



UNIVERSITAS INDONESIA

**EFEK INJEKSI GELEMBUNG UDARA TERHADAP
HAMBATAN TOTAL KAPAL MODEL**

TESIS

GUNAWAN

1006735662

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN
DEPOK
JANUARI 2012**



UNIVERSITAS INDONESIA

**EFEK INJEKSI GELEMBUNG UDARA TERHADAP
HAMBATAN TOTAL KAPAL MODEL**

TESIS

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Magister Teknik

GUNAWAN

1006735662

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN
DEPOK
JANUARI 2012**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

Tesis ini adalah hasil karya saya sendiri, dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk telah saya nyatakan dengan benar

Nama : Gunawan

NPM : 1006735662

Tanda Tangan :



Tanggal : 19 Januari 2012

HALAMAN PENGESAHAN

Tesis ini diajukan oleh

Nama : Gunawan

NPM : 1006735662

Program Studi : Teknik Mesin

Judul Tesis : Efek Injeksi Gelembung Udara Terhadap Hambatan Total Kapal Model

Telah berhasil dipertahankan di depan dewan penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Magister Teknik pada program studi Teknik Mesin Universitas Indonesia.

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Prof. Dr. Ir. Yanuar, M.Eng, M.Sc ()

Penguji I : Dr. Ir. Harinaldi, M.Eng ()

Penguji II : Dr. Ir. Warjito, M.Eng ()

Penguji III : Dr. Ir. Sunaryo, M.Sc ()

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 19 Januari 2012


KATA PENGANTAR

Puji syukur saya panjatkan kepada Allah SWT, atas berkat rahmat dan karunia-Nya, saya dapat menyelesaikan tesis ini tepat waktu. Penulisan tesis ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Magister Teknik Program Studi Teknik Mesin pada Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Penulis mengucapkan terima kasih yang sebanyak-banyaknya kepada:

1. Prof. Dr. Ir. Yanuar, M.Sc, M.Eng selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga dan pikiran untuk mengarahkan penulis dalam penyusunan tesis ini.
2. Dr. Ario Sunar Baskoro, S.T, M.T, M.Eng selaku dosen pembimbing akademis yang telah memberikan masukan-masukan dan nasihatnya.
3. Dr. Ir. Sunaryo, M.Sc; Dr. Ir. Harinaldi, M.Eng; Dr. Ir. Warjito, M.Eng selaku dosen penguji tesis ini, berkat masukan dan arahnya tesis ini menjadi lebih baik.
4. Bapak dan Ibu tercinta, kakak dan adik yang telah sabar memberikan nasihat dan dukungannya sehingga tesis ini terselesaikan.
5. Ari Marliasari Fadilah, S.Pd, calon istri tersayang yang dengan sabar selalu menemani dan memberikan semangat dan doa baik langsung maupun tidak langsung.
6. Muhammad Baqi, S.T rekan seperjuangan dalam penyusunan tesis ini.
7. Para sahabat, teman dekat dan pihak-pihak yang tidak bisa penulis sebutkan satu persatu.

Akhir kata, semoga Allah SWT berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah disebutkan di atas. Semoga tesis ini membawa manfaat untuk perkembangan ilmu pengetahuan.

Depok, 19 Januari 2012



Gunawan

HALAMAN PERNYATAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR UNTUK
KEPENTINGAN AKADEMIS

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang beretanda tangan di bawah ini:

Nama : Gunawan
NPM : 1006735662
Program Studi : Teknik Mesin
Departemen : Teknik Mesin
Fakultas : Teknik
Jenis Karya : Tesis

Demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia Hak Bebas Royalti Noneksklusif (Non-exclusive Royalty- Free Rights) atas karya ilmiah saya yang berjudul:

“Efek Injeksi Gelembung Udara Terhadap Hambatan Total Kapal Model ”

Beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan hak bebas royalti noneksklusif ini, Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalih media/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (database), merawat dan mempublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada tanggal : 19 Januari 2012

Yang menyatakan,



Gunawan

ABSTRAK

Nama : Gunawan

Program Studi : Teknik Mesin

Judul : Efek Injeksi Gelembung Udara Terhadap Hambatan Total Kapal Model

Pemanfaatan energi yang lebih efisien tanpa merusak lingkungan menjadi perhatian masyarakat dunia mengingat persediaan energi yang semakin terbatas, terutama pada alat transportasi seperti kapal. Pengurangan hambatan sangat penting untuk mengurangi konsumsi bahan bakar. Berbagai upaya telah dilakukan dalam pengurangan hambatan (drag reduction) dengan meningkatkan efisiensi penggunaan energi. Penggunaan gelembung udara menjadi salah satu hal yang menarik untuk diteliti. Tujuan dari penelitian ini yaitu mengetahui efek dari injeksi gelembung udara terhadap hambatan total kapal model. Kapal model tipe FPB 57 (kapal patroli cepat milik TNI AL) dengan panjang 2450 mm lebar 400 mm dan sarat kedalaman 190 mm dibuat dari fiber dengan permukaan halus dan pasang susunan pipa-pipa kecil pada 3 zona. Kapal model diuji tarik dengan variasi kecepatan dan posisi injeksi gelembung udara yang diberikan variasi tekanan injeksi udara. Pengukuran hambatan kapal dilakukan dengan menggunakan transducer load cell. Efek dari gelembung udara dapat mengurangi hambatan gesek dan pengaruh posisi gelembung udara juga mempengaruhi besarnya pengurangan hambatan pada kapal model tersebut. Dengan menggunakan teori kesamaan yang meliputi kesamaan geometris, kesamaan kinematik dan kesamaan dinamik dapat dibuat atau dihitung untuk ukuran kapal yang sesungguhnya. Hasil ditunjukkan dalam grafik hubungan koefisien hambatan total dengan variasi bilangan Froude pada setiap posisi peletakan injeksi gelembung udara. Lokasi penempatan pada zona 3 merupakan lokasi terbaik dengan nilai pengurangan hambatan sebesar 9%.

Kata kunci: gelembung udara, pengurangan hambatan, kapal model, load cell.

ABSTRACT

Name : Gunawan

Study Program : Mechanical Engineering

Title : Air Bubbles Injection Effects on Total Resistance of Ship Model

Energy Efficiency without pollute the environment to the attention of the world community. It is considering the limited energy supplies, particularly in transportation equipment such as vessel. Reducing resistance in the most important to reduce fuel consumption. Air bubble injection is one of promising technique to lower frictional resistance. The injected of air bubbles are supposed to somehow modify the energy inside the turbulent boundary layer and thereby lower the skin friction. The purpose of this study is to identify the effect of injected air bubbles on a navy fast patrol boat (FPB) 57 type model with main dimensions: $L = 2450$ mm, $B = 400$ mm and $T = 190$ mm. The influence of air bubbles injection location and bubble velocity will also be investigated. The ship model is pulled by an electric motor which speed can be varied and adjusted. The ship model resistance was precisely measured by a load cell transducer. Comparison of ship resistance with and without air bubble injection is shown on the graph as a function of the drag coefficient and Froude number. It showed that the location of air bubble injection behind the mid-ship (zone 3) is the best location to get the most effective drag reduction, and the drag reduction caused by the air bubbles could achieve of 9%.

Kata kunci: air bubble, drag reduction, vessel model, load cell.

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
PERNYATAAN ORISINALITAS.....	ii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iii
KATA PENGANTAR.....	iv
PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI.....	v
ABSTRAK	vi
ABSTRACT.....	vii
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR GAMBAR.....	x
DAFTAR TABEL	xi
DAFTAR LAMPIRAN	xii
I. PENDAHULUAN	
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Perumusan Masalah	3
1.3. Tujuan Penulisan	5
1.4. Manfaat Penelitian.....	5
1.5. Batasan Masalah.....	5
1.6. Kerangka Pemikiran.....	6
1.7. Hipotesis.....	7
1.8. Sistematika Penulisan.....	7
II. TINJAUAN PUSTAKA	
2.1. Hambatan Kapal.....	10
2.2. Hukum Kesamaan.....	17
2.3. Boundary Layer.....	25
2.4. Usaha-usaha Pengurangan Hambatan Kapal.....	27
2.5. Drag Reduction.....	32
2.6. Pembuatan Gelembung Udara.....	33
III. METODOLOGI PENELITIAN	
3.1. Spesifikasi Alat Uji.....	36
3.2. Prosedur Uji Tarik	44
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN	
4.1. Data Uji Tarik Kapal tanpa Gelembung Udara.....	47
4.2. Data Uji Tarik Kapal dengan Gelembung Udara Posisi 1.....	47
4.3. Data Uji Tarik Kapal dengan Gelembung Udara Posisi 2.....	48
4.4. Data Uji Tarik Kapal dengan Gelembung Udara Posisi 3.....	49
4.5. Pembahasan.....	50
V. KESIMPULAN	54

DAFTAR PUSTAKA

55

LAMPIRAN

57

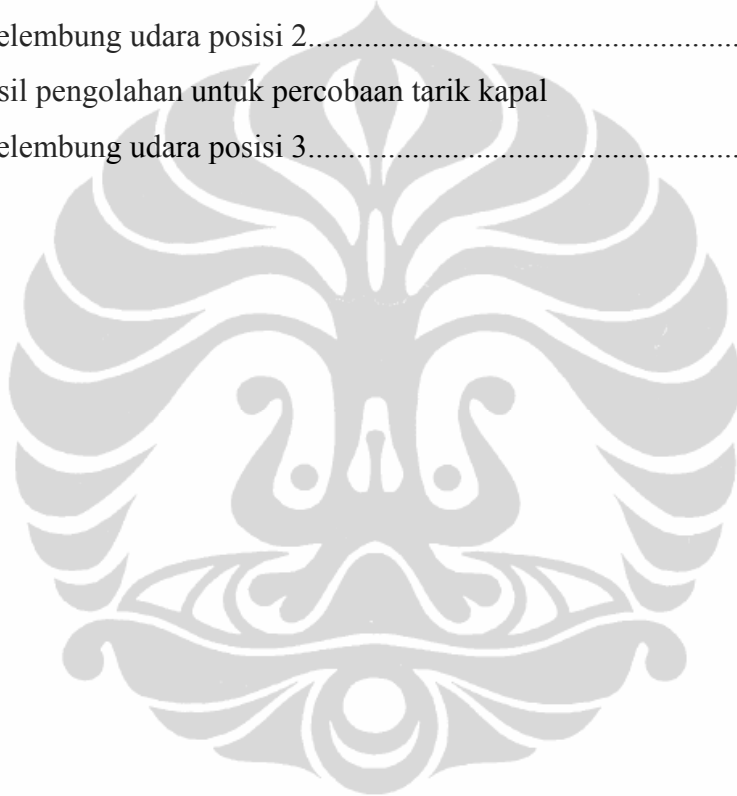


DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Komponen hambatan kapal	2
Gambar 1.2 Alur penentuan tema penelitian tentang pengurangan pemakaian energi pada pengoperasian kapal.....	3
Gambar 1.3 Fenomena gaya gesek.....	4
Gambar 2.1. Aliran di antara pelat y.....	12
Gambar 2.2 Standar koefisien hambatan gesek dari ATTC, Hughes dan ITTC..	17
Gambar 2.3 Lapisan Batas disepanjang permukaan bidang.....	26
Gambar 2.4 Metode 2D convex	29
Gambar 2.5 Metode 2D convergent-divergent.....	30
Gambar 2.6 Metode transverse wire.....	30
Gambar 2.7 Visualisasi pembentukan bubble dari berbagai metode.....	31
Gambar 2.8 Visualisasi pembentukan bubble dengan variasi kecepatan.....	32
Gambar 2.9 Tahapan pembentukan bubble dengan debit air 0.....	34
Gambar 2.10 Tahapan pembentukan bubble dengan debit air 2,5 liter per menit	35
Gambar 3.1. Eksperimental Setup.....	36
Gambar 3.2. Model kapal FPB 57 (fast patrol boat)	38
Gambar 3.3. Lines Plan dan Posisi Peletakan Nozzle	39
Gambar 3.4. Motor Penarik.....	40
Gambar 3.5 Kompresor udara.....	42
Gambar 3.6 AC Voltage Regulator.....	43
Gambar 3.7 Load Cell transducer.....	43
Gambar 4.1. Hubungan koefisien hambatan total dengan bilangan Froude.....	50
Gambar 4.2. Rasio hambatan total masing-masing peletakan injector	51
Gambar 4.3. Hubungan antara rasio hambatan total dengan ketebalan lapisan udara	52
Gambar 4.4. Hubungan antara rasio pengurangan hambatan (drag reduction) dengan bilangan Foude.....	53

DAFTAR TABEL

Tabel 1. Data hasil pengolahan untuk percobaan tarik kapal tanpa injeksi gelembung udara.....	47
Tabel 2. Data hasil pengolahan untuk percobaan tarik kapal dengan injeksi gelembung udara posisi 1.....	48
Tabel 3. Data hasil pengolahan untuk percobaan tarik kapal dengan injeksi gelembung udara posisi 2.....	48
Tabel 4. Data hasil pengolahan untuk percobaan tarik kapal dengan injeksi gelembung udara posisi 3.....	49



DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Jurnal Submitt	57
Lampiran 2. Data Pengujian Kapal Model.....	62



BAB I

PENDAHULUAN

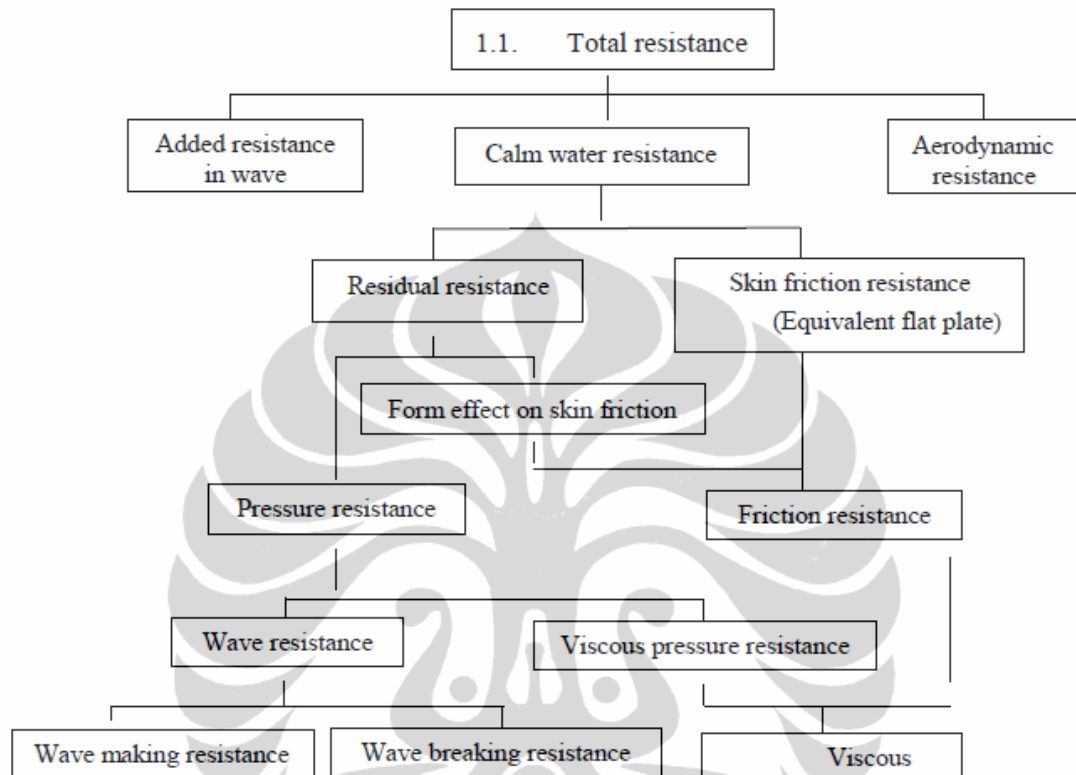
1.1 LATAR BELAKANG

Pemanfaatan energi yang lebih efisien tanpa merusak lingkungan menjadi perhatian masyarakat dunia mengingat persediaan energi yang semakin terbatas, terutama pada alat transportasi seperti kapal. Faktor *power-saving* menjadi prioritas utama bagi pemilik/*operator* kapal, sehingga pemakaian bahan bakar minyak (BBM) perlu diefisienkan. Diketahui bahwa kapal yang bergerak maju di permukaan air, disamping akan mengalami suatu gerakan juga akan mendapatkan suatu hambatan (*water resistance*). Hambatan yang ditimbulkan tersebut akan semakin besar jika kecepatan kapal bertambah.

Pengurangan hambatan sangat penting untuk mengurangi konsumsi bahan bakar. Model bentuk lambung kapal yang berada di bawah garis air sangat berpengaruh terhadap kerugian tahanan kapal dan efisiensi sistem propulsinya. Rasio kapal L/B , L/T , Δ/C_b , perubahan bentuk stream line, patahan, tonjolan, kecepatan dan pengalaman perancangannya sangat diperlukan untuk menghasilkan rancang bangun yang optimal. Pada dasarnya, untuk dapat berjalan dengan kecepatan tertentu, kapal harus mampu mengatasi hambatan yang terjadi. Hambatan-hambatan tersebut berupa hambatan gesek dan hambatan sisa. Komponen hambatan yang berpengaruh paling besar adalah komponen hambatan gesek. Berbagai upaya telah dilakukan dalam pengurangan hambatan (*drag reduction*) dengan meningkatkan efisiensi penggunaan energi. Penggunaan gelembung udara menjadi salah satu hal yang menarik untuk diteliti. Pengaruh pengurangan hambatan menggunakan gelembung udara menjadi salah satu metode yang menjanjikan sebagai bagian solusi dari masalah pengurangan pemakaian energi.

Hambatan kapal skala penuh tidak mudah untuk dilakukan pengukuran secara langsung. Para peneliti dalam mengestimasi besarnya hambatan kapal dengan bantuan pengujian kapal model. Hambatan kapal pada air tenang diklasifikasikan menjadi beberapa komponen, dimana masing-masing komponen

saling berpengaruh dan tidak bisa dilakukan pengukuran salah satu komponen tertentu saja. Konsep dari komponen hambatan kapal dapat dilihat pada gambar 1.1

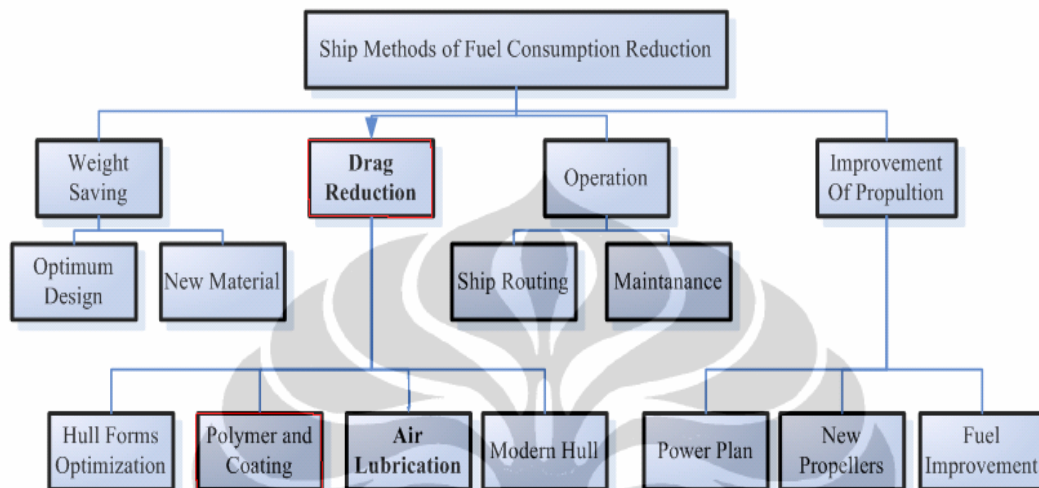


Gambar 1.1 Komponen hambatan kapal [1]

Pengurangan pemakaian energi pada pengoperasian kapal dapat dilakukan dengan berbagai cara, diantaranya yaitu dengan mengurangi hambatan yang terjadi. Hambatan pada kapal mempunyai peranan yang sangat signifikan terhadap besarnya pemakaian energi. Usaha pengurangan hambatan gesek menjadi sangat penting, hal ini dikarenakan hambatan gesek memiliki nilai yang cukup besar dibandingkan dengan nilai hambatan sisa, terutama untuk kapal-kapal kecepatan rendah maupun sedang seperti kapal kargo. Pengurangan hambatan gesek dapat dilakukan dengan berbagai metode, yaitu dengan optimasi bentuk lambung, penambahan zat polimer, penambahan bantalan udara dan modernisasi bentuk lambung.

Penelitian ini mengarah pada penggunaan gelembung udara untuk mengurangi hambatan gesek yang terjadi. Gelembung udara tersebut diinjek

pada lambung kapal bagian bawah (lunas kapal) pada daerah luasan tertentu. Gelembung udara tersebut diharapkan dapat mengurangi besarnya hambatan kapal.



Gambar 1.2. Alur penentuan tema penelitian tentang pengurangan pemakaian energi pada pengoperasian kapal [1].

Gambar 1.2 merupakan grafik metode pengurangan hambatan kapal. Dalam hal ini pengurangan hambatan kapal dapat dilakukan dengan berbagai macam cara. Namun, peneliti telah menetapkan dengan memilih metode penggunaan air lubricaed (penggunaan gelembung udara) dengan cara diinjek pada lambung kapal. Penambahan gelembung udara dapat mengurangi hambatan pada aliran turbulenta.

