, yaitu: *Pre-processor*, *Flow Solver (Solution)*, dan *Post-processor*.

1. Tahap *Pre-Processor*

Pada tahap ini data *diinput* mulai dari pembuatan domain serta pembuatan kondisi batas atau *boundary condition*. Ditahap ini juga sebuah benda atau ruangan yang akan dianalisa dibagi-bagi dengan jumlah *grid* tertentu atau sering juga disebut dengan *meshing*. Secara umum, tahap ini terdiri dari:

- a. Pemodelan kapal
- b. Pembuatan domain fluida
- c. Pemodelan kondisi batas
- d. Optimasi model yang optimum
- e. Pemilihan jumlah *grid* yang optimum

Data yang diperlukan pada batas tergantung dari tipe kondisi batas dan model fisik yang dipakai (turbulensi, persamaan energi, multifasa, dll). Data yang diperlukan pada kondisi batas merupakan data yang sudah diketahui atau data yang dapat diasumsikan. Tetapi asumsi data yang dipakai harus diperkirakan mendekati yang sebenarnya. *Input* data yang salah pada kondisi batas akan sangat berpengaruh pada hasil simulasi. Di bawah ini beberapa kondisi batas pada *Ansys CFX*:

a. *Velocity Inlet*

Kondisi batas *velocity inlet* digunakan untuk mendefinisikan kecepatan aliran dan besaran skalar lainnya pada sisi masuk aliran. Kondisi batas ini hanya digunakan untuk aliran *incompressible*.

b. *Mass Flow Inlet*

Nilai tekanan *gauge* digunakan sebagai tebakan awal oleh CFX, selanjutnya akan dikoreksi sendiri sejalan dengan proses iterasi. Metode spesifikasi arah aliran dan turbulen sama dengan kondisi batas *velocity inlet*.

c. *Pressure Inlet*

Data tekanan total (*absolute*), tekanan *gauge*, temperatur, arah aliran dan dari nilai tekanan operasi dan tekanan *gauge*. Metode spesifikasi arah aliran dan turbulensi sama dengan kondisi batas *velocity inlet*.

d. *Pressure Outlet*

Pola aliran ini harus dimasukkan nilai tekanan statik, temperatur aliran balik (*backflow*) dan besaran turbulen aliran balik kondisi batas yang dipakai pada sisi keluar fluida dan data tekanan pada sisi keluar dapat di ketahui nilai sebenarnya.

e. *Outflow*

Kondisi batas ini digunakan apabila data keluar pada sisi keluar tidak diketahui sama sekali pada sisi keluar di ekstrapolasi dari data yang ada pada aliran sebelum mencapai sisi keluar.

f. *Pressure Far-Field*

Kondisi batas ini untuk memodelkan aliran kompresibel *free-stream* yang mempunyai dimensi yang sangat panjang jarak antara *inlet* dan *outlet* jauh. Besaran yang dimasukkan adalah tekanan *gauge* bilangan *Mach*, temperatur aliran arah aliran dan besarnya turbulensi pada sisi keluar.

g. *Dinding (wall)*

Kondisi batas ini digunakan sebagai dinding untuk aliran fluida dalam saluran atau dapat disebut juga sebagai dinding saluran. Kondisi batas ini digunakan juga sebagai pembatas antara daerah fluida (cair dan gas) dan padatan.

h. *Symmetry dan Axis*

Pada panel kondisi batas untuk kedua kondisi batas ini tidak ada input data yang diperlukan. Kondisi batas simetri digunakan apabila model geometri kasus yang bersangkutan dan pola aliran pada model tersebut simetri. Kondisi batas ini juga dapat digunakan untuk memodelkan dinding tanpa gesekan pada aliran viskos. Sedangkan kondisi batas *axis* digunakan sebagai garis tengah (*centerline*) untuk kasus 2D *axisymmetry*.

i. *Periodic*

Kondisi batas ini hanya dapat digunakan pada kasus yang mempunyai medan aliran dan geometri yang periodik, baik secara translasi atau rotasi.

