TESIS – MN142532

STUDI EKSPERIMENTAL PENGARUH PERTUMBUHAN *BIOFOULING* PADA LAMBUNG KAPAL TERHADAP *SKIN FRICTION DRAG*

ADI KURNIAWAN YUSIM

NRP. 4114 203 004

DOSEN PEMBIMBING

Prof. Ir. I Ketut Aria Pria Utama, M.Sc., Ph.D.

PROGRAM MAGISTER

PROGRAM STUDI TEKNIK PRODUKSI DAN MATERIAL KELAUTAN

FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN

INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER

SURABAYA

2016

MASTER THESIS – MN142532

EXPERIMENTAL STUDY ON EFFECT OF BIOFOULING GROWTH ON SHIP HULLS AGAINST SKIN FRICTION DRAG

ADI KURNIAWAN YUSIM

NRP. 4114 203 004

SUPERVISOR

Prof. Ir. I Ketut Aria Pria Utama, M.Sc., Ph.D.

POSTGRADUATE PROGRAM

STUDY PROGRAM OF PRODUCTION ENGINEERING AND MARINE MATERIAL

FAKULTY OF MARINE TEKNOLOGY

SEPULUH NOPEMBER INSTITUTE OF TECHNOLOGY

SURABAYA

2016

Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar
Magister Teknik (M.T)
di
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
oleh:
ADI KURNIAWAN YUSIM
NRP. 4114 203 004

Tanggal Ujian: 19 Juli 2016
Periode Wisuda: September 2016

Disetujui oleh:

1. **Prof. Ir. I Ketut Aria Pria Utama, M.Sc., Ph.D.** **(Pembimbing)**
   NIP: 19670406 199203 1 001

2. **Prof. Ir. Achmad Zubaydi, M.Eng., Ph.D.** **(Penguji)**
   NIP: 19590505 198403 1 012

3. **Aries Sulisetyono, S.T, MA.Sc., Ph.D.** **(Penguji)**
   NIP: 19710320 199512 1 002

4. **Dr. Ir. I Ketut Suastika, M.Sc.** **(Penguji)**
   NIP: 19691231 200604 1 178

Direktur Program Pascasarjana,

Prof. Ir. Djauhar Manfaat, M.Sc., Ph.D.
NIP. 19601202 198701 1 001

Halaman ini sengaja dikosongkan

STUDI EKSPERIMENTAL PENGARUH PERTUMBUHAN *BIOFOULING* PADA LAMBUNG KAPAL TERHADAP *SKIN FRICTION DRAG*

Nama Mahasiswa : Adi Kurniawan Yusim

NRP : 4114203004

Pembimbing : Prof. Ir. I Ketut Aria Pria Utama, M.Sc., Ph.D.

ABSTRAK

Biofouling yang menempel pada lambung kapal merupakan permasalahan yang muncul ketika kapal mulai beroperasi. Penempelan ini akan menimbulkan kekasaran dan menambah tebal pada permukaan kapal yang tercelup dalam air laut. Perubahan aliran laminer ke turbulen menjadi cepat ketika melewati permukaan kapal yang kasar. Tujuan dari penelitian ini untuk mengidentifikasi hambatan kapal melalui eksperimen di *Towing Tank* akibat dari kekasaran oleh *biofouling.*

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah pengujian model fisik dengan skala 1 : 53,027. Pemodelan kekasaran akibat *biofouling* ini menggunakan pasir dengan ukuran tertentu dan sudah diskalakan. Dua kondisi kekasaran pada lambung model yaitu *regular roughness* dan *irregular roughness*.

Hasil dari pengujian menunjukkan bahwa pertumbuhan *biofouling* selama kapal beroperasi dalam 1 tahun menimbulkan faktor kekasaran ΔC_F (*roughness allowance*) sebesar 41,20 %. Hambatan total dari kapal yang telah beroperasi selama 1 tahun mengalami kenaikan sebesar 36,65 % untuk kapal dengan *biofuling* merata pada luas permukaan basah dan 47,11 % untuk kapal dengan pertumbuhan *biofouling* yang tidak merata pada luas permukaan basah.

Kata kunci: *towing tank, biofouling*, pasir, hambatan kapal

Halaman ini sengaja dikosongkan

EXPERIMENTAL STUDY ON EFFECT OF BIOFOULING GROWTH ON SHIP HULLS AGAINST SKIN FRICTION DRAG

By : Adi Kurniawan Yusim

Student Identity Number : 4114203004

Supervisor : Prof. Ir. I Ketut Aria Pria Utama, M.Sc., Ph.D.

ABSTRACT

Marine biofouling attached to underwater ship hull has caused problems for many years to ship operators. It has been reported to increase the total drag thus can reduce the speed of ship and disturb the overall operation of marine vehicles. Changes laminar to turbulent flow becomes fast when passing through rough ships surface. The current study models the growth of marine fouling for one year periods basis on general cargo vessel.

The methods have been used in this studied was model scale 1 : 53.027. The use of smooth model is also included in order to analysis the difference between the two conditions. Two models of the hull roughness are regular and irregular roughness. The modeling of roughness using sand with a specific size and have been scaled.

The results show that the roughness allowance due to marine fouling is rather critical and estimated about 41.20 % per year. And the total resistance vessels increased to 41.88%. The total resistance vessels increased to 36.65 % per year for biofouling spread evenly at wetted surface area (WSA) and 47.11 % per year for biofouling spread not evenly at WSA.