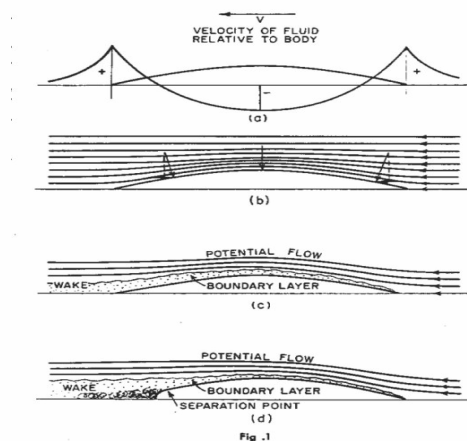
1.2 PERUMUSAN MASALAH

Sifat Tahanan Kapal sangat rumit, tidak memungkinkan dihitung secara teoritis. Untuk memperkirakan besarnya tahanan kapal peneliti harus melakukan percobaan. Percobaan umumnya dilakukan pada tangki tarik (towing *tank*) dilengkapi kereta penarik (towing *carriage*) yang bergerak secara mekanis dan pada kecepatan konstan. William Froude membuat hukum perbandingan (Froude's Law of Comparison) pada tahun 1868 dan menunjukkan penggunaan

dalam praktek untuk memperkirakan besarnya tahanan kapal dari hasil percobaan model. Sampai sekarang dasar yang diterima untuk memperkirakan besarnya tahanan kapal dari hasil percobaan model merupakan asumsi Froude, yang menyatakan bahwa tahanan total merupakan penjumlahan komponen hambatan gesek dan hambatan sisa. C_f adalah koefisien hambatan gesek yang merupakan fungsi dari bilangan *Reynolds* dan C_r adalah koefisien hambatan sisa.

Hambatan gesek dipengaruhi oleh luas bidang basah yang terdapat dibawah garis air, dan dapat dikatakan sebanding dengan berat kapal. Hambatan sisa terdiri dari komponen-komponen: hambatan bentuk, hambatan gelombang, hambatan tekanan, dan hambatan tambahan.

Faktor yang melatarbelakangi penelitian tersebut adalah memanfaatkan lapisan gelembung udara, tekanan udara pada lambung kapal untuk mengurangi hambatan gesek. Gambar 1.3 memperlihatkan fenomena terjadinya gaya gesek dimana bila aliran air dengan viskositas nol (*stickiness*) pada permukaan lambung kapal yang licin, maka gaya gesek dianggap tidak ada. Aliran air disekeliling lambung kapal menjadi '*smooth*' seperti yang diperlihatkan pada gambar (3.b). Bagaimanapun, permukaan lambung kapal tidak ada yang '*smooth*' dan gelombang air merupakan fluida yang memiliki viskositas, sehingga dapat menimbulkan hambatan (*drag*) di sepanjang lapisan aliran air tersebut, dan fenomena ini disebut lapisan batas (*boundary layer*) gambar (3.c). Kemudian bila fenomena ini berlanjut maka akan menimbulkan ulekan (*wake*, *eddying*) seperti pada gambar (3.d). Lapisan batas akan bertambah lebar dari nol pada bagian depan menjadi membesar/menebal pada bagian belakang kapal.



Gambar 1.3. Fenomena gaya gesek

Pengurangan hambatan kapal menjadi suatu hal yang penting untuk dikaji. Hal ini berkaitan dengan efisiensi energi atau penghematan bahan bakar yang dipakai. Hambatan-hambatan tersebut berupa hambatan gesek dan hambatan sisa. Komponen hambatan yang berpengaruh paling besar adalah komponen hambatan gesek. Berbagai cara dilakukan untuk dapat mengurangi besarnya nilai hambatan gesek tersebut. Salah satu cara untuk mengurangi hambatan yaitu dengan penambahan gelembung udara pada lambung kapal. Gelembung udara tersebut dihasilkan oleh kompressor dengan tekanan tertentu.

1.3 TUJUAN PENULISAN

Tujuan dari penelitian ini yaitu mengetahui efek dari injeksi gelembung udara terhadap hambatan total kapal model. Kapal model tipe FPB 57 (kapal patroli cepat milik TNI AL).

Adapun tujuan khusus dari penelitian ini yaitu:

1. Untuk mengetahui pengaruh peletakan injeksi gelembung udara terhadap hambatan total kapal model.
2. Menganalisis pengaruh kecepatan kapal model terhadap pengurangan hambatan total yang terjadi.
3. Mengetahui pengaruh kecepatan injeksi udara terhadap pengurangan hambatan total.

1.4 MANFAAT PENELITIAN

Manfaat Penelitian ini adalah lebih memahami pengaruh gelembung udara dalam hal pengurangan hambatan kapal model. Dimana metode injeksi gelembung udara dan lokasi (zona keluarnya gelembung udara) dapat mempengaruhi besarnya pengurangan hambatan yang terjadi. Hal ini menjadi objek penelitian yang menarik sesuai aplikasi pada bermacam-macam benda yang bergerak di air.

1.5 PEMBATASAN MASALAH

Penelitian ini difokuskan pada pengaruh injeksi gelembung udara terhadap hambatan total kapal model. Cara injeksi gelembung tersebut dibatasi hanya

menggunakan kompresor dan injector. Lokasi injeksi di sekitar midship (tengah kapal). Dimana lokasi injeksi dibagi menjadi 3 zona. Zona pertama adalah jarak 7,5 hingga 16,5 depan midship. Zona kedua adalah daerah 4,5 cm depan midship dan 4,5 cm belakang midship, sedangkan zona tiga adalah 7,5 hingga 16,5 di belakang midship. Jarak antar lajur injector adalah 3 cm. Kapal model yang digunakan yaitu kapal jenis Fast Patrol Boat (kapal patroli cepat) milik TNI AL. Pengujian kapal model hanya dilakukan pada kecepatan sedang hingga tinggi. Pada kecepatan rendah tidak dilakukan percobaan. Kemudian, fenomena tentang mekanisme terbentuknya gelembung udara baik karena pengaruh kecepatan aliran maupun kecepatan injeksi udara dipelajari lewat studi pustaka.

1.6 KERANGKA PEMIKIRAN

Saat ini pengetahuan fenomena aliran yang menyelubungi benda bentuk badan kapal yang bergerak di fluida belum bisa dihitung dengan tepat. Para ilmuwan yang berkecimpung dalam memecahkan masalah yang dihadapi oleh perancang pembuat kapal, melakukan percobaan dengan model kapal. William Froude memformulasikan apa yang dikenal sebagai hukum perbandingan (*law of comparison*) antara model kapal dengan kapal sesungguhnya. Interaksi badan kapal dengan propeller dapat dilakukan di tangki percobaan.

Setelah bentuk kapal dan ukuran diketahui, dibuat model kapal dengan menggunakan hukum kesamaan kinematik, hukum kesamaan dinamik, dan hukum kesamaan geometrik. Kecepatan model kapal didapatkan dengan cara menyamakan angka bilangan Froude antara kapal dan model. Percobaan tarik di tangki percobaan untuk mencari besarnya hambatan kapal ybs. model kapal dibuat dari bahan kayu atau parafin dengan skala kecil geometris sama dengan kapal sesungguhnya. Model tersebut dijalankan dengan cara menarik dengan kereta percobaan dikolam tangki percobaan dengan variasi kecepatan yang konstan. Gaya yang dibutuhkan untuk menarik model dan masing-masing kecepatan dapat diukur dengan peralatan yang dipasang di kereta percobaan. Dari hasil pengukuran besarnya gaya pada masing-masing kecepatan tersebut dapat dihitung besarnya hambatan yang dialami oleh kapal model. Dengan cara

yang di formulasikan oleh William Froude hasil pengukuran dan perhitungan pada model tersebut dapat dikonversikan menjadi yang dicari pada kapal sesungguhnya sehingga hambatan kapal sesungguhnya dapat dihitung.

Modifikasi dari permukaan benda untuk mengatasi turbulensi dinamakan pasif kontrol. Hasil dari percobaan untuk mengurangi tingkat turbulensi yang terjadi pada batas padat permukaan menunjukkan pengurangan hambatan sebesar 7 % terjadi untuk *riblets rib* memanjang alur-V tertentu. Pada permukaan bola golf yang di kasarkan menghasilkan arus ikut (*wake*) yang terbentuk di belakang aliran mengecil sehingga menghasilkan lintasan bola golf tersebut lebih jauh. Aktif kontrol merupakan metode yang paling efektif untuk mendapatkan pengurangan hambatan pada lambung kapal, kapal selam dan torpedo dengan aplikasi menggunakan cat jenis polimer untuk mengurangi hambatan gesek, sehingga laju kecepatan kapal akan meningkat. Penggunaan gelembung udara menjadi salah satu hal yang menarik untuk diteliti. Pengaruh pengurangan hambatan menggunakan gelembung udara menjadi salah satu metode yang menjanjikan sebagai bagian solusi dari masalah pengurangan pemakaian energi.

1.7 HIPOTESIS

Efek dari penambahan gelembung udara dapat mengurangi hambatan gesek sehingga akan mengurangi hambatan secara keseluruhan. Pengaruh zona injeksi akan terlihat jelas. Zona injeksi di belakang midship akan mendapatkan nilai pengurangan hambatan lebih baik dibanding tepat pada midship maupun di depan midship. Besarnya debit udara yang diinjeksikan juga akan berpengaruh terhadap hambatan kapal yang terjadi.

1.8 SISTEMATIKA PENULISAN

Penulisan Tesis ini terdiri atas 5 bab dan daftar pustaka berikut lampiran-lampiran. Adapun kelima bab tersebut adalah sebagai berikut:

Bab 1 Pendahuluan.

Pada Bab ini akan dijelaskan tentang hal-hal sebagai berikut:

- Latar- belakang mengapa penelitian ini dilakukan, pada bagian ini akan diuraikan penelitian-penelitian sebelumnya yang berhubungan dengan topik yang sedang diteliti selain itu juga pada bagian ini akan ditunjukkan posisi penelitian ini terhadap penelitian lain.
- Perumusan masalah, pada bagian ini diuraikan pokok permasalahan yang akan diteliti
- Tujuan penelitian, pada bagian ini dijelaskan tujuan dari penelitian ini baik tujuan umum maupun tujuan khususnya.
- Batasan masalah, pada bagian ini dijelaskan batasan yang akan dibahas dalam penelitian ini baik yang berhubungan dengan kapal model maupun injeksi gelembung udara yang digunakan. Pada bagian ini juga diuraikan bagian mana yang akan dibahas dan juga bagian yang tidak dibahas yang berhubungan dengan topik penelitian.
- Kerangka Pemikiran, pada bagian ini dibahas tentang kerangka penelitian yang sedang dilakukan baik secara khusus maupun garis besar.
- Sistematika penelitian, pada bagian ini diuraikan Secara garis besar urutan dari penulisan yang dilakukan. Penulisan Tesis ini terdiri atas 5 (lima) Bab yakni : Pendahuluan, Tinjauan Literatur, Metodologi Penelitian, Hasil dan Pembahasan, serta Kesimpulan dan Saran.

Bab 2 Landasan Teori.

Bab ini terdiri atas teori dasar yang berisi atas teori-teori yang mendasari penelitian ini. Teori dasar ini meliputi teori hambatan kapal, aliran luar, boundary layer. Teori tentang pembentukan gelembung udara dan pengaruhnya terhadap hambatan kapal juga dibahas.

Bab 3 Metodologi Penelitian.

Metode penelitian yang dilakukan terdiri atas set up pengujian, dimana kapal model yang digunakan adalah kapal model patroli FPB 57 milik TNI-AL. Kapal tersebut beroperasi pada kecepatan tinggi. Metode pengambilan data menggunakan percobaan uji tarik juga dijelaskan

secara detail. Load cell transducer digunakan untuk mengukur besarnya hambatan kapal model saat dilakukan uji tarik.

Bab 4 Hasil dan Pembahasan.

Bab 4 berisi tentang data-data percobaan dan hasil pengolahan data tersebut. Hasil berupa grafik hubungan antara bilangan Froude maupun Reynolds dengan nilai koefisien hambatan total kapal model. Nilai hambatan total kapal model tersebut dibandingkan antara yang tanpa gelembung udara dengan injeksi gelembung udara pada berbagai variasi daerah penempatannya. Pembahasan dilakukan untuk mengetahui seberapa besar efek injeksi gelembung udara terhadap hambatan kapal yang terjadi. Disamping itu, pengaruh dari peletakan injeksi pun menjadi pembahasan yang menarik dalam penelitian ini.

Bab 5 Kesimpulan.

Bab 5 berisi kesimpulan yang didapat dari penelitian yang dilakukan.

Daftar Pustaka.

Berisi sumber informasi pengetahuan baik dalam bentuk buku maupun dalam bentuk paper dan jurnal yang digunakan sebagai referensi dalam penelitian ini.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 HAMBATAN KAPAL

Hambatan kapal pada suatu kecepatan adalah gaya fluida yang bekerja pada kapal sedemikian rupa sehingga melawan gerakan kapal tersebut. Hambatan kapal tersebut sama dengan komponen gaya fluida yang bekerja sejajar dengan sumbu gerak kapal. Untuk memudahkan perhitungan, hambatan total (R_T) merupakan fungsi dari Koefisien hambatan total (C_T), luas permukaan basah (S), kecepatan kapal (V), dan masa jenis air (ρ) dengan menggunakan rumus sebagai berikut:

$$R_T = \frac{1}{2} C_T \cdot \rho \cdot S \cdot V^2 \quad (2.1)$$

Hambatan total kapal (R_T) dapat diuraikan menjadi sejumlah komponen yang berbeda yang diakibatkan oleh berbagai macam penyebab dan saling berinteraksi dalam cara yang benar-benar rumit.

Komponen tersebut antara lain yaitu :

1. Hambatan Gesek

Hambatan gesek ini terjadi karena adanya suatu volume air yang melekat pada badan kapal yang terbentuk pada permukaan bagian yang terendam dari badan kapal yang sedang bergerak, dikenal sebagai lapisan batas (*boundary layer*). Di dalam daerah lapisan batas tersebut, kecepatan gerak dari pada partikel-partikel zat cair bervariasi dari nol pada permukaan kulit kapal menjadi maksimum yaitu sama dengan besarnya kecepatan aliran zat cair pada tepi dari lapisan batas tersebut. Perubahan atau variasi kecepatan partikel-partikel zat cair inilah yang mencerminkan adanya pengaruh intensif gaya-gaya viskositas pada lapisan batas yang menimbulkan hambatan gesek pada lambung kapal tersebut.

2. Hambatan Gelombang

Kapal yang bergerak dalam air akan mengalami hambatan sehingga menyebabkan terbentuknya suatu sistem gelombang. Sistem gelombang ini

terbentuk akibat terjadinya variasi tekanan air terhadap lambung kapal pada saat kapal bergerak dengan kecepatan tertentu. Ada tiga jenis gelombang yang biasanya akan terbentuk pada saat kapal bergerak yaitu gelombang haluan, gelombang melintang pada sisi lambung dan gelombang buritan. Energi yang dibutuhkan untuk membentuk sistem gelombang ini diperoleh dari gerakan kapal itu sendiri. Pemindahan energi ini dianggap menggambarkan adanya suatu gaya yang menghambat gerak maju dari kapal dan dianggap sebagai hambatan gelombang.

3. Hambatan Bentuk

Hambatan ini terjadi karena terbentuknya partikel-partikel air yang bergerak dalam satuan pusaran (*eddy*). Pusaran-pusaran ini terjadi antara lain karena bentuk-bentuk yang tidak *stream line*, bentuk yang demikian ini terdapat di bagian belakang kapal. Akibat terjadinya arus *eddy* ini, pada bagian buritan tekanan yang terjadi tidak dapat mengimbangi tekanan pada bagian depan sehingga timbullah suatu gaya yang melawan gerak maju dari kapal.

4. Hambatan Udara

Hambatan ini terjadi pada badan kapal yang berada di atas permukaan air. Seperti halnya pada badan kapal yang berada di bawah garis air, maka hambatan udara juga terbagi dua menjadi hambatan gesek dan hambatan bentuk. Kecuali dalam cuaca buruk maka hambatan udara yang dialami kapal hanya berkisar 2% - 4% dari hambatan total.

5. Hambatan Tambahan

Hambatan ini terjadi karena adanya penonjolan daripada alat-alat bantu pada lambung kapal seperti kemudi, lunas sayap, zinc anode, bentuk buritan, dll. Besarnya hambatan ini dapat mencapai sepuluh persen dari hambatan total yang dialami kapal.

6. Hambatan Sisa

Hambatan sisa merupakan gabungan dari hambatan gelombang, hambatan bentuk, hambatan udara dan juga hambatan tambahan. Sehingga dalam

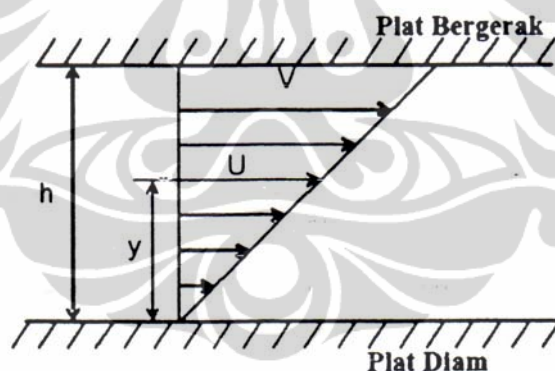
berbagai metode perhitungan hambatan total, dikenal dua buah komponen hambatan, yaitu hambatan gesek dan hambatan sisa.

Untuk proses analisa penghitungan cukup menggunakan dua buah komponen hambatan, yang memang saat ini populer digunakan untuk menghitung hambatan total kapal melalui percobaan kapal model, metode tersebut adalah “Metode Froude”. Yang mana pada metode froude ini hambatan total dibagi menjadi dua buah komponen besar yaitu :

$$R_T = R_f + R_r \quad (2.2)$$

2.1.1 Hambatan Gesek

Hambatan gesek disebabkan oleh kekentalan air dan merupakan fungsi *Reynolds' Number*. Yang mana ketika fluida berada di antara dua buah pelat, dan pada salah satunya dikenai gaya geser maka akan timbul tegangan geser pada fluida. Untuk mempertahankan gerakan maka harus ada gaya F yang bekerja pada pelat yang bergerak.



Gambar. 2.1. Aliran di antara pelat yang sejajar

Percobaan menunjukkan bahwa gaya tersebut berbanding lurus dengan luas pelat (S), kecepatan (v) dan berbanding terbalik dengan jarak kedua pelat (h). Kedua pelat yang berukuran besar itu berada dalam gerakan relatif yang tunak (*steady*) sementara jarak h selalu tetap. Fluida diantara kedua pelat tersebut akan mempunyai profil kecepatan yang linier jika sepanjang pelat tersebut tidak ada gradien tekanan dalam arah gerakan pelat tersebut. Penyelidikan menunjukkan bahwa fluida viskos melekat pada kedua pelat tersebut. Lapisan fluida yang langsung menyentuh pelat

tidak mempunyai kecepatan relatif terhadap pelat yang bersangkutan-antara fluida dan kedua pelat tersebut tidak terjadi slip. Fluida didesak demikian rupa sehingga berbagai lapisan fluida dapat saling bergeser secara seragam (uniform).

Kecepatan lapisan yang berjarak y dari pelat yang diam dapat dinyatakan sebagai :

$$U = \frac{y}{h}V \quad (2.3)$$

V adalah kecepatan pelat yang bergerak.

Untuk mempertahankan gerakan, harus ada gaya F yang bekerja pada pelat yang bergerak. Percobaan menunjukkan bahwa gaya tersebut berbanding lurus dengan luas pelat dan berbanding terbalik dengan jarak antara kedua pelat. Ini dapat ditulis sebagai :

$$F = \mu \frac{SV}{h} \quad (2.4)$$

S adalah *luas* pelat dan μ adalah *viskositas dinamis*. Gaya F secara numeric sama dengan tahanan yang dihasilkan oleh perpindahan pelat, dan dapat dijelaskan dengan menganggap bahwa di seluruh fluida viskos yang bergerak terdapat tegangan tangensial gaya geser yang melawan perubahan bentuk yang terjadi. Dengan meninjau elemen kecil pada fluida yang sedang dalam keadaan bergeseran dengan lainnya maka Pers. (2.4) akan dapat ditulis kembali menjadi :

$$\tau = \mu \frac{\partial U}{\partial y} \quad (2.5)$$

τ adalah tegangan geser dan $\partial U/\partial y$ adalah laju perubahan kecepatan sebagai fungsi dari jarak y dari pelat yang diam gradient kecepatan. Dengan demikian maka koefisien, viskositas dinamis dapat didefinisikan sebagai tegangan geser per satuan gradient kecepatan. Rasio antara

viskositas dengan masa jenis disebut viskositas kinematik dan dapat ditulis sebagai :

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (2.6)$$

Viskositas cairan akan turun jika suhunya naik. Viskositas juga tergantung pada tekanan, tetapi ketergantungan ini umumnya tidak penting bagi masalah tahanan. *Faktor yang menentukan laminar atau turbulent pada suatu aliran fluida* adalah, *kecepatan, bentuk dan ukuran* benda yang diletakan di dalam aliran, ke dalaman air dan jika aliran tersebut berada didalam kanal, konfigurasi serta ukuran kanal. Baik aliran laminar maupun aliran turbulen ada dalam kenyataan, tetapi aliran turbulen adalah keadaan yang lebih umum. Bila kecepatan bertambah, aliran akan berubah dari laminar ke turbulen, melalui daerah transisi. Dengan demikian, dalam percobaan model, aliran di suatu daerah yang tak diketahui di model dapat saja bersifat laminar yang berarti bahwa kecepatan percobaan sering tidak sebaik yang diinginkan. Viskositas juga mempunyai pengaruh pada aliran turbulen, tetapi pengaruh tersebut biasanya dikalahkan oleh dominasi tegangan geser turbulen.

Analisis percobaan model dilakukan menurut metode *Froude* dimana tahanan gesek R_f adalah komponen tahanan yang diperoleh dengan cara mengintegral tegangan tangensial ke seluruh permukaan basah kapal menurut arah gerakan kapal.