j. *Cell Zone: Fluid*

Kondisi batas ini digunakan pada kontinum model yang didefinisikan sebagai fluida. Data yang dimasukkan hanya material fluida, didefinisikan sebagai media berpori.

k. *Cell Zone: Solid*

Data yang dimasukkan hanya material padatan didefinisikan *heat generation rate* pada kontinum solid. Sedangkan, kondisi batas ini digunakan pada kontinum model yang didefinisikan sebagai padatan. Besaran yang dimasukan adalah tekanan *gauge* bilangan *Mach*, temperatur aliran arah aliran dan besarnya turbulensi pada sisi keluar.

l. *Porous*

Media Kondisi batas ini digunakan dengan cara mengaktifkan pipihan *porous zone* pada panel fluida. *Porous zone* merupakan pemodelan khusus dari zona fluida selain padatan dan fluida. Digunakan untuk memodelkan aliran yang melewati media berpori dan tahanan yang terdistribusi, misalnya *packed beds, filter papers, perforated plates, flow distributors, tube banks*.

2. Tahap *Flow Solver (Solution)*

Pada tahap ini dilakukan proses penghitungan data-data input dengan persamaan yang terlibat secara iteratif. Artinya penghitungan dilakukan hingga hasil menuju *error* terkecil atau hingga mencapai nilai yang konvergen. Pada tahap ini dilakukan perhitungan secara numerik untuk menyelesaikan masalah dengan CFD. Secara umum tahap ini terdiri dari:

- a. Penentuan kondisi batas
- b. Pemilihan jenis fluida
- c. Penentuan kecepatan model
- d. Pemilihan jumlah iterasi yang optimum
- e. Penentuan batas konvergensi yang optimum

3. Tahap *Post-Processor*

Tahap *Post-Processor* merupakan tahap yang digunakan untuk

menganalisis, visualisasi dan mempresentasikan hal interaktif sesuai dengan kasus yang sedang ditinjau. Hasil perhitungan diinterpretasikan ke dalam gambar, grafik bahkan animasi dengan pola warna tertentu. Secara umum tahap ini terdiri dari:

- f. Perhitungan nilai gaya
- g. Perhitungan distribusi kecepatan di sekitar badan kapal
- h. Perhitungan distribusi tekanan di sekitar badan kapal

2.6 Model Viskos

Sebelum menentukan model viskos, harus ditentukan dulu apakah aliran fluida yang akan disimulasikan termasuk dalam aliran laminar atau aliran turbulen dengan menghitung bilangan *Reynold* terlebih dahulu. Apabila termasuk aliran turbulen maka model turbulensi yang tersedia adalah:

1. Model *Spalart-Allmaras*
2. Model *k-epsilon*
 - a. *Standard*
 - b. *Renormalization-group* (RNG)
 - c. *Realizable*
3. Model *k-omega*
 - a. *Standard*
 - b. *Shear-stress transport* (SST)
 - c. Model *Reynold Stress* (RSM)
 - d. Model *Large Eddy Simulation* (LES)

Aliran turbulen dikenali dengan adanya medan kecepatan yang berfluktuasi. Fluktuasi kecepatan tersebut membawa berbagai besaran seperti momentum, energi, konsentrasi partikel sehingga besaran tersebut juga ikut berfluktuasi. Fluktuasi tersebut dapat terjadi pada skala kecil dan mempunyai frekuensi yang tinggi sehingga terlalu rumit untuk dihitung secara langsung pada perhitungan rekayasa praktis. Oleh karena itu, persamaan yang berhubungan dapat dirata-ratakan (*time-averaged*, *Ensemble-averaged*), atau dimanipulasi untuk menghilangkan fluktuasi skala kecil. Dengan demikian persamaan-persamaan

tersebut dapat lebih mudah untuk diselesaikan. Bagaimanapun juga, pada persamaan yang telah dimodifikasi tersebut terdapat tambahan variabel yang tidak diketahui, dan dibutuhkan model turbulensi untuk menentukan variabel-variabel tersebut.

Secara garis besar, model turbulensi dapat didekati dengan menggunakan dua pendekatan, yaitu:

- a. Berdasarkan *Reynolds Averaged-Navier Stokes (RANS)*
- b. Berdasarkan *Lsrge Eddy Simulation (LES)*

Kedua pendekatan tersebut sama-sama memerlukan model dengan besaran yang dirata-ratakan.

2.6.1 Model *Spalart-Allmaras*

Model *Spalart-Allmaras* merupakan model turbulensi dengan satu persamaan yang menyelesaikan model persamaan *transport* untuk *viskositas kinematic turbulent*. Bentuk dasar model *Spalart-Allmaras* hanya efektif pada model dengan bilangan *Reynolds* yang kecil. Model ini dapat digunakan untuk simulasi yang relatif kasar dengan ukuran *mesh* yang relatif besar dimana perhitungan aliran turbulen yang akurat bukan merupakan hal yang bersifat kritis. Namun, model ini tidak dapat digunakan untuk memprediksikan perubahan turbulensi isotropik yang homogen. Selain itu model ini juga sering dikritik karena ketidakmampuannya mengakomodasikan perubahan *length scale* secara cepat, misalnya pada kasus dimana aliran berubah secara tiba-tiba dari aliran dalam saluran (*wall bounded*) menjadi aliran bebas gesekan (*free shear flow*).

Untuk model *Detached Eddy Simulation (DES)*, otomatis muncul pada pilihan viscous khusus *solver 3D*. Model DES merupakan modifikasi dari model *Spalart-Allmaras*, dapat dipertimbangkan sebagai alternatif yang lebih praktis pengganti LES untuk memprediksi aliran dengan bilangan *Reynold* yang besar.

2.6.2 Model *k-epsilon*

Model ini merupakan model turbulensi yang cukup lengkap dengan dua persamaan yang memungkinkan kecepatan turbulen (*turbulent velocity*) dan skala panjang (*length scale*) ditentukan secara independen. Kestabilan dan akurasi yang

memadai untuk berbagai jenis aliran turbulen membuat model ini sering digunakan pada simulasi aliran fluida dan perpindahan panas.

Pada model RNG $k - \epsilon$ bentuk persamaan yang digunakan sama dengan model standar tetapi melibatkan beberapa perbaikan:

- a. Mempunyai besaran tambahan pada persamaan laju disipasi, epsilon, yang dapat meningkatkan akurasi untuk aliran yang terhalang secara tiba-tiba.
- b. Terdapat efek putaran pada turbulensi sehingga meningkatkan akurasi untuk aliran yang berputar.
- c. Menyediakan formula analitis untuk bilangan *Prandtl turbulent*.
- d. Menyediakan formula untuk bilangan *Reynolds* rendah

Model *realizable k-epsilon* merupakan pengembangan model yang relatif baru dan berbeda dengan model *k-epsilon* dalam dua hal:

- a. Terdapat formulasi baru untuk memodelkan viskositas turbulen.
- b. Sebuah persamaan untuk *epsilon* telah diturunkan dari persamaan untuk menghitung fluktuasi viskositas rata-rata.

Salah satu keterbatasan model ini adalah terbentuknya *viskositas turbulen non-fisik* pada kasus dimana domain perhitungan mengandung zona fluida diam dan berputar.

2.6.3 Model $k-\omega$

Model $k-\omega$ standar merupakan model yang memasukkan beberapa modifikasi untuk menghitung efek aliran pada bilangan *Reynolds* rendah, kompresibilitas dan penyebaran aliran geser. Model ini dapat diaplikasikan pada aliran dalam saluran maupun aliran bebas geseran.