Selanjutnya, tahanan gesek spesifik atau koefisien drag C_f didefinisikan sebagai:

$$C_f = \frac{R_f}{1/2\rho.V^2.S} \quad (2.7)$$

Dari percobaan yang dilakukan Froude dengan memakai sejumlah papan dan ditarik di kolam dengan kecepatan yang berbeda yang dilapisi beberapa dengan berbagai bahan dan tahanan masing-masing diukur

dengan beberapa modifikasi berdasarkan gambar, maka tahanan gesek permukaan dinyatakan dalam rumus :

$$RF = f \cdot S \cdot V^n \quad (2.8)$$

Dimana:

S = luas permukaan papan.

f = koefisien gesek papan.

V = adalah kecepatan papan.

n = adalah indeks bias

kemudian persamaan tersebut dilengkapi menjadi :

$$R_f = f \cdot S \cdot V^{1,825} \quad (2.9)$$

Setelah beberapa percobaan yang dilakukan dengan lapisan cat dan dipernis, didapat keduanya mempunyai tahanan gesek yang sama, rumus diatas disempurnakan lagi oleh *Froude* menjadi dalam satuan *kg* :

$$R_f = \frac{\gamma \lambda}{1000} \cdot S \cdot V^{1,825} \quad (2.10)$$

Dimana : γ = Berat jenis fluida dalam *kg/m*

λ = Koefisien hambatan gesek.

S = Luas permukaan basah.

V = Kecepatan dalam *m/detik*.

Le Besnerais menyatakan koefisien hambatan gesek λ dalam rumus sebagai berikut (untuk temperatur fluida 15° C):

$$\lambda = 0,1392 + \frac{0,258}{2,86 + L} \quad (2.11)$$

L adalah panjang model kapal dalam meter. Jika koefisien gesek tersebut akan dipakai untuk suhu selain 15°C maka koreksi dapat dilakukan dengan memakai rumus sebagai berikut :

$$\lambda_t = \lambda(1 + 0,0043\Delta t) \quad (2.12)$$

$\Delta t = 15^{\circ}\text{C} - t$ (harga negatif jika $t > 15^{\circ}\text{C}$, penggabungan persamaan 2.11 dengan persamaan 2.12 menghasilkan hubungan sebagai berikut :

$$C_f = \frac{R_f}{1/2 \cdot \rho \cdot V^2 \cdot S} = \frac{(\gamma \cdot g \cdot \lambda / 1000) \cdot S \cdot V^{1,825}}{1/2 \cdot \rho \cdot V^2 \cdot S} \quad (2.13)$$

$$C_F = 2 \cdot 10^{-3} \lambda \cdot g \cdot V^{-0,175} \quad (2.14)$$

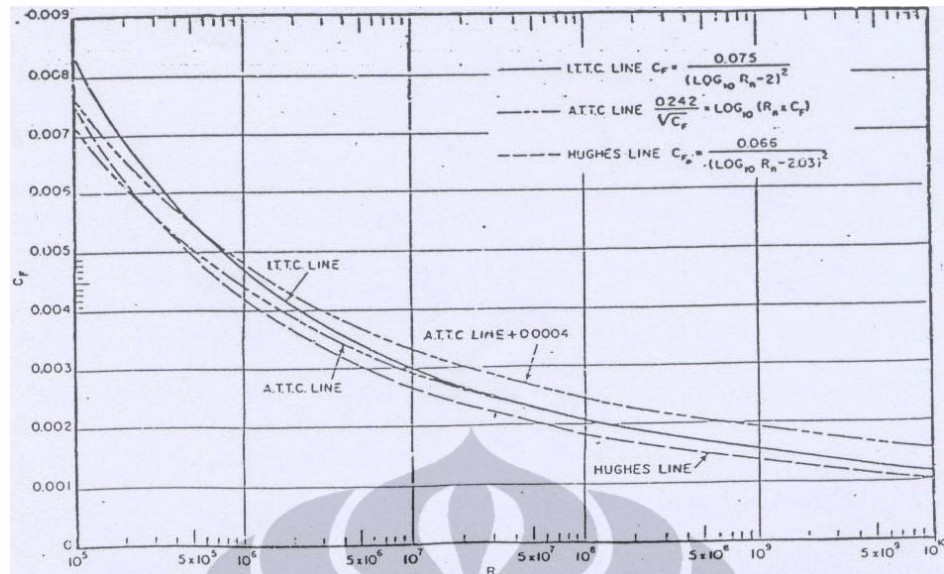
g adalah percepatan gravitasi, harga ini harus diikutkan dalam rumus tersebut sesuai definisi dan satuan yang dipakai.

Tangki percobaan diseluruh dunia telah memikirkan untuk membuat suatu cara yang seragam untuk menghitung gesekan permukaan dan untuk mengembangkan data yang diperoleh dari model ke kapal keukuran sebenarnya dan sesuai kesepakatan bersama maka koefisien hambatan gesek dihitung menurut formula yang dikeluarkan oleh ITTC (International Towing Tank Conference) 1957 sebagai berikut :

$$C_F = \frac{0,075}{(\text{Log}R_n - 2)^2} \quad (2.15)$$

Dimana R_n adalah Reynolds number dengan menggunakan referensi panjang garis air. Setelah mendapat nilai C_f maka persamaan tahanan gesek R_f , dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$R_f = C_f (1/2 \cdot \rho \cdot V^2) \cdot S \quad (2.16)$$



Gambar. 2.2 Standar koefisien hambatan gesek dari ATTC, Hughes dan ITTC [2]

2.1.2 Hambatan Sisa

Hambatan sisa disebabkan oleh terbentuknya gelombang karena gerakan kapal, bentuk lambung, panjang kapal dan juga merupakan fungsi dari Froude number. Jika Froude number-nya konstan, koefisien hambatan sisa dari kapal skala penuh adalah sama besarnya dengan koefisien hambatan sisa model. Seperti juga model, koefisien hambatan gesek dari kapal dihitung berdasarkan koefisien hambatan gesek dari pelat datar yang mempunyai panjang dan luasan yang sama dengan kapal. Sehingga koefisien hambatan sisa dari kapal adalah sebagai berikut :

$$C_r = C_T + C_f \quad (2.17)$$

2.2 HUKUM KESAMAAN

Pada percobaan dengan memakai kapal model dapat ditunjukkan bahwa dari hasil pengukuran hambatan total kapal model tersebut, kemudian hambatan total kapal yang dicari akan dapat dihitung. Umumnya model tersebut berdimensi relatif lebih kecil dan dioperasikan di air tawar pada tangki percobaan dengan ukuran terbatas, sedangkan kapal berlayar diperairan luas dan biasanya laut berair asin.

Tentunya untuk itu harus dipenuhi persyaratan fisika murni dalam percobaan tersebut, yakni persyaratan kesamaan-kesamaan. Percobaan menggunakan

model di tangki percobaan guna memperoleh besarnya harga hambatan kapal dikenal sebagai ‘percobaan hambatan kapal’ (*resistance test = towing test*).

Adapun persyaratan kesamaan kesamaan yang harus dipenuhi adalah:

1. Kesamaan Geometris (*geometrical similiarity*)
2. Kesamaan kinematis (*kinematical similiarity*)
3. Kesamaan dinamis (*dynamical similiarity*)

2.2.1 Kesamaan Geometris

Persyaratan guna memperoleh kesamaan geometris dari sebuah benda terhadap benda lain yang ditinjau adalah harus dipenuhinya secara alamaiah baik kesamaan bentuk maupun kondisi permukaan luar dari kedua benda yang bersangkutan. Untuk memperoleh kesamaan geometris dapat dilakukan dengan cara sebagai berikut:

1. Dengan meniru bentuk badan kapal yakni dengan cara memperkecil dengan skala tertentu dan membuat permukaan kapal model agar licin seolah-olah ‘reproduksi’ permukaan kapal yang sebenarnya saat beroperasi.
2. Dengan mengkondisikan permukaan dikolam haruslah seidentik mungkin dengan kondisi permukaan laut dimana kapal akan beroperasi. Biasanya diasumsikan keadaan laut tenang (*calm water*) sehingga permukaan kolam tangki percobaan dikondisikan benar-benar tenang.

Akan tetapi meskipun kedua persyaratan diatas dapat terpenuhi, tentunya masih ada harga koreksi yang perlu ditambahkan untuk bisa menyerupai harga hambatan total kapal sebenarnya. Harga koreksi ini terjadi akibat adanya beberapa hal misalnya :

1. *Boundary layer* yang terjadi pada kapal sebenarnya tidak mungkin dapat direproduksi secara sempurna pada model saat ditarik ditangki percobaan meskipun permukaan model benar-benar merupakan ‘copy’ dari permukaan kapal yang sebenarnya.
2. Adanya fenomena ‘pengaruh dinding tangki’ (*wall effect*) dan ‘pengaruh dasar tangki’ (*bottom effect*) yang timbul akibat adanya keterbatasan dimensi kolam tangki percobaan.

2.2.2 Kesamaan Kinematis

Kesamaan kinematis dalam percobaan model di tangki percobaan berarti gerakan partikel-partikel fluida yang meyelubungi model dan kapal yang sesungguhnya haruslah ada kesamaanya. Guna memperoleh kesamaan antara lain aliran air tawar di tangki percobaan yang lewat menyusuri badan kapal terhadap air laut yang menyelubungi kapal saat berlayar, dituntut persyaratan perbandingan kecepatan pada setiap dua titik di lambung model harus sama dengan perbandingan kecepatan dari dua titik pada lambung kapal yang korespon dengan modelnya. Selain itu harga perbandingan kecepatan maju (*advance speed*) V_a besarnya sama dengan kecepatan partikel-partikel air yang melewati piringan baling-baling (*propeller disc*) dengan kecepatan rotasional dari setiap potongan daun baling-baling dari model dan baling-baling dari kapal yang sebenarnya haruslah sama. Bila yang ditinjau berlokasi r (m) dari sumbu poros baling-baling dan putaran baling-baling n (rps) sedangkan kecepatan maju V_a (m/s), maka persyaratan yang dipenuhi adalah :

$$\frac{V_a(m)}{2\pi r(m)n(m)} = \frac{V_a(s)}{2\pi r(s)n(s)} \quad (2.18)$$

2.2.3 Kesamaan Dinamis

Dinamika merupakan salah satu cabang dari ilmu mekanika yang khusus mempelajari baik tentang gerakan benda maupun gaya-gaya yang bekerja dalam gerakan tersebut. Dalam banyak hal, percobaan-percobaan ditangki percobaan dengan menggunakan model yang telah geometris sama dengan kapalnya dilakukan juga untuk mempelajari segala sesuatu tentang gaya-gaya yang bekerja pada kapal yang sebenarnya.

Ada beberapa jenis gaya yang bekerja pada badan kapal yang bergerak dipermukaan air dan yang berperan dalam hambatan kapal misalnya gaya-gaya inersia F_i , gaya-gaya tekanan F_p , gaya-gaya gravitasi F_g , gaya-gaya viskositas F_v .

Guna memperoleh gambaran hubungan yang mungkin ada antara gaya-gaya yang bekerja pada model dengan kapal yang sebenarnya dimana

kedua benda yang dibuat geometris sama tersebut diasumsikan berada didalam aliran yang juga memiliki kesamaan geometris, dapat dipakai ‘hukum kesamaan dasar’ seperti berikut ini:

a) Hukum Kesamaan Dasar Newton

“Perbandingan harga tiap gaya yang bekerja di titik-titik yang sama (*similar spots*) pada benda-benda berbentuk sama yang berada didalam aliran fluida yang sama, haruslah sama besarnya.”

Berdasarkan hukum Newton tersebut diatas, perbandingan gaya inersia dengan gaya gravitasi di titik A, pada kapal dan titik koresponnya pada model titik Am, gaya inersia dengan gaya viskositas, gaya inersia dengan gaya tekanan berturut-turut adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \left[\frac{F_i}{F_g} \right]_{kpl} &= \left[\frac{F_i}{F_g} \right]_{\text{model}} \longrightarrow \left[\frac{F_i(s)}{F_g(s)} \right] = \left[\frac{F(m)}{F_g(m)} \right] \longrightarrow \left[\frac{F_i(s)}{F_i(m)} \right] = \left[\frac{F_g(s)}{F_g(m)} \right] \\ \left[\frac{F_i}{F_v} \right]_{kpl} &= \left[\frac{F_i}{F_v} \right]_{\text{model}} \longrightarrow \left[\frac{F_i(s)}{F_v(s)} \right] = \left[\frac{F(m)}{F_v(m)} \right] \longrightarrow \left[\frac{F_i(s)}{F_i(m)} \right] = \left[\frac{F_v(s)}{F_v(m)} \right] \\ \left[\frac{F_i}{F_p} \right]_{kpl} &= \left[\frac{F_i}{F_p} \right]_{\text{model}} \longrightarrow \left[\frac{F_i(s)}{F_p(s)} \right] = \left[\frac{F(m)}{F_p(m)} \right] \longrightarrow \left[\frac{F_i(s)}{F_i(m)} \right] = \left[\frac{F_p(s)}{F_p(m)} \right] \end{aligned} \quad (2.19)$$

b) Hukum Kesamaan Froude

Ditinjau sebuah benda bergerak dipermukaan bebas (*free surface*) di suatu fluida ideal (*non viscous fluid*), diselubung dinding luar benda yang bersangkutan pada bagian dibawah permukaan fluida akan terjadi aliran dan gaya-gaya yang timbul adalah gaya inersia, gaya tekanan dan gaya gravitasi. Karena fluidanya diasumsikan sebagai fluida tidak berviskositas, maka tidak terjadi gaya gesekan. Sedangkan kesemuagaya yang bekerja tersebut secara keseluruhan akan merupakan satu keseimbangan (resultan gaya = 0).

Bila Φ_i , Φ_g dan Φ_p masing-masing adalah harga perbandingan gaya inersia kapal dengan modelnya, perbandingan gaya inersia kapal dengan modelnya, perbandingan gaya gravitasi dengan harga perbandingan gaya tekanannya, maka :

$$\Phi_i = \frac{F_i(s)}{F_i(m)} = \frac{m(s).a(s)}{m(m).a(m)} = \frac{\rho(s).\nabla(s).a(s)}{\rho(m).\nabla(m).a(m)}$$

Maka,

Universitas Indonesia

$$\Phi_i = \frac{\rho(s) \cdot \nabla(s) \cdot a(s)}{\rho(m) \cdot \nabla(m) \cdot a(m)} = \delta \cdot \lambda^3 \cdot \beta \quad (2.20)$$

Dimana ; δ = perbandingan density

λ = perbandingan ukuran panjang

β = perbandingan percepatan

Bila ε = perbandingan kecepatan $\left(\frac{V(s)}{V(m)}\right)$ dan τ = perbandingan

waktu ditempuh, maka :

$$\varepsilon = \frac{V(s)}{V(m)} = \frac{\lambda}{\tau} \rightarrow \tau = \frac{\lambda}{\varepsilon}$$

$$\beta = \frac{\varepsilon}{\tau} = \frac{\varepsilon}{\frac{\lambda}{\varepsilon}} = \frac{\varepsilon^2}{\lambda}$$

$$\Phi_i = \delta \cdot \lambda^3 \cdot \beta = \frac{\delta \cdot \lambda^3 \cdot \varepsilon^2}{\lambda} = \delta \cdot \lambda^2 \cdot \varepsilon^2 \quad (2.21)$$

$$\Phi_g = \frac{\rho(s) \cdot \nabla(s) \cdot g(s)}{\rho(m) \cdot \nabla(m) \cdot g(m)} = \delta \cdot \lambda^3 \cdot \zeta \quad (2.22)$$

Dimana ; ζ = perbandingan gravitasi

Seperti telah dijelaskan berdasarkan hukum newton selain harga-harga perbandingan gaya gravitasi, harga-harga perbandingan gaya inersia dan juga perbandingan gaya tekanan haruslah sama untuk kapal dan modelnya ($\Phi_i = \Phi_g = \Phi_p$), sehingga :

$$\frac{F_g(s)}{F_g(m)} = \frac{F_i(s)}{F_i(m)} = \frac{F_p(s)}{F_p(m)} \rightarrow \frac{F_g(s)}{F_i(s)} = \frac{F_g(m)}{F_i(m)} \rightarrow \frac{F_g(s)}{F_g(m)} = \frac{F_i(s)}{F_i(m)}$$

$$\Phi_g = \Phi_i \rightarrow \delta \cdot \lambda^3 \cdot \zeta = \delta \cdot \lambda^2 \cdot \varepsilon^2 \rightarrow \lambda \cdot \zeta = \varepsilon^2 \rightarrow$$

$$\frac{L(s) \cdot g(s)}{L(m) \cdot g(m)} = \frac{V(s)^2}{V(m)^2} \rightarrow \frac{V(s)}{\sqrt{g(s) \cdot L(s)}} = \frac{V(m)}{\sqrt{g(m) \cdot L(m)}}$$

Seperti telah diketahui

$\frac{V}{\sqrt{gL}}$ adalah angka Froude F_n , maka dengan demikian $F_{ns} = F_{nm}$

dan apa yang diuraikan diatas kemudian menjadi dasar dari Hukum Kesamaan Froude. Angka gravitasi di tangki percobaan biasa diasumsi sama dengan gravitasi di perairan laut dimana kapal akan beroperasi ($\zeta = 1$), sehingga dengan harga angka Froude kapal sama dengan modelnya, maka :

$$F_n(s) = F_n(m) \rightarrow \frac{V(s)}{\sqrt{g(s)L(s)}} = \frac{V(m)}{\sqrt{g(m)L(m)}} \rightarrow \frac{V(s)}{\sqrt{L(s)}} = \frac{V(m)}{\sqrt{L(m)}}$$

$$V(m) = \frac{V(s)}{\sqrt{\frac{L(m)}{L(s)}}} = \frac{V(s)}{\sqrt{\lambda}} \quad (2.23)$$

$$g = \delta \cdot \lambda^3 \cdot \zeta = \delta \cdot \lambda^3 = \frac{\rho(s) \cdot \nabla(s)}{\rho(m) \cdot \nabla(m)} = \frac{\rho(s) \cdot \nabla(s)}{\rho(m) \cdot \nabla(m)} \quad (2.24)$$

$$\Phi_g = \Phi_i = \Phi_p = \frac{\rho(s) \cdot \nabla(s)}{\rho(m) \cdot \nabla(m)} \quad (2.25)$$

$$F_g(s) = C_w \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho(s) \cdot S(s) \cdot V(s)^2 \quad (2.26)$$

$$F_g(m) = C_w \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho(m) \cdot S(m) \cdot V(m)^2 \quad (2.27)$$

Dimana : C_w = konstanta yang harganya bebas terhadap pengaruh harga skala yang dipilih

S = Luas permukaan basah (*wetted surface area* WSA)

Bila γ = berat jenis (*specific weight*), *density* $\rho = \gamma/g$, *displacement* $\Delta = \gamma \cdot \square$ dan dengan angka gravitasi $g_m = g_s$ atau harga $\zeta = 1$, maka :

$$\Phi_g = \Phi_i = \Phi_p = \frac{\gamma(s) \cdot \nabla(s)}{\gamma(m) \cdot \nabla(m)} = \frac{\Delta(s)}{\Delta(m)} \quad (2.28)$$

Universitas Indonesia

Φ_g adalah berkaitan dengan perbandingan hambatan gelombang yang timbul pada kapal dan modelnya. Sedangkan Φ_p terkait dengan hambatan tekanan, sehingga Φ_g , Φ_p dan Φ_i secara keseluruhan terkait dengan perbandingan hambatan sisa (*residual resistance*) kapal dengan modelnya.

Bila air di kolam towing tank diasumsikan sebagai fluida ideal (sehingga gaya viskositas yang terkait dengan hambatan gesekan tidak diperhitungkan) dan model dijalankan dengan kecepatan $V_m = \lambda^{-1/2} \cdot V_s$, yang mana badan model tersebut bergerak dengan diselubungi aliran fluida yang memenuhi persamaan Froude, maka semua gayagaya yang bekerja terkait dengan hambatan sisa, besarnya bila dihadapkan dengan apa yang terjadi pada kapal yang sebenarnya adalah sebanding dengan *displacement*-nya. Dengan demikian, apabila komponen hambatan gesek dipisahkan dari hambatan total sehingga yang ditinjau hanya komponen hambatan sisanya saja dan model dibuat geometris sama dengan kapal serta memiliki angka Froude sama ($F_{n_m} = F_{n_s}$ yakni model dijalankan dengan kecepatan $V_m = \lambda^{-1/2} \cdot V_s$) maka akan berlaku kesimpulan di atas.

Apa yang telah diuraikan di atas dikenal dengan sebagai Hukum Perbandingan (*law of comparison*) atau Hukum Kesamaan (*law of similarity*) dari Froude yang diberlakukan untuk menghubungkan model dengan kapalnya dalam percobaan *resistance test* di tangki percobaan seperti sebagai berikut :

Apabila model dan kapal geometris sama dan memiliki angka Froude sama, maka besarnya hambatan sisa berbanding lurus dengan besarnya *displacement*.

$$V(m) = \frac{V(s)}{\sqrt{\lambda}} \rightarrow Rr(s) = Rr(m) = \frac{\Delta(s)}{\Delta(m)} = \left(\frac{\rho(s)}{\rho(m)} \right) \cdot \lambda^3 \quad (2.29)$$

Dimana :

$\rho(s)$ dan $\rho(m)$ masing-masing adalah *density* dari air laut dan air tawar di *towing tank*;

λ = skala model terhadap kapalnya (*linear ratio*)

Prinsip Froude tersebut sampai sekarang masih dianut untuk percobaan hambatan kapal dengan menggunakan model di *towing tank*.

c) Hukum Kesamaan Reynold

Ketentuan-ketentuan dalam Hukum kesamaan Reynold disebutkan seperti sebagai berikut:

- “Bila dua benda yakni kapal dan modelnya geometris sama dengan memiliki Angka Reynold R_n sama Bergerak difluida berviskositas dengan lokasi jauh di bawah permukaan sehingga tidak menimbulkan gelombang (dengan demikian gaya gravitasi dapat diabaikan), maka gaya-gaya yang bekerja pada model dapat dikonversi dengan skala gaya yang korespon menjadi masingmasing gaya sejenis pada kapal yang sebenarnya.”
- “Bila gaya yang ditinjau adalah benda yang bergerak dipermukaan bebas suatu fluida yang berviskositas, yakni kapal yang berlayar di laut bebas dan odelnya yang ditarik di tangki percobaan, maka gaya-gaya yang akan bekerja adalah empat jenis gaya, yakni gaya inersia, gaya tekanan, gaya gravitasi dan gaya viskositas dimana keempat macam gaya tersebut secara bersamaan daalm keadaan kesetimbangan.”

Untuk dapat mengkonversi besarnya gaya hasil pengukuran pada percobaan dengan model di tangki percobaan menjadi gaya yang korespon pada kapal yang sebenarnya dengan skalanya masingmasing, maka haruslah dipenuhi persyaratan-persyaratan hukum Froude sekaligus dengan Hukum Reynold.

Dengan asumsi angka gravitasi ditangki percobaan sama dengan diperairan dimana kapal akan beroperasi, maka menurut ketentuan Hukum Froude sekaligus Hukum Reynold, model harus dijalankan dengan kecepatan:

$$V(m) = \frac{V(s)}{\sqrt{\lambda}} \quad (2.30)$$

Sedangkan menurut ketentuan hukum Reynolds, model haus mempunyai kecepatan:

$$V(m) = \lambda.V(s) \frac{Vm}{V(s)} \quad (2.31)$$

$$\frac{V(s)}{\sqrt{\lambda}} = \lambda.V(s) \frac{Vm}{V(s)} \rightarrow V(m) = \frac{V(s)}{\lambda\sqrt{\lambda}} \quad (2.32)$$

Dimana:

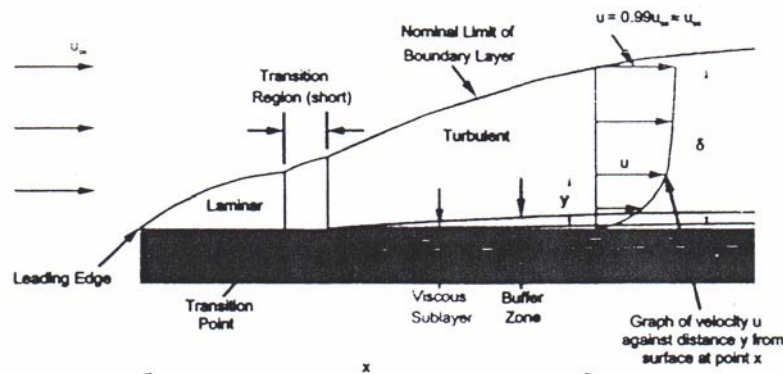
$V(m)$ = viskositas kinematis fluida yakni air tawar ditangki percobaandimana test dilakukan.

$V(s)$ = viskositas kinematis fluida yakni air laut/sungai/danau pe rairan dimana kapal akan beroperasi.

2.3 BOUNDARY LAYER

Lapisan batas diartikan sebagai daerah fluida yang dekat dengan permukaan benda padat. Di dalam daerah ini, gradient lintang (*transfere gradien*) kecepatannya sangat besar dibandingkan dengan variasi longitudinalnya, dan tegangan gesemya mempunyai arti yang penting. Lapisan batas bisa laminar, turbulen atau transisional, dan kadang-kadang disebut sabuk gesekan (*frictionalbeli*).

Bila di sepanjang suatu pelat datar terdapat aliran yang homogen, maka kecepatan fluida tepat pada permukaannya adalah nol Karena adanya gaya gesek yang memperlambat gerakan fluida, sehingga terjadi lapisan tipis di dekat pelat tersebut. Di dalam lapisan batas, kecepatan fluida U naik dari nol di pelat hingga mencapai harga maksimumnya yang sesuai dengan kecepatan di dalam aliran luar tanpa gesekan U (Gb. 2.5). Tebal lapisan batas, Adalah jarak dari dan tegak lurus permukaan benda ke titik yang di titik tersebut kecepatan aliran mencapai harga yang sama dengan harga kecepatan aliran tanpa viskositas (*inviscid flow*) yang ekivalen. Dalam praktek, kecepatan ini kadang-kadang diambil sebesar 99% kecepatan aliran tanpa viskositas.



Gambar 2.3 Lapisan Batas disepanjang permukaan bidang

Penerapan hukum momentum untuk element volume yang berbeda tepat di belakang pelat menunjukkan bahwa momentum yang hilang persatuan waktu harus sama dengan tahanan yang dialami pelat tersebut.

$$\int_0^{\delta} \rho U (U_m - U) dy = \int_0^x \tau_0 dx = R \quad (2.33)$$

R adalah tahanan pada bagian pelat yang terletak antara 0 dan x, τ_0 adalah tegangan geser pada dinding dan sama dengan:

$$\tau_0 = \eta \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)_0 \quad (2.34)$$

Angka nol di bawah menunjukkan harga pada dinding, yaitu untuk $y = 0$. Di sini R sama dengan tahanan gesek R_f .

2.4 USAHA-USAHA PENGURANGAN HAMBATAN KAPAL

Pengurangan pemakaian energi pada pengoperasian kapal dapat dilakukan dengan berbagai cara, diantaranya yaitu dengan mengurangi hambatan yang terjadi. Hambatan pada kapal mempunyai peranan yang sangat signifikan terhadap besarnya pemakaian energi. Usaha pengurangan hambatan gesek menjadi sangat penting, hal ini dikarenakan hambatan gesek memiliki

nilai yang cukup besar dibandingkan dengan nilai hambatan sisa, terutama untuk kapal-kapal kecepatan rendah maupun sedang seperti kapal kargo. Pengurangan hambatan gesek dapat dilakukan dengan berbagai metode, yaitu dengan optimasi bentuk lambung, penambahan zat polimer, penambahan bantalan udara dan modernisasi bentuk lambung.

Modifikasi dari permukaan benda untuk mengatasi turbulensi dinamakan pasif kontrol. Hasil dari percobaan untuk mengurangi tingkat turbulensi yang terjadi pada batas padat permukaan menunjukkan pengurangan hambatan sebesar 7 % terjadi untuk *riblets rib* memanjang alur-V tertentu. Pada permukaan bola golf yang di kasarkan menghasilkan arus ikut (*wake*) yang terbentuk di belakang aliran mengecil sehingga menghasilkan lintasan bola golf tersebut lebih jauh. Aktif kontrol merupakan metode yang paling efektif untuk mendapatkan pengurangan hambatan pada lambung kapal, kapal selam dan torpedo dengan aplikasi menggunakan cat jenis polimer untuk mengurangi hambatan gesek, sehingga laju kecepatan kapal akan meningkat. Penggunaan gelembung udara menjadi salah satu hal yang menarik untuk diteliti. Pengaruh pengurangan hambatan menggunakan gelembung udara menjadi salah satu metode yang menjanjikan sebagai bagian solusi dari masalah pengurangan pemakaian energi.

Pada tahun 1973, McCormik dan Bhattacharyya [3] telah menggunakan elektrolisis kawat tembaga untuk menghasilkan gelembung mikro dalam pengurangan hambatan. Yashiki Kodama, dkk [4] menunjukkan bahwa gelembung mikro yang digunakan pada plat datar dapat mengurangi hambatan sebesar 23% pada kecepatan 7 m/s. Steven.L. Ceccio, dkk [5] pada tahun 2006 berhasil membandingkan hasil yang diperoleh oleh Ferrante dan Elghobashi serta Xu dengan menggunakan gelembung mikro dapat mencapai pengurangan *drag* sebesar 80% dan menyimpulkan bahwa gelembung mikro yang berukuran kecil sangat efektif. Kato [6] menggunakan model tanker dan menunjukkan bahwa terjadi fenomena pelapisan film udara di bawah lambung kapal. Untuk kapal tanker dan tongkang, lapisan film udara mencakup sebagian besar permukaan bawah lambung kapal.

Latorre dan Miller [7] meneliti pengaruh gelembung mikro pada kapal cepat dengan tipe catamaran dan menghasilkan pengurangan hambatan sebesar 8 %. Pengurangan hambatan pada kapal cepat masih sangat memungkinkan terjadi karena pengembangan prosedur dan mekanisme. Injeksi gelembung udara merupakan suatu metode yang menarik diteliti dalam usaha mengurangi hambatan gesek pada kapal. Pengaruh pengurangan hambatan menggunakan gelembung udara menjadi salah satu metode yang menjanjikan sebagai bagian solusi dari masalah pengurangan pemakaian energi.

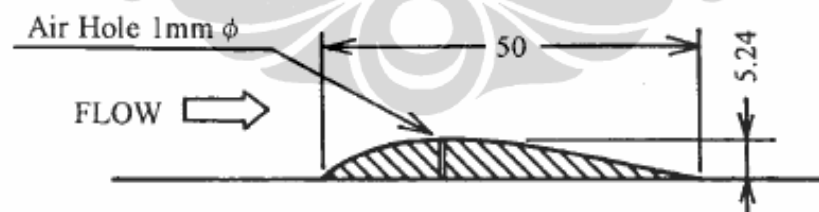
Metode pendekatan dengan menggunakan ventilated cavities (or air lubrication) mulai banyak diteliti pada tahun 2000-an. Pada pendekatan dengan cara air lubricated atau ventilated cavity, Frictional drag pada lambung kapal berkurang dengan cara menutupi bagian-bagian permukaan bawah lambung dengan sebuah air layer (atau ventilated cavity), yang dapat mengurangi luas bidang basah dari lambung kapal [8]. Hasil penelitian Matveev [9] menyatakan bahwa tenaga yang dibutuhkan untuk tekanan angin hanya 2% dari total tenaga mesin utama kapal dan dapat menghasilkan pengurangan hambatan (drag) sebesar 10- 30%.

Bogdevich et al [10] menemukan korelasi antara besarnya pengurangan hambatan pada kapal dengan maksimum foild fraksi pada lapisan batas. Ukuran gelembung juga merupakan faktor penting dalam mendapatkan besarnya nilai drag reduction (pengurangan hambatan). Ketika gelembung udara diinjeksikan lewat lubang nosel atau porous plat, ukuran gelembung udara tersebut banyak dipengaruhi oleh kecepatan aliran air dan kecepatan injeksi udara. Ukuran diameter lubang nosel tidak berpengaruh signifikan terhadap ukuran gelembung yang terjadi. Hal ini dikemukakan oleh Meng dan Ulman [11]. Pengaruh gelembung udara tersebut akan menurun seiring semakin ke belakang kapal. Sangat penting untuk mengetahui seberapa panjang gelembung udara tersebut bekerja secara optimal. Hal ini dimaksudkan agar aplikasi gelembung udara tersebut untuk kapal yang sebenarnya semakin mudah. Watanabe et al [12] telah meneliti tentang distribusi tegangan pada daerah sekitar lambung kapal model. Pengujian dilakukan dengan menggunakan dua

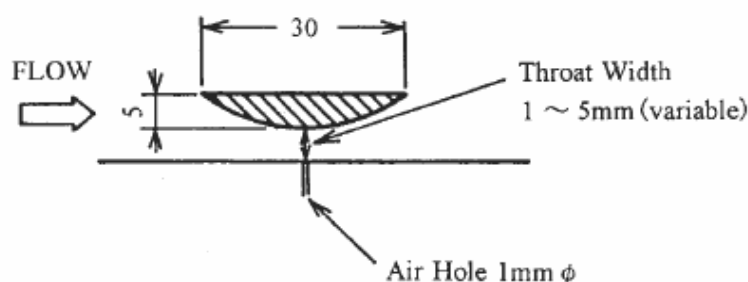
buah plat datar dengan panjang 20 m dan 40 m dengan lebar 0,6 m dan tinggi garis air 0,2 m. Kecepatan kapal model yang diuji adalah 7 m/s. Mekanisme pengurangan hambatan dengan menggunakan gelembung udara tidak bisa dijelaskan secara detail. Beberapa peneliti mengemukakan bahwa penggunaan gelembung udara dapat meningkatkan nilai viskositas efektif yang akan dibarengi dengan berkurangnya tegangan Reynolds. Hal ini akan menghasilkan perubahan distribusi kecepatan dan akan mengurangi gradient kecepatan pada sekitar dinding.

Kato et al [13] telah meneliti tentang metode injeksi gelembung udara untuk mengurangi hambatan gesek pada plat datar. Metode yang digunakan yaitu penambahan mikro bubble pada plat rata dengan kecepatan aliran air divariasikan dari 2 hingga 10 m/s. Pengujian dilakukan pada water tunnel. Diameter Injektor yang digunakan yaitu divariasikan 0,5 mm, 1 mm dan 1,5 mm. Kecepatan aliran air yang digunakan yaitu: 2,4,6,8 dan 10 m/s. Debit udara yang diinjeksikan yaitu: 20, 50, 100, 150 dan 230 ml/menit.

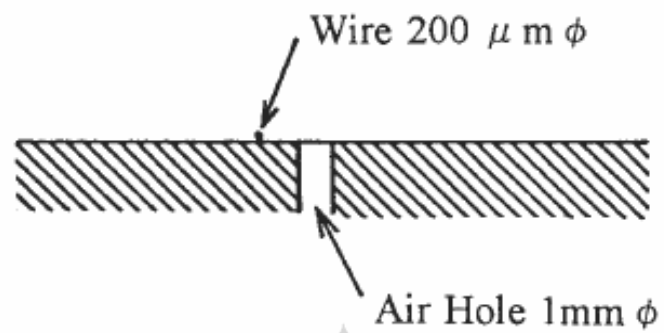
Cara injeksi bubble yang dilakukan Kato [13] yaitu divariasikan menjadi 3 macam variasi yaitu: bidang vertikal pada flat plate, 2D convex (semacam ada bentuk foil), 2D convergent-divergent (bentuk nozzle), vertikal dengan wire.



Gambar 2.4 Metode 2D convex [13]

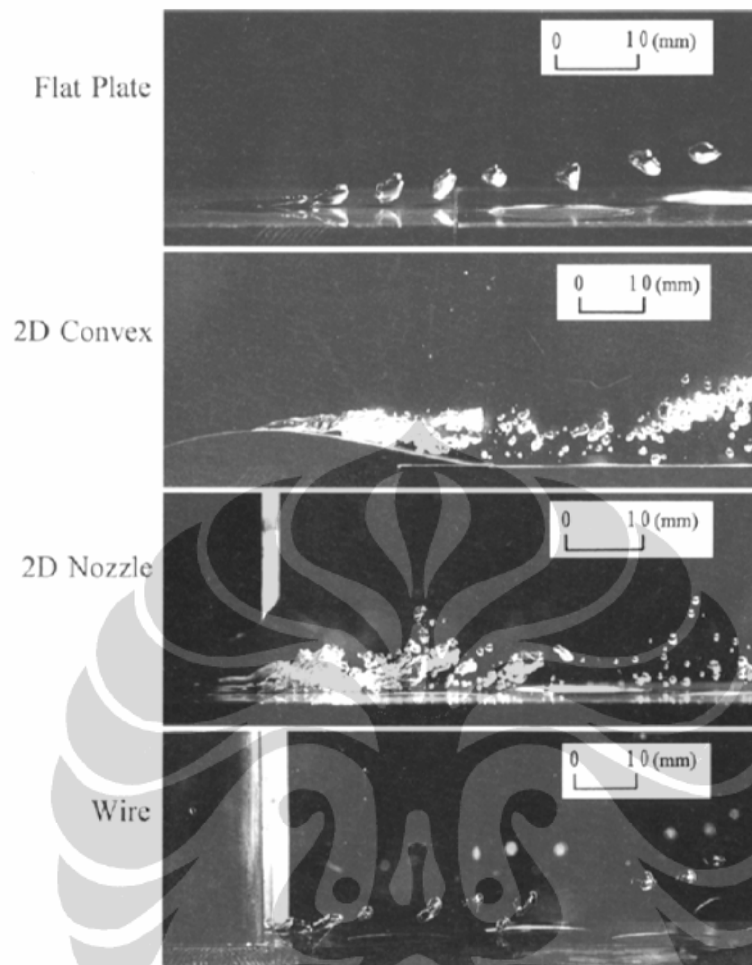


Gambar 2.5 Metode 2D convergent-divergent [13]



Gambar 2.6 Metode transverse wire [13]

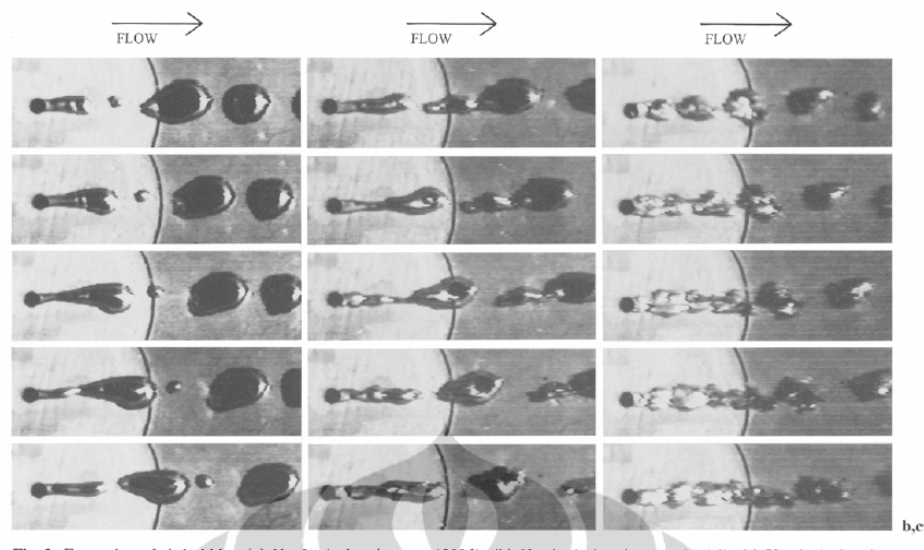
Hasil dari ketiga metode injeksi bubble tersebut berpengaruh terhadap karakteristik bubble yang terjadi. Ketiga metode tersebut juga dibandingkan dengan injeksi bubble secara biasa pada plat datar. Berikut hasil yang didapat dari ke empat variasi.



Gambar 2.7 Visualisasi pembentukan bubble dari berbagai metode [13]

Terlihat pada gambar di atas, karakteristik pembentukan bubble yang berbeda-beda. Pada plat datar biasa, bubble yang dihasilkan akan cenderung sedikit dan memiliki diameter yang cukup besar. Untuk metode 2D convex, bubble yang dihasilkan sangat halus dan memiliki daerah jangkauan yang paling luas.

Disamping itu, pengaruh dari kecepatan aliran air juga mempengaruhi diameter bubble yang dihasilkan. Berikut adalah visualisasi pengaruh keceootan air terhadap diameter bubble yang terjadi.



Gambar 2.8 Visualisasi pembentukan bubble dengan variasi kecepatan air. [13]

Gambar di atas menunjukkan bahwa diameter bubble yang terbentuk dipengaruhi oleh kecepatan aliran air. Semakin cepat aliran air, diameter bubble yang terbentuk akan semakin kecil. Kesimpulan dari penelitian Kato [13] ini yaitu :

- a. Ukuran bubble yang terbentuk dipengaruhi oleh kecepatan aliran air, debit udara yang diinjeksikan dan diameter dari injector.
- b. Ada tiga macam cara pembuatan bubble yaitu 2D convex, 2D convergent-divergent dan menggunakan wire. Dari ketiga metode tersebut, 2D convex adalah yang paling efektif untuk mendapatkan ukuran bubble terkecil.
- c. Metode 2D convex paling efektif untuk mengurangi nilai hambatan gesek

2.5 DRAG REDUCTION

Rasio pengurangan hambatan yang lebih dikenal dengan drag reduction (DR) adalah pengurangan hambatan pada suatu aliran baik aliran dalam pipa maupun aliran luar. Pengurangan hambatan juga dapat didefinisikan dengan pengurangan nilai koefisien gesek untuk aliran dalam pipa atau pengurangan koefisien bentuk untuk aliran luar. Untuk kapal, drag reduction diartikan sebagai pengurangan nilai koefisien hambatan total. Ada dua metode pengurangan hambatan (drag reduction) yang terus diteliti dan dikembangkan

yakni kontrol aktif dan kontrol pasif. Kontrol aktif adalah penggunaan atau penambahan energi luar dalam bentuk energi mekanik, listrik, panas, dll. Sementara kontrol pasif yaitu dengan memodifikasi bentuk atau geometri saluran/pipa.

Untuk menentukan besarnya pengurangan hambatan yang terjadi dapat digunakan persamaan berikut [14]:

$$DR(\%) = \left| \frac{C_T - C_{T0}}{C_{T0}} \right| \times 100\% \quad (2.35)$$

Dengan: DR adalah drag reduction (pengurangan hambatan), C_{T0} adalah koefisien hambatan total tanpa gelembung dan C_T adalah koefisien hambatan total dengan gelembung.

2.6 PEMBUATAN GELEMBUNG UDARA

Gelembung udara banyak ditemukan di alam raya. Gelembung tersebut bisa terjadi dengan sendirinya maupun dibuat untuk keperluan tertentu. Gelembung yang digunakan untuk keperluan tertentu misalnya pada industri pertambangan, penyulingan biji mineral. Pada industri perminyakan, gelembung digunakan untuk menaikkan minyak mentah dari dasar laut. Pada teknologi kapal laut gelembung digunakan untuk injeksi pada lambung kapal dengan maksud dapat mengurangi hambatan kapal yang terjadi. Dengan berkurangnya hambatan kapal tersebut, maka konsumsi bahan bakar akan semakin hemat dan mengurangi emisi yang dihasilkan oleh mesin kapal tersebut. Teknologi bubble (gelembung) juga digunakan untuk membersihkan lautan yang tercemar oleh tumpahan minyak mentah.