Model $k-\omega$ SST dikembangkan untuk memadukan formulasi model $k-\omega$ standar yang stabil dan akurat pada daerah di dekat dinding dengan model $k-\epsilon$ yang mempunyai kelebihan pada aliran *free-stream* sehingga model $k-\omega$ SST ini lebih akurat dan *reliable* untuk cakupan jenis aliran yang lebih luas daripada $k-\omega$ standar [7].

2.6.4 Model *Reynolds Stress*

Model *Reynolds Stress* (RSM) merupakan model yang paling teliti dan

mendekati persamaan *Navier-Stokes (Reynolds-averaged)* dengan menyelesaikan persamaan *transport* untuk tegangan *Reynolds* bersama-sama dengan persamaan laju disipasi. Berarti dibutuhkan 4 persamaan transport tambahan pada aliran 2D dan 7 persamaan transport tambahan pada aliran 3D yang berarti proses komputasi lebih lama dan berat karena RSM menghitung efek dari kurva *streamline* pusaran, putaran dan perubahan tiba-tiba pada aliran dengan lebih teliti, maka RSM dapat memprediksi yang lebih akurat untuk aliran kompleks. Namun demikian, RSM tidak selalu memberikan hasil yang lebih baik dibandingkan dengan model yang lebih sederhana pada semua jenis aliran. Tetapi, RSM harus digunakan ketika pada aliran terdapat *anisotropi* dari tegangan *Reynolds* [7].

2.6.5 Model *Large Eddy Simulation (LES)*

Aliran turbulen dicirikan dengan adanya *vortex/eddies* dengan berbagai skala panjang dan waktu. Secara teoritis memungkinkan untuk menyelesaikan seluruh skala turbulen dengan pendekatan *Direct Numerical Simulation (DNS)*. Namun model DNS ini membutuhkan daya komputasi yang sangat besar dan mesh yang digunakan juga harus kecil sekali. Secara konsep LES berada diantara RANS dan DNS. Pada dasarnya vortex yang besar diselesaikan secara langsung pada LES sedangkan vortex yang kecil dimodelkan. Sehingga resolusi *mesh* lebih besar dibanding DNS namun masih lebih kecil dibandingkan dengan model yang lebih sederhana. Selain itu, model LES membutuhkan komputasi yang besar [6].

2.6.6 Model *Near Wall Treatment*

Pemodelan yang akurat di dekat dinding merupakan hal yang penting untuk kebanyakan aplikasi teknik karena perkiraan penurunan tekanan (*pressure drop*), separasi aliran, lapisan batas bergantung kepada kebenaran prediksi gaya geser lokal pada dinding tersebut. Model turbulensi *k-epsilon* dan RSM pada dasarnya cukup akurat untuk aliran turbulen pada daerah yang jauh dari dinding. Tetapi, tidak dapat memprediksi perilaku aliran di dekat dinding dengan akurat sehingga diperlukan *treatment* tambahan untuk membuat kedua model tersebut lebih akurat untuk memprediksi perilaku aliran di dekat dinding. [6]

2.7.7 Daya komputasi dan ciri solusi

Model *Spalart-Allmaras* merupakan model turbulensi yang membutuhkan daya komputasi paling kecil, karena hanya menyelesaikan satu persamaan saja. Model *k-epsilon* standar memerlukan daya komputasi yang lebih besar dari model *Spalart-Allmaras* karena harus menyelesaikan satu persamaan tambahan.

Model *k-epsilon realizable* hanya membutuhkan daya komputasi sedikit lebih tinggi dari model *k-epsilon* standar. Sedangkan model RNG *k-epsilon* membutuhkan waktu komputasi 10-15% lebih lama dibandingkan *k-epsilon* standar karena adanya besaran dan fungsi tambahan yang harus diselesaikan.

Model RSM membutuhkan memori daya komputasi tambahan dan waktu yang lebih lama dibandingkan model *k-epsilon* dan *k-omega* karena persamaan yang harus diselesaikan lebih banyak. Rata-rata model RSM membutuhkan 50-60% lebih lama [6].