Salah satu mekanisme pembuatan bubble adalah dengan cara mengalirkan udara bertekanan melalui nosel ke dalam air. Udara yang mengalami tekanan tadi dengan sendirinya akan membentuk gelembung udara dan akan terlepas dari nosel naik ke permukaan air kemudian akan pecah. Bentuk-bentuk dan lintasan pergerakan dari gelembung-gelembung yang naik tadi bergantung dari bilangan Reynolds, bilangan Eotvos dan bilangan Morton.

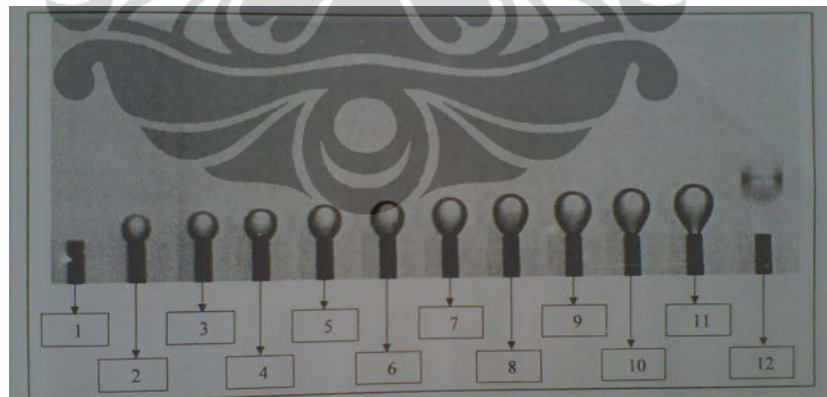
Beberapa peneliti telah menyelidiki mekanisme terbentuknya bubble, dan banyak hal telah dapat diterapkan dengan baik. Oguz dan Properetti [15] menunjukkan bahwa ada dua parameter yang dapat mempengaruhi terbentuknya bubble yaitu laju aliran udara dan keseimbangan radius gelembung. Selanjutnya Harkins [16] menyelidiki terbentuknya bubble pada kondisi aliran konstan dengan laju gas atau udara sangat rendah. Sedangkan Davidson dan Schuler [17] menyelidiki pengaruh laju aliran udara dan viskositas pada pembentukan bubble. Mereka berkesimpulan bahwa volume bubble merupakan fungsi dari laju aliran udara dan viskositas.

Gaya-gaya yang bekerja pada pembentukan bubble melalui satu nosel yaitu:

1. Gaya apung (bouyancy force)
2. Gaya tegangan permukaan cairan (surface tension force)
3. Momentum fluks
4. Gaya inersia
5. Gaya seret (drag force)

Mekanisme pembentukan bubble pada satu nosel telah diteliti oleh Manus [18], hasil dari penelitian tersebut yaitu:

1. Pembentukan bubble untuk kecepatan air 0 (air dalam keadaan diam)

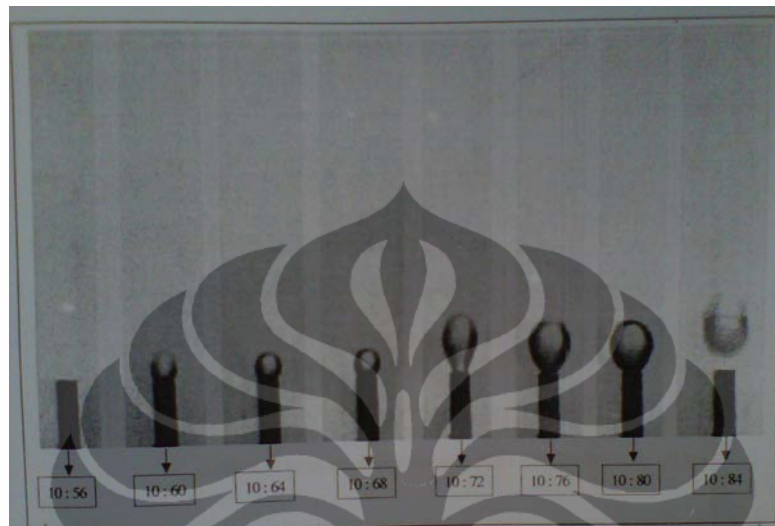


Gambar 2.9 Tahapan pembentukan bubble dengan debit air 0 [18]

Pada gambar di atas terlihat tahapan pembentukan gelembung udara pada debit air 0. Mulai dari awal pembentukan hingga pelepasan bubble dari nosel membutuhkan waktu sekitar 0,42 detik. Bentuk bubble pada awal yaitu bulat kecil, makin lama bentuknya makin besar dan bulat. Sebelum

lepas dari nosel, bubble berbentuk mirip dengan biji buah jeruk yaitu terdapat cekikan yang kemudian akan terputus.

2. Pembentukan bubble untuk debit air 2,5 liter per menit



Gambar 2.10 Tahapan pembentukan bubble dengan debit air 2,5 liter per menit [18]

Gambar di atas adalah proses pembentukan bubble pada debit air 2,5 liter per menit. Dibutuhkan waktu 0,28 detik mulai dari pembentukan hingga bubble tersebut lepas. Bentuk bubble diawali dengan bulat kecil, kemudian bentuknya berubah menjadi lonjong. Sebelum bubble terlepas, bentuknya menjadi bulat kembali dan kemudian terlepas.

Penelitian ini mendapatkan hasil yaitu bahwa diameter bubble menurun dengan bertambahnya kecepatan air. Frekuensi pembentukan bubble bertambah dengan meningkatnya kecepatan air.

BAB III

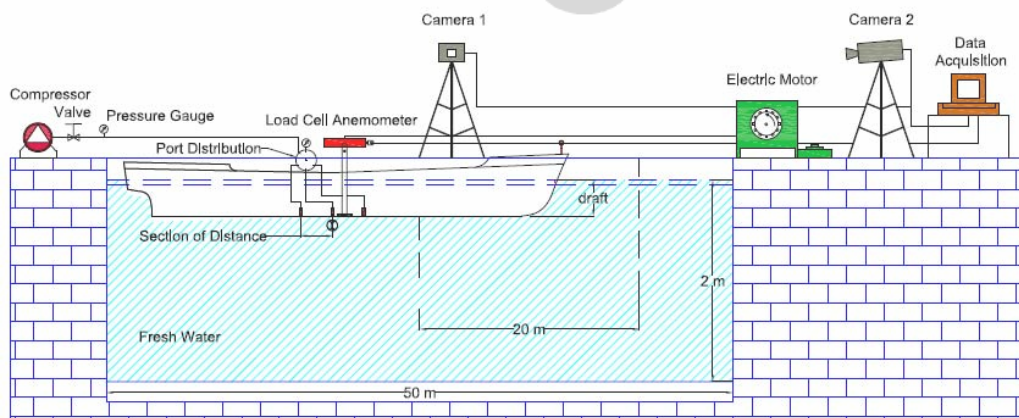
METODOLOGI PENELITIAN

Sifat Tahanan Kapal sangat rumit, untuk memperkirakan besarnya tahanan kapal orang harus melakukan percobaan. Dari sekian percobaan tersebut lahirlah tangki tarik (towing tank) yang di lengkapi kereta penarik (towing carriage) yang bergerak secara mekanis. Froude mengemukakan hukum perbandingan (Froude's Law of Comparison) pada tahun 1868 dan menunjukkan penggunaan dalam praktek untuk memperkirakan besarnya tahanan kapal dari hasil percobaan model. Sampai sekarang dasar yang diterima untuk memperkirakan besarnya tahanan kapal dari hasil percobaan model merupakan asumsi Froude, yang menyatakan bahwa tahanan total suatu kapal dapat dibagi menjadi tahanan gesek (C_f) dan tahanan sisa (C_r). C_f merupakan fungsi dari angka *Reynolds* dan C_r dianggap sama untuk model dan kapal pada harga $V/(g \times Lpp)^{1/2}$.

3.1 SPESIFIKASI ALAT UJI

Eksperimen ini dilakukan di kolam renang umum milik BUPERTA CIBUBUR dengan ukuran kolam percobaan sebagai berikut:

- Panjang : 50 meter
- Lebar : 20 meter
- Kedalaman : 2 meter



Gambar 3.1. Eksperimental Setup

Gambar 3.1 eksperimental set up yang terdiri dari motor listik, load cell anemometer, kapal model, alat injeksi gelembung udara, 2 buah kamera high speed, tali penarik dan data akusisi. Pengujian dilakukan di kolam percobaan dengan panjang 50 m, lebar 20 m, dan kedalaman air 2 m. Model ini terhubung ke transduser load cell dengan kapasitas beban maksimum sebesar 5 kg pada satu titik di bagian tengah kapal dan vertikal di atas base line. Hal ini memungkinkan kapal model untuk bergerak bebas dalam bidang vertikal. Hambatan total diukur untuk masing-masing percobaan selama rentang bilangan Froude tertentu.

Adapun bagian-bagian utama dari alat penelitian yang digunakan adalah sebagai berikut:

3.1.1 Model Kapal

Model kapal sudah tersedia tanpa harus merancang dan membuatnya, spesifikasi dari kapal tersebut adalah:

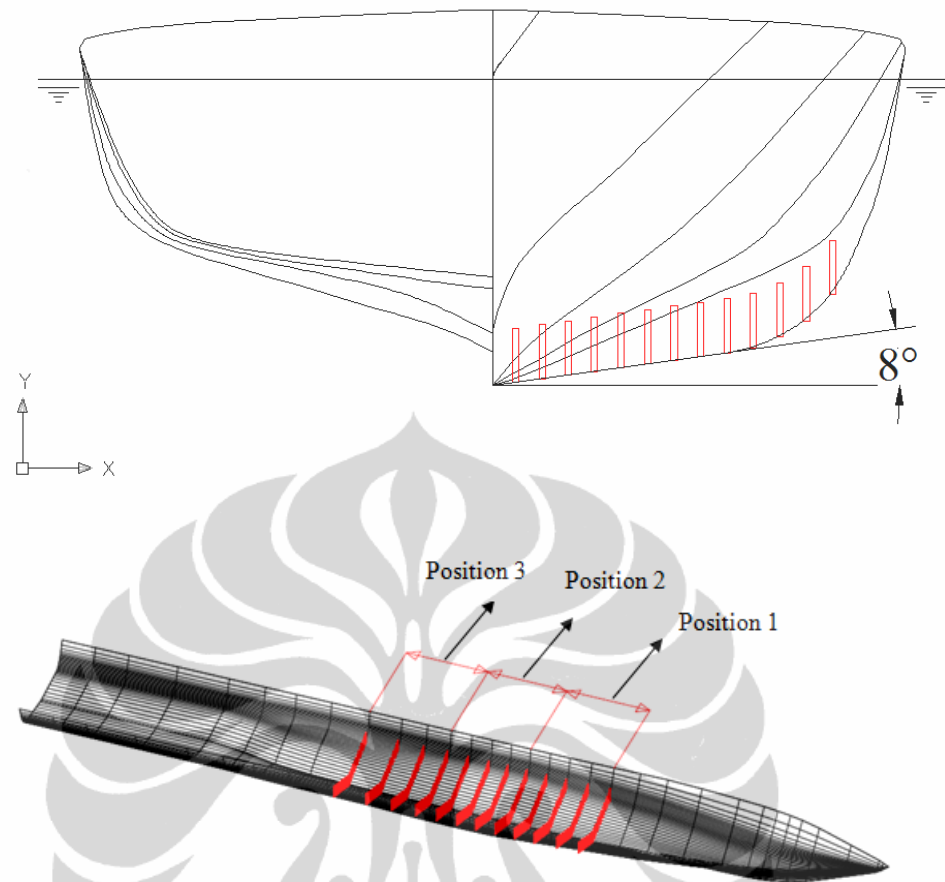
Jenis model kapal: FPB 57

Skala: 1:25

Ket	mm
Lpp	2450
B	400
T	190
Cb	0,54



Gambar 3.2. Model kapal FPB 57 (fast patrol boat)



Gambar 3.3. Lines Plan dan Posisi Peletakan Nozzle

Gambar 3.2 adalah Model kapal FPB 57 pada skala 1:24 dengan panjang 2450 mm lebar 400 mm dan sarat kedalaman 190 mm. Pada gambar 3.3 terlihat lines plan kapal model dan variasi peletakan injeksi gelembung udara. Injeksi gelembung udara keluar dari nosel dengan diameter 0.5 mm masing-masing sebanyak 20 lubang pada setiap posisi penempatannya (posisi 1 sampai dengan 3). Zona pertama adalah jarak 7,5 hingga 16,5 depan midship. Zona kedua adalah daerah 4,5 cm depan midship dan 4,5 cm belakang midship, sedangkan zona tiga adalah 7,5 hingga 16,5 di belakang midship. Jarak antar lajur injector adalah 3 cm. Variasi kecepatan gelembung, dan debit injeksi gelembung diatur dengan katup. Penempatan zona tersebut didasarkan atas letak titik acuan tarik kapal model yaitu pada sekitar pusat grafity dan buoyancy. Letak titik tarik tersebut di sekitar

midship kapal. Penempatan pertama yaitu berada di depan titik tersebut, penempatan ke dua disekitar daerah titik tarik dan penempatan ketiga di belakang daerah titik tarik. Hal ini dimaksudkan untuk mengetahui fenomena yang terjadi.

3.1.2 Alat Penarik Model Kapal

Alat penarik berfungsi untuk menarik kapal model dengan kecepatan yang dapat diatur sebagai asumsi kapal model bergerak dengan gaya dorong (propulsi).



Gambar 3.4. Motor Penarik

Alat penarik ini merupakan satu rangkaian komponen-komponen yang dirakit menjadi satu kesatuan. Komponen-komponen tersebut adalah :

✓ Rangka

Rangka yang digunakan adalah besi siku berlubang yang disambung dengan menggunakan baut dan disusun sedemikian sehingga sehingga kokoh untuk menahan berat dari motor listrik dan gulungan tali.

✓ Motor Listrik

Motor listrik disambungkan dengan gulungan tali yang dihubungkan dengan belt. Fungsi dari motor listrik ini nantinya adalah untuk memutar gulungan tali dimana tali tersebut akan menarik kapal model.

✓ Gulungan Tali

Gulungan tali yang menggunakan silinder hollow berbahan plastik dengan diameter 120 mm

✓ Tali

Tali yang digunakan adalah berbahan serat nylon yang mampu menahan tegangan tali pada saat menarik kapal

✓ Pulley

Dua buah pulley digunakan untuk mereduksi putaran motor listrik. Pulley dihubungkan pada gulungan tali dan pada poros motor listrik.

✓ Saklar (switch ON/OFF)

Saklar digunakan untuk menghidupkan dan mematikan motor listrik.

3.1.3 Kompresor

Kompresor digunakan menyuplai udara pada kapal model. Kompresor ini dihubungkan dengan selang kecil yang terhubung langsung pada kapal model. Kompresor yang digunakan adalah kompresor bertekanan rendah yang biasa digunakan untuk pengecatan.



Gambar 3.5 Kompresor udara

3.1.4 AC Voltage Regulator

AC Voltage Regulator adalah suatu alat yang dapat mengatur voltase keluaran. AC voltage regulator digunakan untuk mengatur putaran motor dengan mengatur voltase masukan yang dapat diubah sesuai keinginan. Spesifikasi teknik dari AC voltage regulator yang digunakan adalah :

Merk : OKI

Input : 220V 50/60 Hz

Output : 0 – 250V

Cap : 2000 VA



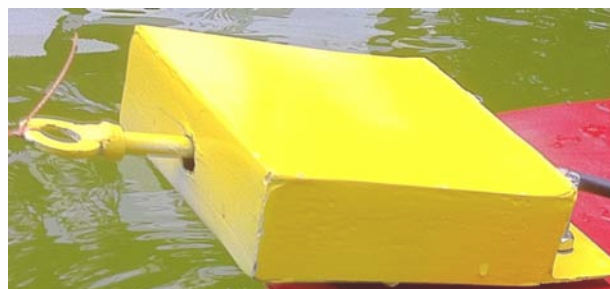
Gambar 3.6 AC Voltage Regulator

1.1.5 **Beban**

Beban digunakan untuk membuat variasi kedalaman lambung kapal terhadap permukaan air. Beban terbuat dari bungkus pasir dengan variasi beban 1 kg dan 2 kg.

3.1.6. **Load Cell Transducer**

Load cell transducer digunakan untuk mengukur gaya tegangan tali penarik saat kapal berjalan dengan kecepatan tertentu. Hasil pengukuran tersebut dibaca oleh interface data akusisi. Gaya tegangan tersebut sebenarnya merupakan hambatan total kapal model. Load cell yang digunakan adalah tipe tension load cell dengan kapasitas maksimum sebesar 5 kg.



Gambar 3.7 Load Cell transducer

3.2 PROSEDUR UJI TARIK

Selama percobaan uji tarik, kapal model ditarik oleh motor listrik yang telah dirancang sedemikian rupa sehingga putaran motor bisa digunakan untuk menarik kapal model dan gaya tarik diukur dengan menggunakan sebuah *load cell*. *Load cell* tersebut ditempelkan di kapal model dan dihubungkan ke tali penarik. Load Cell juga dihubungkan ke data akuisisi untuk pembacaan tegangan yang terjadi dengan bantuan komputer.

Ada 4 jenis variasi percobaan Uji Tarik yang dilakukan yaitu:

1. Kapal model tanpa penambahan gelembung udara
2. Kapal model dengan injeksi gelembung udara posisi 1
3. Kapal model dengan injeksi gelembung udara posisi 2
4. Kapal model dengan injeksi gelembung udara posisi 3

Variasi kecepatan kapal, dimana variasi kecepatan kapal didapatkan dari jarak percobaan pengambilan data dibagi dengan waktu yang ditempuh oleh kapal untuk mencapai jarak percobaan tersebut. Jarak percobaan data pada percobaan ini adalah 8 m. Pada saat uji tarik data yang diambil adalah Gaya Tarik (F), dan Waktu (t).

Percobaan ini dilakukan dalam kondisi air tenang untuk 6 kecepatan yang berbeda. Langkah-langkah uji tarik sebagai berikut:

1. Pada setiap percobaan uji tarik kapal model ditempelkan dengan *load cell* pada *bagian centre gravity* kapal model, setelah itu *load cell* dihubungkan ke tali penarik.
2. Jarak lintasan percobaan adalah 8 m (setelah kapal berjalan 5 m)
3. Untuk memulai penarikan kapal model, motor listrik dinyalakan setelah diberi aba – aba, kapal model dilepas dan perekam video pada kamera digital dinyalakan. Untuk mengetahui besarnya tegangan tali, maka data akuisisi dihidupkan sehingga data percobaan akan terekam sesuai dengan kemauan kita.

Universitas Indonesia

Digunakan 200 data tiap detik. Stopwatch juga dihidupkan begitu ujung kapal melewati tali pembatas 1. Saat kapal model menyentuh batas di ujung 2 maka countdown timer dimatikan setelah itu dicatat waktunya, begitulah langkah – langkah untuk setiap percobaan.

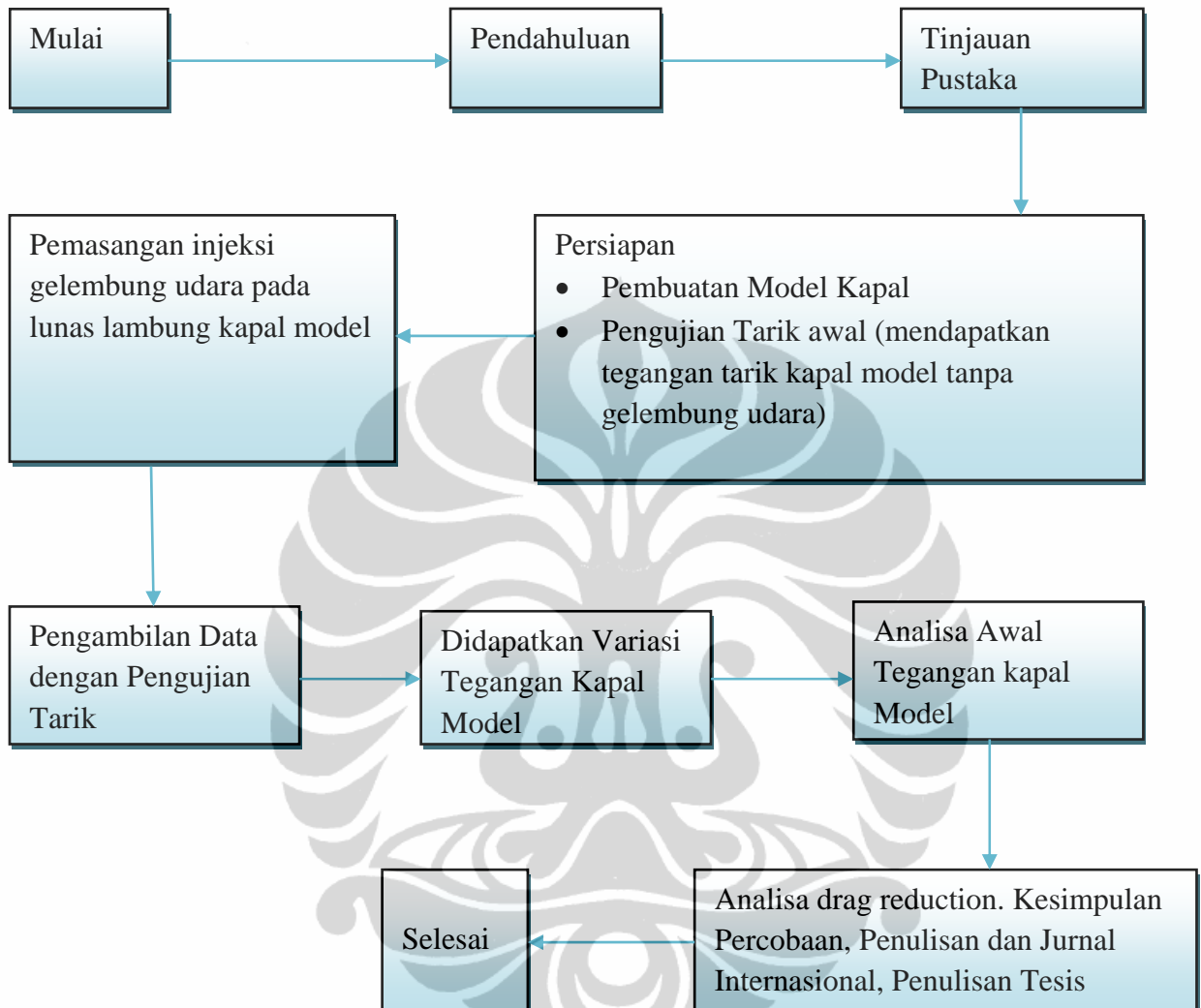
4. Kapal model tersebut diberikan beban hingga draft maksimum tercapai dengan menggunakan bungkus pasir yang telah disiapkan.

5. Lakukan langkah tersebut untuk variasi kecepatan yang berbeda (6 variasi kecepatan) dengan cara mengatur viltage regulator sehingga putaran motor listrik dapat divariasikan.

6. Lakukan langkah 1 sampai 5 untuk kapal model dengan penambahan injeksi gelembung baik pada penempatan 1, 2 maupun 3.

7. Tentunya sebelum dilakukan uji tarik untuk kapal model dengan injeksi gelembung udara, pastikan bahwa injektor telah terhubung ke pipa pipa kecil dari kompresor dan pastikan udara keluar secara lancar atau tidak tersumbat.

Bagan alir penelitian:



BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 DATA UJI TARIK KAPAL TANPA GELEMBUNG UDARA

Data Uji tarik berupa tegangan tali (R_T) dengan kecepatan kapal. Namun, data lengkap tentang percobaan ini disertakan dalam lampiran. Berikut adalah data hasil pengolahan dengan bantuan formulasi pada bab 2. Data di bawah ini adalah nilai koefisien hambatan total dengan bilangan Froudes untuk kapal tanpa injeksi gelembung udara.

Tabel1. Data hasil pengolahan untuk percobaan tarik kapal tanpa injeksi gelembung udara.

C_T	Fr
0,0056	0,29
0,0049	0,38
0,0042	0,47
0,0039	0,52
0,0036	0,58
0,0033	0,63

4.2 DATA UJI TARIK KAPAL DENGAN INJEKSI GELEMBUNG UDARA POSISI 1

Data Uji tarik berupa tegangan tali (R_T) dengan kecepatan kapal. Namun, data lengkap tentang percobaan ini disertakan dalam lampiran. Berikut adalah data hasil pengolahan dengan bantuan formulasi pada bab 2. Data di bawah ini adalah nilai koefisien hambatan total dengan bilangan Froudes untuk kapal dengan injeksi gelembung udara posisi 1.

Tabel 2. Data hasil pengolahan untuk percobaan tarik kapal dengan injeksi gelembung udara posisi 1.

C_T	Fr
0,0055	0,31
0,0050	0,37
0,0044	0,44
0,0040	0,51
0,0035	0,58
0,0032	0,65

4.3 DATA UJI TARIK KAPAL DENGAN INJEKSI GELEMBUNG UDARA POSISI 2

Data Uji tarik berupa tegangan tali (R_T) dengan kecepatan kapal. Namun, data lengkap tentang percobaan ini disertakan dalam lampiran. Berikut adalah data hasil pengolahan dengan bantuan formulasi pada bab 2. Data di bawah ini adalah nilai koefisien hambatan total dengan bilangan Froudes untuk kapal dengan injeksi gelembung udara posisi 2.

Tabel 3. Data hasil pengolahan untuk percobaan tarik kapal dengan injeksi gelembung udara posisi 2.

C_T	Fr
0,0055	0,32
0,0050	0,38
0,0045	0,44
0,0039	0,51
0,0034	0,59
0,0031	0,65

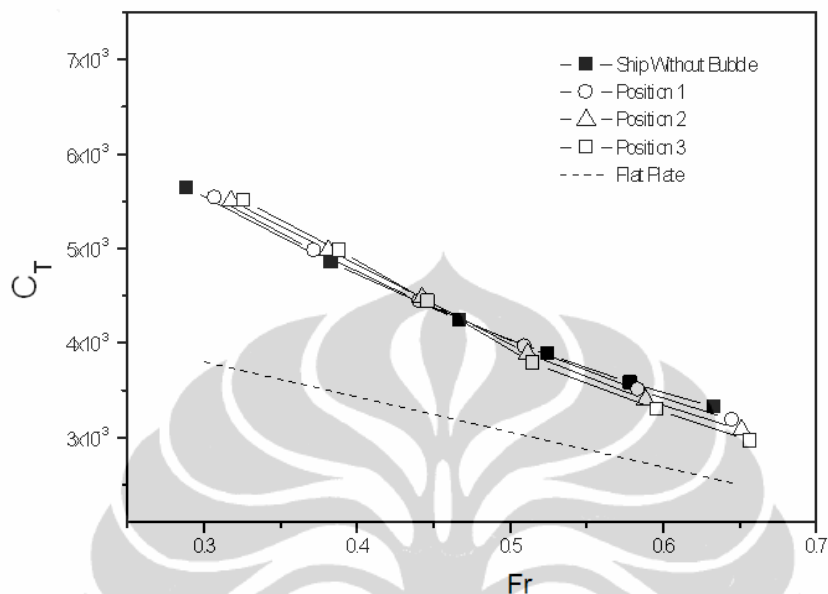
4.4 DATA UJI TARIK KAPAL DENGAN INJEKSI GELEMBUNG UDARA POSISI 3

Data Uji tarik berupa tegangan tali (R_T) dengan kecepatan kapal. Namun, data lengkap tentang percobaan ini disertakan dalam lampiran. Berikut adalah data hasil pengolahan dengan bantuan formulasi pada bab 2. Data di bawah ini adalah nilai koefisien hambatan total dengan bilangan Froudes untuk kapal dengan injeksi gelembung udara posisi 3.

Tabel 4. Data hasil pengolahan untuk percobaan tarik kapal dengan injeksi gelembung udara posisi 3.

C_T	Fr
0,0055	0,33
0,0050	0,39
0,0044	0,45
0,0038	0,52
0,0033	0,60
0,0030	0,66

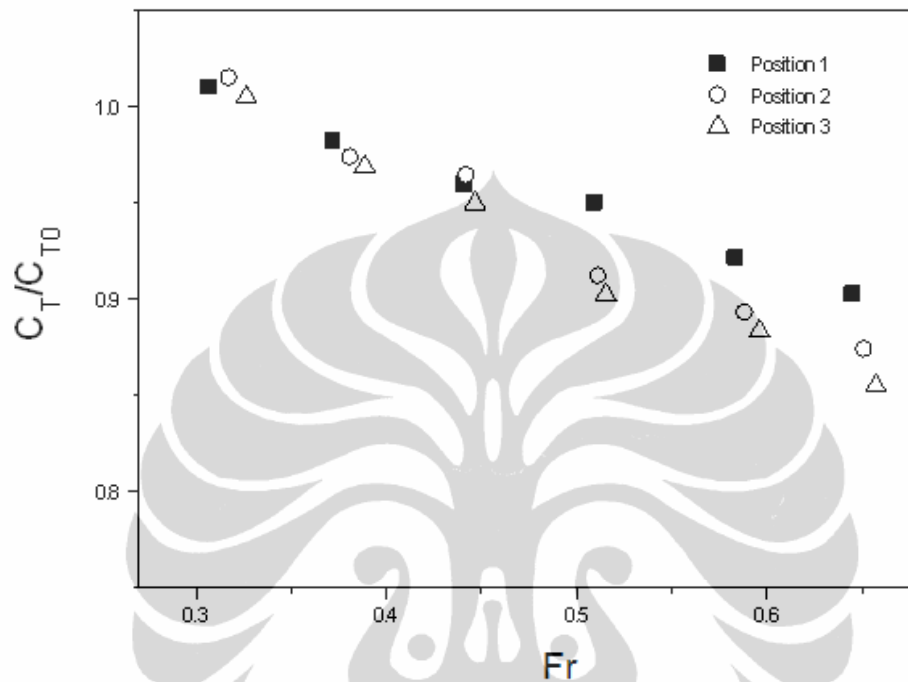
4.5 PEMBAHASAN



Gambar 4.1. Hubungan koefisien hambatan total dengan bilangan Froude

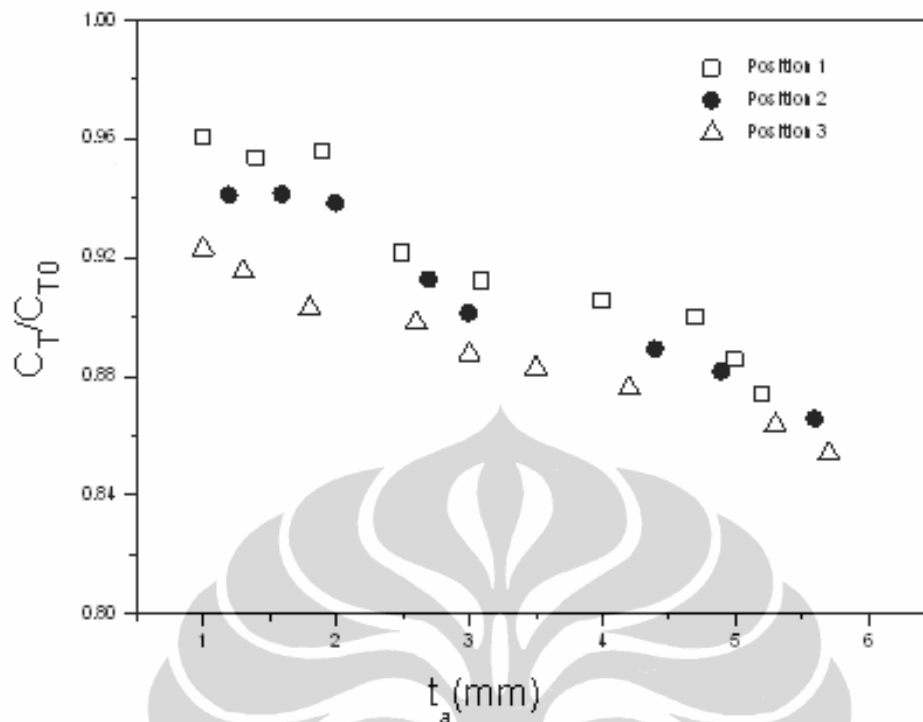
Gambar 4.1 menunjukkan hubungan koefisien hambatan total dengan bilangan Froude untuk kapal dengan gelembung udara dan tanpa gelembung udara. Terlihat bahwa model kapal dengan injeksi gelembung udara, memiliki nilai C_T relatif lebih tinggi pada kecepatan rendah. Namun, seiring bertambahnya bilangan Froude, pada kisaran tertentu nilai C_T lebih kecil dari kapal model tanpa gelembung udara. Hal ini dapat dikatakan bahwa efek dari injeksi gelembung udara hanya terjadi pada bilangan Froude tinggi di mana koefisien hambatan aliran turbulen lebih kecil. Nilai C_T juga tergantung pada posisi peletakan injektor. Terlihat bahwa injeksi posisi 3, memiliki nilai C_T terkecil. Kita dapat menyimpulkan bahwa posisi injektor mempengaruhi nilai hambatan total. Garis putus-putus merupakan koefisien gesek pelat datar, dimana pada plat rata memiliki nilai koefisien hambatan total lebih kecil dibanding kapal model. Peletakan posisi tersebut tidak berkaitan dengan zona-zona boundary layer yang ditimbulkan seperti pada pelat datar. Bentuk lambung kapal yang unik, tentunya memiliki zona boundary layer yang tidak sama dengan plat datar. Peletakan injektor terbagi menjadi tiga zona disebabkan karena akapasitas kompresor yang

digunakan rendah. Sehingga tidak memungkinkan untuk dilakukan injeksi seluruh lambung kapal. Jika dilakukan injeksi seluruh lambung kapal, konsekuensinya harus menambahkan daya kompresor. Hal ini tentunya akan menambah nilai drag reduction yang terjadi.



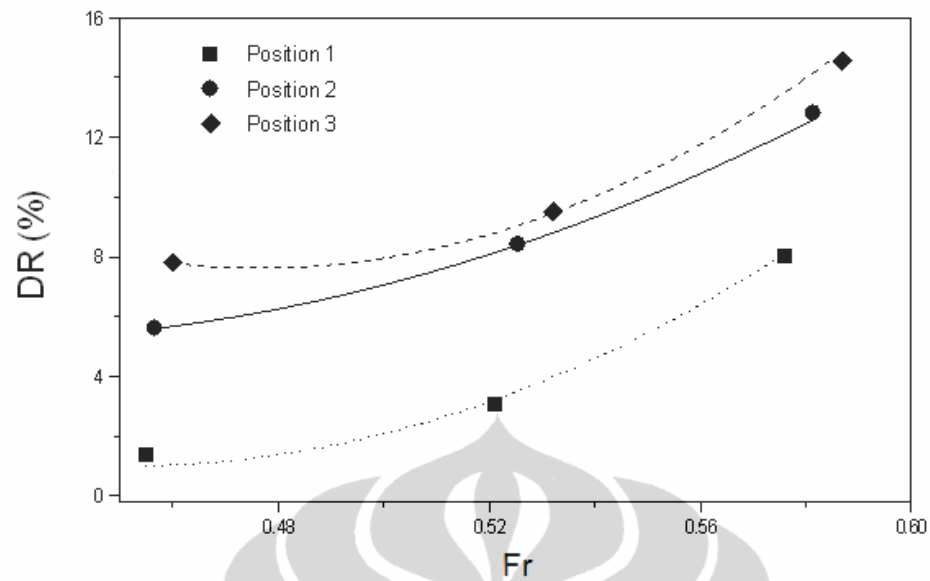
Gambar 4.2. Rasio hambatan total masing-masing peletakan injector

Gambar 4.2 menunjukkan hubungan antara rasio hambatan total dan bilangan Froude. Sumbu horizontal adalah bilangan Froude, dan sumbu vertikal menunjukkan rasio hambatan total dengan atau tanpa injeksi gelembung. Semakin besar bilangan Froude maka rasio koefisien hambatan total semakin kecil. Nilai rasio koefisien hambatan total lebih kecil dari 1 menunjukkan bahwa terjadi pengurangan hambatan. Seperti ditunjukkan dalam Gambar 6, pengurangan hambatan total mulai terjadi pada bilangan Froude lebih tinggi dari 0,34.



Gambar 4.3. Hubungan antara rasio hambatan total dengan ketebalan lapisan udara

Gambar 4.3 menunjukkan hubungan rasio hambatan total dengan ketebalan lapisan udara. Sumbu horizontal adalah ketebalan lapisan udara yang merupakan pengaruh dari debit udara yang diinjek. Semakin besar ketebalan lapisan udara, maka semakin kecil rasio hambatan total yang terjadi. Ketebalan lapisan udara yang efektif adalah 4 mm, karena di daerah ini kecepatan model kapal adalah 4 m/s dan memiliki kinerja terbaik. Rasio koefisien hambatan total untuk posisi 3 sedikit lebih rendah dari posisi 2 dan posisi 1. Hal ini menunjukkan bahwa posisi 3 adalah posisi terbaik untuk mengurangi hambatan total yang terjadi.



Gambar 4.4. Hubungan antara rasio pengurangan hambatan (drag reduction) dengan bilangan Foude

Gambar 4.4 menunjukkan pengurangan hambatan yang terjadi pada masing-masing peletakan injektor. Terlihat bahwa untuk posisi 3 mendapatkan pengurangan hambatan lebih besar dibanding posisi 1 dan 2. Drag reduction mulai terjadi pada bilangan Froude sekitar 0,34 ($V = 22$ knot). Semakin besar bilangan Froude, semakin besar pula nilai drag reduction yang terjadi. Nilai drag reduction efektif untuk penelitian ini adalah sampai dengan 9% pada $Fr = 0,55$ ($V = 25$ knot).

BAB V

KESIMPULAN

Penambahan gelembung udara pada kapal model berpengaruh terhadap nilai koefisien hambatan total. Pengaruh injeksi gelembung udara terlihat signifikan untuk nilai bilangan Froude tinggi. Hasil pengujian menunjukkan bahwa pengurangan hambatan total dapat dicapai hingga 9% pada $Fr = 0,55$ ($V = 25$ knot). Laju aliran udara dan posisi injeksi gelembung udara berpengaruh signifikan terhadap pengurangan hambatan total. Lokasi injeksi gelembung udara di belakang midship (posisi 3) adalah lokasi terbaik untuk mendapatkan pengurangan hambatan total.



DAFTAR PUSTAKA

- [1] Saeed Seif M, Taghi Tavakoli M, (2004) “New Technologies for Reducing Fuel Consumption in Marine Vehicles” Proceeding SORTA XVI. Croatia
- [2] ITTC’ 2002, Testing and Extrapolation Methods in Resistance Towing Tank Tests, Recommended Procedures and Guidelines, 2002.
- [3] Mc Cormick ME, Bhattacharyya R (1973) Drag reduction of a submersible hull by electrolysis. *Nav Eng J* 85:11-16.
- [4] Takahashi, T., Kakugawa, a., Kodama, Y., and Makino, M. (2001), “Experimental study on drag reduction by microbubbles using a 50m-long flat splate ship” TSFP-2, 2nd Int. Symp. On Turbulence and Shear Flow Phenomena, Vol. 1, pp. 175-180.
- [5] Madavan NK, Deutsch S, Merkle CL (1985) Measurements of local skin friction in a micro-bubble-modified turbulent boundary layer. *J Fluid Mech* 156:237-256.
- [6] Kato H, Miyanaga M, Yamaguchi H et al (1994) Frictional drag reduction by injecting bubbly water into a turbulent boundary layer and the effect of plate orientation. In: Serizawa A, Fukano T, Bataille J (eds) *Advanced in multiphase flow*. Elsevier, Amsterdam, pp 86-96.
- [7] Latorre, R., Bablenko, V., 1998. Role of bubble injection technique in drag reduction. *Proc. ONR-NUWC International Symposium on Seawater Drag Reduction*, Newport RI, pp. 319-326.
- [8] Watanabe, O. Et al., 1998. “Measurements of Drag Reduction by Microbubbles Using Very long Ship Models”, *J. Of Soc. Naval architects, Japan*, vol. 183, pp. 53-63.
- [9] Kato, H., Miura, K., Yamaguchi, H, Miyanaga, M., 1998A, “Experimental Study on Microbubble Ejection Method for Frictional Drag Reduction”, *Journal of Marine Science and Technology*, Vol. 3, No. 3, pp. 122-129.
- [10] Bogdevich, V.G., Eves A.R., et al. 1999, “ Gas Saturated Effect on Near Wall Turbulence Characteristics”. *Second International Conference on Drag Reduction*, Cambridge, England, BHRA, pp. 25-37
- [11] Meng J.C.S, Uhlman, Jr., J.R.J.S. “Micrabubbles Formation and Splitting in a Turbulent Boundary Layer for Turbulence Reduction”. *Sysposium in Honor of Maurice Jolon on his 70 th Birthday*.

- [12] Watanabe, O. Et al., 1998. "Measurements of Drag Reduction by Microbubbles Using Very long Ship Models", J. Of Soc. Naval architects, Japan, vol. 183, pp. 53-63.
- [13] Kato, H., Miura, K., Yamaguchi, H, Miyanaga, M., 1998A, "Experimental Study on Microbubble Ejection Method for Frictional Drag Reduction", Journal of Marine Science and Technology, Vol. 3, No. 3, pp. 122-129.
- [14] Latorre R, Miller A, Philips R, "Microbubble resistance reduction on a model SES catamaran", Journal of Ocean Engineering 30 (2003) 2297-2309. Elsevier.
- [15] Oguz, H. N. and Prosperetti A. 1990 "Bubble entrainment by the impact of drops on liquid surfaces". *J. Fluid Mech.*, 219. 143-179.
- [16] Harkins. 2001. "Coupled pulsation and translation of two gas bubbles in a liquid" *Journal of Fluid Mechanics* **445**, 377-411 (2001)
- [17] J. F. Davidson and B. O. G. Schuler, 1960 "Bubble formation at an orifice in a viscous liquid," Trans. Inst. Chem. Eng. **38**, 144.
- [18] Manus Setyantono. 2005. Seminar Tesis, Pengaruh Kecepatan Air pada Diameter Bubble. Universitas Indonesia.
- [19] Kato, H., Iwashina, T., Miyanaga, M., Yamaguchi, H. et al., 1999. Effect of micro-bubbles cluster on turbulent flow structure. IUTAM Symposium on Mechanics of Passive and Active Flow Control. 255-260.

LAMPIRAN

1. Jurnal Telah Accepted sedang proses Revisi

Journal of Marine Science and Application



Micro-bubble Drag Reduction on a High Speed Vessel Model

Journal:	<i>Journal of Marine Science and Application</i>
Manuscript ID:	JMSA-2011-07-0070
Manuscript Type:	Original Article
Keywords:	Resistance < hydrodynamics/fluid dynamics/flow dynamics < Naval Architecture, hydrodynamics/fluid dynamics/flow dynamics < Naval Architecture, Propulsion < hydrodynamics/fluid dynamics/flow dynamics < Naval Architecture

SCHOLARONE™
Manuscripts

<http://jmsa.hrbeu.edu.cn>

Universitas Indonesia

Micro-bubble Drag Reduction on a High Speed Vessel Model

Abstract: Ship hull form in the underwater area is strongly influence to resistance reduction on ship. The major part of ship's resistance is skin friction resistance. Use of bulbous bow, polymer paint, water repellent paint (highly water-repellent wall), air injection, and specific roughness as an attempt by researchers to obtain the resistance reduction and operation efficiency of ships. Micro bubble injection is one of promising technique to lower frictional resistance. The injected air bubbles are supposed to somehow modify the energy household inside a turbulent boundary layer and thereby lower the skin friction. The purpose of this study to determine the effect of the injection of micro bubbles by using a Fast patrol boat (FPB) 57 type model of the Navy's with main dimensions $L = 2450$ mm, $B = 400$ mm and $T = 190$ mm. The influence of micro bubbles injection location and bubble velocity will be also investigated. The ship model is pulled by an electric motor which the motor speed can be varied and adjusted. Then the ship model resistance is precisely measured by a load cell transducer. Comparison of ship resistance with and without micro-bubble injection is shown on the graph as a function of the drag coefficient and Froude number. The location of micro bubble injection behind the mid-ship is the best position to get an effective drag reduction. The model test result showed that micro bubble drag reduction could result in a possible total drag decrease of 6 - 9%.

Keywords: ship model test, micro-bubble injection, drag reduction.

Article ID:

1 Introduction

Ship resistance reduction has been one of the major targets of research and development of naval architects for a long time. Resistance characteristics are principal aspects of the ship design spiral as they are strongly coupled with speed and fuel economy and, consequently, the operating and cost efficiencies of the vessel. Micro bubble is one of the most promising methods for the reduction of skin friction resistance. Documented drag reduction techniques include electrolysis induced micro-bubbles was reported by McCormick and Bhattacharyya [1]. The survey of Latorre and Bablenko [2] showed the reduction in the local skin friction is sensitive to the bubble orientation on the surface. Madavan et al. [3] carried out an experiment using the boundary layer of the test section wall of a water tunnel with injection of air from a porous plate. The result showed that with injection micro bubble in the turbulent boundary layer of flat plate can reduce the drag of 15-80%. The bubble size and location of the injection points are important parameters in the persistence of drag reduction. The relation between the bubble size and the drag reduction was examined by Kato et al [4]. The results showed that the decrease in the bubble size according to the increase in the main flow velocity cause a larger reduction rate of skin friction. Experiments by Watanabe & Shirose [5] and Takahashi et al. [6] indicate that air lubrication do not persist over long length/time scales.

Micro bubble drag reduction for flat plate and low speed vessel has been investigated by many researchers. Kato [7] use model tanker for experiment and showed that bottom air film escapes around the hull sides without the use of

longitudinal air guards set at the bilge. For tankers and barges with moderate length to beam L/B hulls, the bottom air covers a large percentage of the wetted surface. Latorre and Miller [8] investigated a micro bubble influence on fast ship boat type catamaran and conclude that drag reduction occur about 6%. The possibilities of micro bubble drag reduction in high speed vessel require the development procedure for drag reduction performance. As a contribution to developing a high-speed micro-bubble drag reduction system for the high speed vessel, this paper aim to present the comparative results from a Indonesia's Navy patrol boat (FPB 57) of model with and without micro-bubbles on the bottom hull sides. The purpose of this study to determine the effect of the injection micro bubbles to reducing total resistance. Boat model with dimensions $L = 2450$ mm, $B = 400$ mm and $T = 190$ mm is used in this research. Influence of location injection micro bubbles and bubble velocity are also investigated.

2 Experimental Set-up

A series of model tests was conducted at the basin. The basin has a length of 50 m and width of 40 m, and the water depth was maintained at a constant depth of 5 m. The experiments were conducted for Froude number up to 0.65. The model was connected to the load cell transducer at a point located amidships and vertically above base line, allowing the model to move freely in the vertical plane. Total resistance was measured for each run over the test range of Froude numbers. In the resistance tests the ship model is pulled by a wire rope and the total longitudinal force acting on the model is measured for various speeds. During the measuring run the ship model is free to heave and pitch. Figure 1 shows an experimental setup in the basin.

Received date:
Foundation Item:
*XXXXXXX:

© Harbin Engineering University and Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2010

<http://jmsa.hrbeu.edu.cn>

2

Name-name Name, et al. Title title title title title title title title title title title title

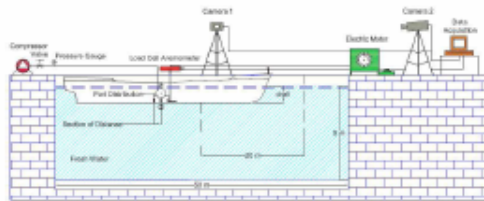


Fig.1 Experimental set-up

This set-up consists of ship models, electric motor, data interface, camera, load cell anemometer and compressor. The comparison the total drag between ship model with micro bubble and without micro bubble injection is analyzed. The model test is conducted in order to have the total resistance values of the ship model (R_T) at various velocity conditions (V). During the model test experiments, model ship pulled by an electric motor that has been designed so that motor rotation can be used to pull the ship model with a constant speed and pull force was measured by using a load cell transducer. The load cell is affixed to the ship model and connected to the rope pullers. The load cell mounted on the amidships of the model. Towing rope connected to an electric motor that can set the motor speed so that velocity can be adjusted. The load cell gauge connects to data interface to obtain pull force that occurs when the ship is pulled. Bubble injection is positioning at the behind of mid ship bottom. Distance position bubble injector will be varied by 5 cm.

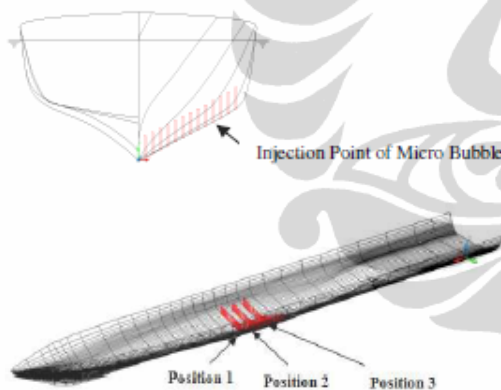


Fig. 2 Lines plan and positioning bubble injector

Figure 2. shows the lines plan for test model. The bubble injectors are placed at behind mid-ship. Position will varied from position 1, position 2 and position 3. These positions are investigated and compared regarding the influence on micro bubble injection. Distance between each injected micro bubble position is 5 cm. Position 1 is 5 cm front of mid ship, position 2 at mid ship and position 3 is 5 cm behind the mid ship. Nozzle diameter as the same as with bubble diameter is about 0.5 mm.

3 Test Analyzes

Froude's hypothesis and similarity law is followed in the extrapolation of the resistance test results. According to Froude's hypothesis the resistance of a ship (or of its model) can be split up into two independent components, one (the viscous component) being proportional to the (frictional) resistance of a flat plate of the same length and wetted surface when towed at the same speed and another resistance component which follows Froude's similarity law.

Total resistance coefficient can be defined as:

$$C_T = C_r + (1+k)C_f \quad (1)$$

where C_T is coefficient total resistance, C_r is coefficient residual resistance, C_f is coefficient friction resistance and $(1+k)$ is form factor.

From the experimental towing test results, for the models, the total resistance coefficient C_T have been calculated as:

$$C_T = \frac{R_T}{0.5\rho SV^2} \quad (2)$$

where ρ is water density and S is the wetted area of ship hull. Froude number and Reynolds number are define as

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gL}} \quad (3)$$

$$Re = \frac{VL}{\nu} \quad (4)$$

where V is the speed of the ship, L is the length of the ship, g is acceleration of gravity and ν is the kinematic viscosity of water.

While the micro bubble characteristics can be determined by the following formulas. The air layer thickness is:

$$t_a = \frac{Q_a}{B_a V} \quad (5)$$

where Q_a is injected air rate, B_a is the width of slot, V is the velocity of ship model and .

$$DR(\%) = \left| \frac{C_T - C_{T0}}{C_{T0}} \right| \times 100\% \quad (6)$$

C_{T0} is total coefficient resistance without bubble injection.

4 Result and Discussion

A comparison of the micro bubble and without micro bubble applied for the ship model was made to evaluate the resistance characteristics as shown in Figure 3-6.

<http://jmsa.hrbeu.edu.cn>

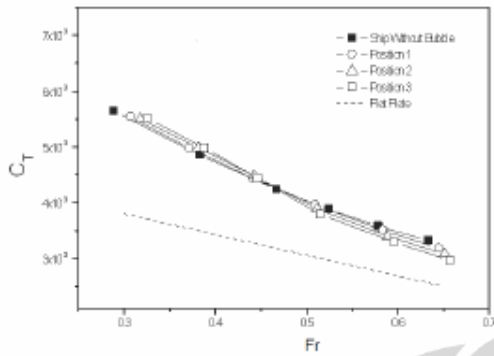


Fig. 3 Total resistance coefficient of ship with and without micro bubble

Figure 3 show the relationship between coefficient total resistance and Froude number for the vessel with micro bubble and without micro bubble. The ship model with injected micro bubble will be varied for 3 variation of positioning injector. It appears that for the ship model by injecting micro bubble, have a value of C_T is relatively higher at low speeds. When the Froude number further increased, at a certain range of values of C_T smaller than the ship model without micro bubble. It can be said of the effects seen in the micro bubble injection at high Froudes numbers where the turbulent flow drag coefficient of resistance is smaller. On the other hand, we investigate that value of C_T depend on position bubble injector. It appears that for the ship model with bubble injection at position 3, has a value of C_T is smallest. We can conclude that injector position is effect the value of resistance coefficient. The dash line indicate the coefficient resistance of flat plate.

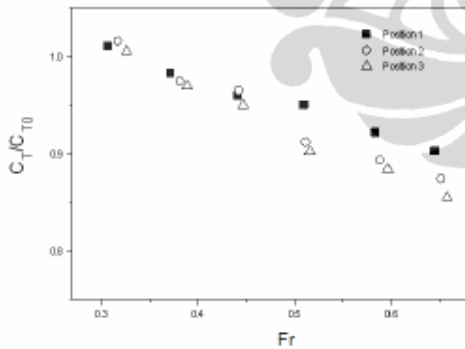


Fig. 4 Total resistance ratio on varied micro bubble position

Figure 4 shows the relationship between total resistance ratio and Froudes number. The horizontal axis is Froude number, and the vertical axis shows the ratio of the total resistance with or without bubble injection. Increasing the Froude number can caused decrease the coefficient ratio. It

value of coefficient ratio is lower than 1, it indicates that drag reduction occurred. As shown in Figure 3, the drag reduction occurs only in the area with Froude number higher than about 0.34.

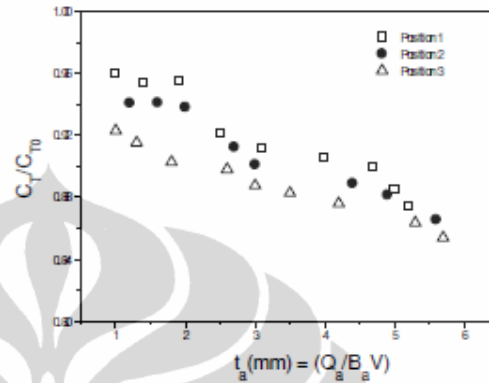


Fig. 5 Relationship between total coefficient ratio and air thickness

Figure 5 shows the total resistance coefficient ratio as function of air thickness. The horizontal axis is the rate of air ejection in terms of the air layer thickness. As the amount of injected air increases, the total coefficient resistance decreases. The effective air layer thickness is 4 mm because in this area the ship model speed is 4 m/s and have best performance. Resistance coefficient ratio for position 3 slightly higher than position 2 and position 1. It is indicated that for position 3 is the best position to reduce total resistance that occurred.

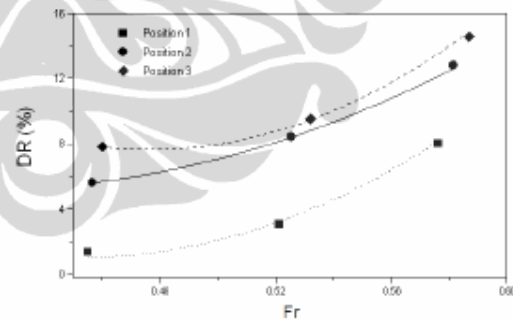


Fig. 6 Relationship between drag reduction and Froudes number

Figure 6 shows drag reduction that occurred. It clear that drag reduction for position 3 is greater than position 1 and position 2. The drag reduction start at Froude number about 0.34 ($V = 22$ knot). As the Froude number increases, drag reduction also increases. The effective drag reduction can be gained for this study is up to 9% at $Fr = 0.55$ ($V = 25$ knot).

5 Conclusions

Considering the experimental model test results to evaluate the micro-bubble drag reduction on high speed vessel, the following conclusions can be stated that the micro bubble application on ship is found to be positive influences on ship resistance. This micro bubble application can reduce significantly the ship resistance for high speed vessel. The test results found that the effective drag reduction can be achieved up to 9% at $Fr = 0.55$ ($V = 25$ knot). The air flow rate and location of the injection position are significantly influence to get the maximum drag reduction. The location of micro bubble injection behind the mid-ship is the best location to get effective drag reduction.

Acknowledgement

This work is supported by the Directorate for Research and Community Service, University of Indonesia (RUUI Research Laboratory 2010), Jakarta, Indonesia.

References

- [1] McCormick ME, Bhattacharyya R (1973) Drag reduction of a submersible hull by electrolysis. *Nav Eng J* 85:11-16.
- [2] Latorre, R., Bablenko, V., 1998. Role of bubble injection technique in drag reduction. *Proc. ONR-NUWC International Symposium on Seawater Drag Reduction*, Newport RI, pp. 319-326.
- [3] Madavan NK, Deutsch S, Merkle CL (1985) Measurements of local skin friction in a micro-bubble-modified turbulent boundary layer. *J Fluid Mech* 156:237-256.
- [4] Kato H, Miyayama M, Yamaguchi H et al (1994) Frictional drag reduction by injecting bubbly water into a turbulent boundary layer and the effect of plate orientation. In: Serizawa A, Fukano T, Bataille J (eds) *Advanced in multiphase flow*. Elsevier, Amsterdam, pp 86-96.
- [5] Watanabe, O. Et al., 1998. "Measurements of Drag Reduction by Microbubbles Using Very long Ship Models", *J. Of Soc. Naval architects, Japan*, vol. 183, pp. 53-63.
- [6] Takahashi, T., Kakugawa, a., Kodama, Y., and Makino, M. (2001), "Experimental study on drag reduction by microbubbles using a 50m-long flat splate ship" *TSFP-2, 2nd Int. Symp. On Turbulence and Shear Flow Phenomena*, Vol. 1, pp. 175-180.
- [7] Kato, H., Miura, K., Yamaguchi, H, Miyayama, M., 1998A, "Experimental Study on Microbubble Ejection Method for Frictional Drag Reduction", *Journal of Marine Science and Technology*, Vol. 3, No. 3, pp. 122-129.
- [8] Latorre R, Miller A, Philips R, "Microbubble resistance reduction on a model SES catamaran", *Journal of Ocean Engineering* 30 (2003) 2297-2309. Elsevier.

2. Data Hasil Pengujian Load Cell Kapal Model tanpa gelembung

Time[sec]	RT V1	RT V2	RT V3	RT V4	RT V5
0,01	0,004273	0,015009	0,026583	0,036409	0,005493
0,02	0,004578	0,015314	0,027193	0,035798	0,006714
0,03	0,005798	0,016229	0,026888	0,036409	0,007935
0,04	0,005493	0,012873	0,025667	0,037629	0,007324
0,05	0,005798	0,016229	0,028109	0,033662	0,005188
0,06	0,005798	0,016229	0,027804	0,034578	0,005188
0,07	0,007019	0,016535	0,029024	0,037935	0,004273
0,08	0,006104	0,015314	0,028414	0,038240	0,003967
0,09	0,007019	0,016229	0,026278	0,037019	0,004273
0,10	0,008545	0,015314	0,029024	0,036409	0,004578
0,11	0,007629	0,013788	0,029329	0,035493	0,004578
0,12	0,008240	0,012873	0,029940	0,035188	0,005493
0,13	0,005493	0,013788	0,029635	0,035188	0,004578
0,14	0,006409	0,014398	0,027804	0,034883	0,005493
0,15	0,007019	0,014398	0,028109	0,035493	0,006714
0,16	0,006714	0,012262	0,026583	0,034273	0,006409
0,17	0,005188	0,013483	0,025667	0,035493	0,007019
0,18	0,004883	0,014093	0,026583	0,034883	0,007324
0,19	0,005188	0,014093	0,026278	0,035493	0,008545
0,20	0,004883	0,014093	0,027804	0,035798	0,007935
0,21	0,004578	0,016229	0,026583	0,036104	0,008240
0,22	0,004883	0,012262	0,027498	0,036104	0,007629
0,23	0,005798	0,015619	0,028414	0,035493	0,007324
0,24	0,006104	0,015924	0,026888	0,037019	0,002441
0,25	0,005493	0,015924	0,028109	0,037324	0,004883

0,26	0,003662	0,014398	0,025362	0,038545	0,004578
0,27	0,006104	0,016535	0,028414	0,037629	0,004273
0,28	0,007629	0,015924	0,028109	0,036714	0,003967
0,29	0,007629	0,015619	0,029329	0,037019	0,004578
0,30	0,006714	0,014398	0,029329	0,037935	0,005188
0,31	0,008850	0,013178	0,029024	0,035493	0,005188
0,32	0,007935	0,013178	0,029635	0,034273	0,004883
0,33	0,007324	0,013788	0,029024	0,033662	0,006104
0,34	0,007629	0,013483	0,028109	0,034273	0,005798
0,35	0,006409	0,013788	0,027193	0,033967	0,006714
0,36	0,005798	0,012873	0,026888	0,034578	0,006104
0,37	0,004883	0,012567	0,027193	0,034883	0,005493
0,38	0,004578	0,015619	0,026583	0,035798	0,007324
0,39	0,004883	0,015009	0,026888	0,036409	0,008240
0,40	0,005493	0,014704	0,023226	0,036714	0,008240
0,41	0,002747	0,015009	0,026583	0,035493	0,007324
0,42	0,004883	0,014704	0,026278	0,034273	0,005798
0,43	0,005188	0,014704	0,027498	0,032747	0,007324
0,44	0,006714	0,015924	0,026888	0,037324	0,006714
0,45	0,005798	0,015619	0,027804	0,037629	0,006104
0,46	0,005493	0,016840	0,027804	0,038545	0,005188
0,47	0,007019	0,015924	0,028719	0,037935	0,005493
0,48	0,006714	0,015619	0,029024	0,037324	0,001221
0,49	0,006104	0,015924	0,029635	0,037324	0,005188
0,50	0,008850	0,015314	0,030245	0,037019	0,005188
0,51	0,007935	0,011652	0,029940	0,035798	0,004578
0,52	0,007629	0,013788	0,029940	0,035493	0,005188

0,53	0,006104	0,013483	0,029024	0,034883	0,006104
0,54	0,006714	0,013178	0,028414	0,034883	0,006409
0,55	0,007019	0,014704	0,026888	0,034578	0,006104
0,56	0,006409	0,014093	0,026583	0,035188	0,007019
0,57	0,005188	0,015009	0,025362	0,035188	0,003662
0,58	0,004578	0,010431	0,025973	0,035493	0,007935
0,59	0,005493	0,015009	0,027498	0,035493	0,008545
0,60	0,005188	0,015009	0,027193	0,034883	0,007629
0,61	0,004578	0,014704	0,025973	0,035493	0,007019
0,62	0,006409	0,015314	0,026888	0,036409	0,007324
0,63	0,005188	0,014398	0,026888	0,036714	0,007324
0,64	0,005493	0,012873	0,027804	0,037324	0,006714
0,65	0,006104	0,016840	0,028109	0,037324	0,005188
0,66	0,006409	0,016535	0,027498	0,038545	0,006104
0,67	0,007629	0,015924	0,028719	0,038850	0,004883
0,68	0,006409	0,015314	0,028414	0,037935	0,003662
0,69	0,006714	0,017145	0,026278	0,037935	0,004578
0,70	0,007324	0,014093	0,029024	0,037324	0,004578
0,71	0,007935	0,013788	0,029940	0,035798	0,004883
0,72	0,008850	0,013788	0,028719	0,035493	0,005493
0,73	0,007629	0,013788	0,028414	0,035188	0,005188
0,74	0,007629	0,013178	0,028109	0,033967	0,004883
0,75	0,007629	0,014398	0,027498	0,033967	0,005493
0,76	0,005798	0,012567	0,026888	0,034273	0,006104
0,77	0,004883	0,014704	0,026278	0,034883	0,005798
0,78	0,004273	0,014704	0,025973	0,034273	0,007324
0,79	0,005493	0,014398	0,026888	0,035493	0,009460

0,80	0,004578	0,014704	0,026278	0,035188	0,009155
0,81	0,005188	0,015314	0,027498	0,036714	0,008240
0,82	0,005188	0,015314	0,027193	0,035798	0,007935
0,83	0,004883	0,015009	0,028414	0,035798	0,007324
0,84	0,006104	0,016229	0,027804	0,037019	0,006409
0,85	0,005493	0,016535	0,027804	0,037324	0,004578
0,86	0,006714	0,016840	0,029024	0,038850	0,004883
0,87	0,007324	0,015009	0,028109	0,038850	0,004883
0,88	0,005798	0,017145	0,028414	0,038545	0,003967
0,89	0,005493	0,015619	0,029635	0,037019	0,004883
0,90	0,003662	0,014398	0,029940	0,037019	0,005798
0,91	0,007935	0,013483	0,029635	0,034578	0,005188
0,92	0,008850	0,013178	0,029329	0,034273	0,004883
0,93	0,007935	0,013178	0,029024	0,031221	0,005493
0,94	0,007019	0,013178	0,025362	0,034883	0,005798
0,95	0,007324	0,013483	0,026888	0,034578	0,007629
0,96	0,006104	0,014093	0,026583	0,034883	0,007019
0,97	0,004273	0,014093	0,027193	0,035188	0,007019
0,98	0,005188	0,014704	0,024752	0,035188	0,007324
0,99	0,004883	0,014093	0,026888	0,035188	0,008240
1,00	0,005188	0,015009	0,027193	0,036104	0,008850
1,01	0,005798	0,014704	0,026583	0,036714	0,009155
1,02	0,005188	0,015619	0,026888	0,036104	0,008545
1,03	0,005493	0,015619	0,026888	0,036714	0,007019
1,04	0,006104	0,015619	0,027498	0,036104	0,005798
1,05	0,005798	0,016535	0,025362	0,037324	0,006409
1,06	0,006409	0,016840	0,028414	0,037629	0,005188

1,07	0,003357	0,016229	0,028109	0,038240	0,005188
1,08	0,006714	0,017145	0,029024	0,037629	0,004883
1,09	0,007019	0,015924	0,029635	0,036714	0,004578
1,10	0,007935	0,014704	0,027193	0,036104	0,004883
1,11	0,007324	0,014093	0,029635	0,034578	0,005798
1,12	0,007629	0,014398	0,029635	0,034273	0,005798
1,13	0,007629	0,012873	0,029635	0,034273	0,006409
1,14	0,007629	0,012567	0,028109	0,035798	0,006104
1,15	0,006714	0,014704	0,028109	0,035798	0,006409
1,16	0,004883	0,013788	0,026583	0,036104	0,007629
1,17	0,003967	0,013788	0,025973	0,036104	0,006714
1,18	0,003662	0,014704	0,027193	0,034578	0,007935
1,19	0,004578	0,014704	0,027193	0,032441	0,008240
1,20	0,005493	0,014704	0,026888	0,036104	0,009155
1,21	0,004883	0,014398	0,026888	0,036104	0,007935
1,22	0,004273	0,015009	0,027193	0,035798	0,006714
1,23	0,005798	0,015924	0,027498	0,035798	0,007935
1,24	0,001526	0,016229	0,028109	0,036714	0,007019
1,25	0,004273	0,016535	0,028109	0,038240	0,005798
1,26	0,005493	0,017145	0,025362	0,037935	0,004883
1,27	0,007019	0,017145	0,027804	0,038240	0,003967
1,28	0,007324	0,012873	0,028414	0,037019	0,004578
1,29	0,006104	0,015009	0,029635	0,037629	0,003357
1,30	0,007629	0,014398	0,029940	0,037019	0,004883
1,31	0,007629	0,013788	0,026278	0,035798	0,001831
1,32	0,006104	0,012567	0,028414	0,034578	0,004883
1,33	0,007935	0,013178	0,028719	0,034883	0,005493

1,34	0,008240	0,013178	0,028719	0,034883	0,006104
1,35	0,002747	0,014398	0,026888	0,034883	0,005493
1,36	0,004273	0,011652	0,027193	0,034578	0,003967
1,37	0,004578	0,013788	0,027804	0,035188	0,006409
1,38	0,005798	0,012262	0,026888	0,034883	0,007324
1,39	0,005188	0,014093	0,022921	0,036104	0,007935
1,40	0,005188	0,014093	0,027193	0,036409	0,008240
1,41	0,003052	0,014704	0,025667	0,036104	0,008850
1,42	0,003967	0,016229	0,027498	0,033052	0,007935
1,43	0,004578	0,011652	0,027498	0,036409	0,007019
1,44	0,003967	0,016229	0,028719	0,037629	0,005798
1,45	0,005493	0,015924	0,028414	0,037629	0,006409
1,46	0,005798	0,015314	0,027804	0,037935	0,005188
1,47	0,006409	0,016229	0,028719	0,038240	0,004883
1,48	0,006104	0,017145	0,029329	0,037629	0,004883
1,49	0,006104	0,014398	0,030550	0,037324	0,005493
1,50	0,007629	0,015314	0,029940	0,036714	0,006104
1,51	0,008545	0,013788	0,029940	0,035493	0,005188
1,52	0,007629	0,012873	0,029635	0,034883	0,005493
1,53	0,007629	0,012567	0,029024	0,035493	0,005493
1,54	0,005493	0,014093	0,027498	0,035493	0,006409
1,55	0,006409	0,014704	0,027498	0,034578	0,007629
1,56	0,004883	0,012262	0,025362	0,036104	0,007019
1,57	0,005798	0,014398	0,027804	0,035188	0,006714
1,58	0,004578	0,014093	0,026278	0,034883	0,007324
1,59	0,004883	0,014398	0,026583	0,035188	0,007019
1,60	0,005493	0,014398	0,026583	0,035188	0,009155

1,61	0,003967	0,014704	0,026583	0,036409	0,007324
1,62	0,004273	0,016229	0,026583	0,035493	0,007935
1,63	0,006409	0,015619	0,028414	0,037324	0,007019
1,64	0,005188	0,016229	0,027193	0,037019	0,006104
1,65	0,005798	0,016840	0,027498	0,036714	0,004883
1,66	0,007324	0,016840	0,028414	0,037324	0,001526
1,67	0,006409	0,016229	0,028414	0,039460	0,004578
1,68	0,007629	0,014398	0,026278	0,038545	0,004578
1,69	0,007019	0,013178	0,029329	0,037629	0,004578
1,70	0,006714	0,014398	0,030550	0,037324	0,004883
1,71	0,008545	0,013788	0,029635	0,033357	0,006104
1,72	0,007935	0,012873	0,028414	0,033357	0,005188
1,73	0,007935	0,013483	0,029024	0,034578	0,005493
1,74	0,003357	0,012567	0,028719	0,031526	0,005798
1,75	0,006409	0,014398	0,027193	0,030305	0,007324
1,76	0,006104	0,010736	0,026888	0,031526	0,007019
1,77	0,004273	0,013483	0,026278	0,034883	0,006409
1,78	0,005493	0,014704	0,026888	0,035188	0,007324
1,79	0,004273	0,013788	0,026583	0,035188	0,007629
1,80	0,005798	0,015314	0,027498	0,035798	0,008545
1,81	0,005188	0,014398	0,026888	0,036409	0,008545
1,82	0,004883	0,014398	0,026583	0,037324	0,007629
1,83	0,005188	0,015619	0,027498	0,036409	0,005798
1,84	0,004883	0,015009	0,027193	0,036409	0,006104
1,85	0,005798	0,016535	0,029024	0,037629	0,003967
1,86	0,007019	0,016535	0,028414	0,037935	0,005493
1,87	0,006714	0,015924	0,029024	0,037019	0,003967

1,88	0,006104	0,015314	0,029024	0,038240	0,004883
1,89	0,006104	0,015619	0,027498	0,037935	0,005188
1,90	0,007629	0,014704	0,029635	0,037324	0,005188
1,91	0,006104	0,013788	0,029329	0,034578	0,004883
1,92	0,007324	0,013178	0,025973	0,034578	0,005188
1,93	0,007019	0,013178	0,028719	0,034578	0,005798
1,94	0,007019	0,013178	0,026888	0,034578	0,006409
1,95	0,006409	0,013483	0,027193	0,035493	0,006409
1,96	0,005798	0,011957	0,026278	0,035188	0,007324
1,97	0,003662	0,014093	0,026583	0,034578	0,006714
1,98	0,004273	0,014093	0,026888	0,035493	0,007324
1,99	0,004883	0,015009	0,026278	0,034883	0,007324
2,00	0,005493	0,013788	0,027498	0,037019	0,009766
2,01	0,004883	0,015314	0,026278	0,037324	0,008240
2,02	0,004883	0,016535	0,027193	0,035188	0,008240
2,03	0,001831	0,014704	0,027193	0,033357	0,007324
2,04	0,005188	0,015009	0,027193	0,037324	0,005798
2,05	0,005493	0,016229	0,028414	0,037629	0,005798
2,06	0,006409	0,017145	0,028719	0,038240	0,005188
2,07	0,006714	0,016840	0,026278	0,038240	0,003357
2,08	0,005493	0,016535	0,029329	0,037324	0,004273
2,09	0,007324	0,016229	0,030245	0,037629	0,004883
2,10	0,007324	0,011347	0,028414	0,037019	0,004273
2,11	0,008850	0,013788	0,029024	0,035798	0,001831
2,12	0,007629	0,013483	0,029024	0,034883	0,005493
2,13	0,007324	0,013178	0,028719	0,034578	0,005493
2,14	0,008240	0,012873	0,025362	0,034273	0,006409

2,15	0,006409	0,012567	0,026583	0,034273	0,005493
2,16	0,005493	0,013178	0,025667	0,035798	0,007324
2,17	0,005798	0,013788	0,026278	0,035188	0,006714
2,18	0,004883	0,014093	0,026888	0,034578	0,007324
2,19	0,004883	0,014398	0,027193	0,035188	0,007935
2,20	0,005798	0,015009	0,027193	0,036714	0,007935
2,21	0,005493	0,015009	0,027804	0,037324	0,008850
2,22	0,005493	0,014704	0,025973	0,036104	0,007935
2,23	0,004883	0,013178	0,027193	0,033662	0,007629
2,24	0,004883	0,016229	0,027498	0,037324	0,007935
2,25	0,006104	0,016535	0,028414	0,037324	0,006104
2,26	0,006104	0,016840	0,028719	0,038545	0,003967
2,27	0,006104	0,016535	0,027804	0,037935	0,001221
2,28	0,005493	0,015619	0,027498	0,037629	0,005188
2,29	0,006714	0,016535	0,029635	0,037935	0,005188
2,30	0,007324	0,013788	0,030245	0,037629	0,005493
2,31	0,006104	0,013788	0,027193	0,037772	0,007935
2,32	0,007935	0,013483	0,027193	0,037754	0,007629
2,33	0,007629	0,012873	0,027193	0,037737	0,007935
2,34	0,007019	0,012873	0,028414	0,037720	0,006104
2,35	0,006409	0,013788	0,028719	0,037702	0,005188
2,36	0,005188	0,014398	0,026278	0,037685	0,005188
2,37	0,004578	0,014093	0,029329	0,037667	0,005493
2,38	0,004883	0,014093	0,030245	0,037650	0,005595
2,39	0,005188	0,014704	0,028414	0,037632	0,005748
2,40	0,003052	0,014704	0,029024	0,037615	0,005900
2,41	0,004273	0,014398	0,029024	0,037598	0,006053

2,42	0,005493	0,014398	0,028719	0,037580	0,006205
2,43	0,004273	0,016229	0,027193	0,037563	0,006358
2,44	0,006104	0,016840	0,027804	0,037545	0,006104
2,45	0,005798	0,016229	0,025973	0,037528	0,005188
2,46	0,005188	0,016840	0,027193	0,037510	0,005188
2,47	0,006409	0,015924	0,027498	0,037493	0,005493
2,48	0,006714	0,015009	0,028414	0,037476	0,005035
2,49	0,007019	0,016840	0,028719	0,037458	0,004852
2,50	0,007629	0,015924	0,027804	0,037441	0,005798
2,51	0,008240	0,013178	0,027498	0,037423	0,005188
2,52	0,007629	0,013483	0,029635	0,037406	0,003357
2,53	0,007629	0,013788	0,030245	0,037388	0,004273
2,54	0,007324	0,013788	0,027193	0,037371	0,004883
2,55	0,006714	0,013483	0,027193	0,037353	0,004273
2,56	0,005493	0,013483	0,027193	0,037336	0,001831
2,57	0,004883	0,014093	0,028414	0,037319	0,005493
2,58	0,004578	0,013483	0,028719	0,037301	0,005493
2,59	0,005188	0,014398	0,029024	0,037284	0,006409
2,60	0,005493	0,015009	0,028414	0,037266	0,005493
2,61	0,004578	0,014704	0,026888	0,037249	0,007324
2,62	0,004883	0,014704	0,026583	0,037231	0,006714
2,63	0,005493	0,014704	0,025362	0,037214	0,007324
2,64	0,005798	0,016535	0,025973	0,037197	0,007935
2,65	0,005188	0,016229	0,027498	0,037179	0,007935
2,66	0,006104	0,016840	0,027193	0,037162	0,001526
2,67	0,003662	0,016535	0,025973	0,037144	0,004578
2,68	0,006104	0,015009	0,026888	0,037127	0,004578

2,69	0,006714	0,016229	0,026888	0,037109	0,004578
2,70	0,007324	0,015314	0,027804	0,037092	0,004883
2,71	0,007629	0,014093	0,028109	0,037075	0,006104
2,72	0,007935	0,013178	0,027498	0,037057	0,005188
2,73	0,007629	0,012567	0,028719	0,037040	0,005493
2,74	0,007324	0,013788	0,028414	0,037022	0,005798
2,75	0,007324	0,013178	0,026278	0,037005	0,007324
2,76	0,005798	0,015009	0,029024	0,036987	0,007019
2,77	0,004578	0,014398	0,029940	0,036970	0,006409
2,78	0,004273	0,014398	0,028719	0,036953	0,007324
2,79	0,001831	0,014093	0,028414	0,036935	0,007629
2,80	0,005493	0,014398	0,028109	0,036918	0,008545
2,81	0,005493	0,013483	0,027498	0,036900	0,008545
2,82	0,005798	0,012262	0,026888	0,036883	0,007629
2,83	0,004883	0,015314	0,026278	0,036865	0,005798
2,84	0,005798	0,015924	0,025973	0,036848	0,006104
2,85	0,005493	0,017145	0,026888	0,036831	0,003967
2,86	0,006104	0,016535	0,026278	0,036813	0,005493
2,87	0,005798	0,017755	0,027498	0,036796	0,003967
2,88	0,005798	0,013178	0,027193	0,036778	0,004883
2,89	0,006104	0,015924	0,028414	0,036761	0,005188
2,90	0,007935	0,014704	0,027804	0,036743	0,005188
2,91	0,008545	0,014093	0,027193	0,036726	0,004883
2,92	0,008240	0,013178	0,027498	0,036709	0,005188
2,93	0,004273	0,013178	0,028414	0,036691	0,005798
2,94	0,006714	0,014398	0,028414	0,036674	0,006409
2,95	0,006714	0,014093	0,026278	0,036656	0,006409

2,96	0,001526	0,013483	0,029329	0,036639	0,007324
2,97	0,005188	0,013483	0,030550	0,036621	0,004578
2,98	0,004578	0,013788	0,029635	0,036604	0,005188
2,99	0,005493	0,015619	0,028414	0,036587	0,005188
3,00	0,004883	0,014704	0,029024	0,036569	0,004883
3,01	0,005493	0,015009	0,028719	0,036552	0,006104
3,02	0,004883	0,015009	0,027193	0,036534	0,005798
3,03	0,005188	0,015619	0,026888	0,036517	0,006714
3,04	0,005493	0,015314	0,026278	0,036499	0,006104
3,05	0,006409	0,017450	0,026888	0,036482	0,005493
3,06	0,006409	0,016840	0,026583	0,036464	0,007324
3,07	0,006409	0,016229	0,027498	0,036447	0,008240
3,08	0,004578	0,016229	0,026888	0,036430	0,008240
3,09	0,006409	0,016229	0,027309	0,036412	0,007324
3,10	0,007324	0,014704	0,027259	0,036395	0,005798
3,11	0,007629	0,012567	0,027209	0,036377	0,007324
3,12	0,007324	0,012873	0,027159	0,036360	0,006714
3,13	0,007324	0,013788	0,027109	0,036342	0,006104
3,14	0,007324	0,014093	0,027059	0,036325	0,005188
3,15	0,005798	0,013788	0,027009	0,036308	0,005493
3,16	0,006714	0,014093	0,026959	0,036290	0,001221
3,17	0,004578	0,013178	0,026909	0,036273	0,005188
3,18	0,004273	0,013788	0,026859	0,036255	0,005188
3,19	0,005188	0,010736	0,026809	0,036238	0,004578
3,20	0,000916	0,014398	0,026759	0,036220	0,005188
3,21	0,004883	0,015314	0,026709	0,036203	0,006104
3,22	0,004273	0,015619	0,026659	0,036186	0,006409

3,23	0,006104	0,015314	0,026608	0,036168	0,006104
3,24	0,005493	0,016535	0,026558	0,036151	0,007019
3,25	0,004883	0,016229	0,026508	0,036133	0,003662
3,26	0,006714	0,016229	0,026458	0,036116	0,007935
3,27	0,006104	0,016535	0,026408	0,036098	0,008545
3,28	0,005798	0,016229	0,026358	0,035188	0,007629
3,29	0,007324	0,015009	0,026308	0,034578	0,007019
3,30	0,007324	0,014093	0,026258	0,035188	0,007324
3,31	0,007935	0,014093	0,026208	0,036714	0,007324
3,32	0,008240	0,013788	0,026158	0,037324	0,006714
3,33	0,005798	0,011652	0,026108	0,036104	0,005188
3,34	0,007324	0,013483	0,026058	0,033662	0,006104
3,35	0,006104	0,013788	0,026008	0,037324	0,004883
3,36	0,006409	0,014704	0,025958	0,037324	0,003662
3,37	0,005493	0,014093	0,025908	0,038545	0,004578
3,38	0,005188	0,013788	0,025858	0,037935	0,004578
3,39	0,004273	0,014704	0,025808	0,037629	0,004883
3,40	0,001221	0,015009	0,025758	0,037935	0,005493
3,41	0,005493	0,014398	0,025708	0,037629	0,005188
3,42	0,005493	0,012873	0,025658	0,037772	0,004883
3,43	0,003357	0,015009	0,029024	0,037754	0,005493
3,44	0,004883	0,016535	0,028719	0,037737	0,006104
3,45	0,004578	0,016840	0,025362	0,037720	0,005798
3,46	0,007019	0,016229	0,026583	0,037702	0,007324
3,47	0,006409	0,017450	0,025667	0,037685	0,009460
3,48	0,005493	0,013178	0,026278	0,037667	0,009155
3,49	0,007019	0,014398	0,026888	0,037690	0,008240

3,50	0,007629	0,015009	0,027193	0,037686	0,007935
3,51	0,008545	0,014398	0,027193	0,037682	0,007324
3,52	0,007935	0,012567	0,027804	0,037677	0,006409
3,53	0,007935	0,012567	0,025973	0,037673	0,004578
3,54	0,007019	0,014398	0,027193	0,037669	0,004883
3,55	0,007324	0,010431	0,027498	0,037665	0,004883
3,56	0,005188	0,013788	0,028414	0,037661	0,003967
3,57	0,004578	0,013483	0,028719	0,037657	0,004883
3,58	0,004883	0,014704	0,027804	0,037653	0,005798
3,59	0,004273	0,014398	0,027498	0,037649	0,005188
3,60	0,005188	0,015619	0,029635	0,037645	0,004883
3,61	0,005493	0,015009	0,030245	0,037640	0,005493
3,62	0,004883	0,014704	0,027193	0,037636	0,005798
3,63	0,005798	0,015314	0,027193	0,037632	0,007629
3,64	0,005798	0,015009	0,027193	0,037628	0,007019
3,65	0,004578	0,017450	0,028414	0,037624	0,007019
3,66	0,007019	0,013178	0,028719	0,037620	0,007324
3,67	0,006104	0,017145	0,026278	0,037616	0,008240
3,68	0,006104	0,015924	0,029329	0,037612	0,008850
3,69	0,006409	0,015314	0,030245	0,037608	0,009155
3,70	0,007935	0,014704	0,028414	0,037604	0,008545
3,71	0,007935	0,014704	0,029024	0,037599	0,007019
3,72	0,007935	0,013788	0,029024	0,037595	0,005798
3,73	0,007324	0,013483	0,028719	0,037591	0,006409
3,74	0,006409	0,013788	0,027193	0,037587	0,005188
3,75	0,006409	0,012873	0,027804	0,037583	0,005188
3,76	0,005798	0,014704	0,025973	0,037579	0,004883

3,77	0,005188	0,013483	0,027193	0,037575	0,004578
3,78	0,004578	0,014093	0,027498	0,037571	0,004883
3,79	0,006104	0,013483	0,028414	0,037567	0,005798
3,80	0,004578	0,013483	0,028719	0,037562	0,005798
3,81	0,003357	0,016229	0,027804	0,037558	0,006409
3,82	0,005798	0,015924	0,027498	0,037554	0,006104
3,83	0,004883	0,014704	0,027193	0,037550	0,006409
3,84	0,004578	0,015924	0,026888	0,037546	0,007629
3,85	0,006409	0,016535	0,026583	0,037542	0,006714
3,86	0,006409	0,013178	0,026278	0,037538	0,007935
3,87	0,006714	0,017145	0,027804	0,037534	0,008240
3,88	0,006714	0,016535	0,027498	0,037530	0,009155
3,89	0,007629	0,016229	0,029635	0,037525	0,007935
3,90	0,006714	0,014398	0,030245	0,037521	0,006714
3,91	0,007935	0,015314	0,027193	0,037517	0,007935
3,92	0,008240	0,010431	0,027193	0,037513	0,007019
3,93	0,007629	0,013788	0,027193	0,037509	0,005798
3,94	0,007629	0,012873	0,028414	0,037505	0,004883
3,95	0,007324	0,013178	0,028414	0,037501	0,003967
3,96	0,006714	0,013178	0,028780	0,037497	0,004578
3,97	0,006104	0,014704	0,026158	0,037493	0,003357
3,98	0,004578	0,014398	0,026108	0,037488	0,004883
3,99	0,003357	0,014704	0,026058	0,037484	0,001831
4,00	0,005798	0,015314	0,026008	0,037480	0,004883