Key words: towing tank, biofouling, sand, resistance

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL i
LEMBAR PENGESAHAN iii
ABSTRAK v
ABSTRACT vii
KATA PENGANTAR ix
DAFTAR ISI xi
DAFTAR GAMBAR xiii
DAFTAR TABEL xv
BAB 1 1
PENDAHULUAN 1
1.1 Latar Belakang 1
1.2 Perumusan Masalah 3
1.3 Batasan Masalah 3
1.4 Tujuan 3
1.5 Manfaat Penelitian 4
BAB 2 5
KAJIAN PUSTAKA 5
2.1 Biofouling 5
2.2 Hambatan Kapal 6
2.3 Towing Tank 10
2.4 *Review* Hasil Penelitian Terdahulu 12
BAB 3 15

METODA PENELITIAN 15
3.1 Teknik Pembuatan Model Fisik 15
3.2 Metode Eksperimen Model Fisik di *Towing Tank* 21
3.3 Survey Ketebalan dan Kekasaran *Biofouling* 22
3.4 Teknik Pembuatan Kekasaran Lambung Model Fisik 24
3.5 Pengujian Model Fisik 28
BAB 4 33
HASIL DAN PEMBAHASAN 33
4.1 Hasil Eksperimen 33
4.2 Koreksi Hasil Eksperimen 39
4.2.1 Koreksi Koefisien Gesek dan Faktor Kekasaran Model *Regular Roughness* 39
4.2.2 Koreksi Koefisien Gesek dan Faktor Kekasaran Model *Irregular Roughness* 40
4.3 Karakteristik Pola Gelombang (*Wave Pattern*) pada Lambung Kapal 42
BAB 5 45
KESIMPULAN DAN SARAN 45
5.1 Kesimpulan 45
5.2 Saran 45
DAFTAR PUSTAKA 47
LAMPIRAN-I 51
LAMPIRAN-II 57
BIODATA PENULIS 59

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. 1 Contoh dari lambung kapal yang ditempeli banyak *fouling.* Foto dari Hempel's Marine Paints A/S. 1

Gambar 2. 1 Komponen dasar hambatan (Molland, Turnock, & Hudson, 2011)... 7

Gambar 2. 2 Gaya gesek (τ) dan gaya normal (P) (Molland, Turnock, & Hudson, 2011) 7

Gambar 2. 3 Perbedaan bentuk *boundary layer* pada model dan kapal (Molland, Turnock, & Hudson, 2011) 9

Gambar 2. 4 Skema uji tarik di *towing tank* (Molland, Turnock, & Hudson, 2011) 11

Gambar 2. 5 Pengukuran uji hambatan (Molland, Turnock, & Hudson, 2011).... 11

Gambar 2. 6 Uji hambatan model (Molland, Turnock, & Hudson, 2011)..... 12

Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian 15

Gambar 3. 2 Model Fisik setelah dicat dasar (putih) 17

Gambar 3. 3 Sketsa gading-gading yang siap dipotong..... 17

Gambar 3. 4 Pemotongan tripleks..... 18

Gambar 3. 5 Perakitan awal 18

Gambar 3. 6 Gading-gading sudah terpasang pada rangka model..... 19

Gambar 3. 7 Proses dempul 20

Gambar 3. 8 Pengecatan model..... 20

Gambar 3. 9 Pandangan dari sisi samping 21

Gambar 3. 10 *Towing Tank*..... 22

Gambar 3. 11 Survey ketebalan *biofouling*..... 23

Gambar 3. 12 Penjemuran pasir Lumajang..... 25

Gambar 3. 13 Uji coba penempelan pasir pada potongan tripleks 25
Gambar 3. 14 Penempelan pasir pada model fisik 26
Gambar 3. 15 Penyemprotan model dengan pilox matt clear 26
Gambar 3. 16 Model *regular roughness* 27
Gambar 3. 17 Klasifikasi area beda kekasaran sepanjang badan kapal..... 27
Gambar 3. 18 Model *irregular roughness*..... 27
Gambar 3. 19 Pemberian *ballast* pada model *regular roughness* 28
Gambar 3. 20 Posisi *centerline* pada model *smooth hull* 29
Gambar 3. 21 *Holder* untuk mengaitkan model 29
Gambar 3. 22 Pengikatan *load cell* pada model 30
Gambar 4. 1 Hambatan total kapal 39
Gambar 4. 2 Pola aliran gelombang pada lambung kapal 42
Gambar 4. 3 *Running* model tampak dari belakang 43
Gambar 4. 4 *Running* model tampak dari depan 43

DAFTAR TABEL

Tabel 3. 1 Data ukuran utama kapal..... 16

Tabel 3. 2 Hasil Pengukuran Ketebalan *Biofouling*..... 23

Tabel 3. 3 Kalibrasi alat..... 30

Tabel 4. 1 Program Pengujian (*Test Tank*)..... 33

Tabel 4. 2 Hubungan kecepatan dengan R_T model pada *smooth hull*..... 34

Tabel 4. 3 Hubungan kecepatan dinas dengan R_T Kapal pada *smooth hull*..... 35

Tabel 4. 4 Hubungan kecepatan dengan R_T model pada *regular roughness*..... 36

Tabel 4. 5 Hubungan kecepatan dinas dengan R_T Kapal pada *regular roughness* 37

Tabel 4. 6 Hubungan kecepatan dengan R_T model pada *irregular roughness*..... 37

Tabel 4. 7 Hubungan kecepatan dinas dengan R_T Kapal pada *irregular roughness* 38

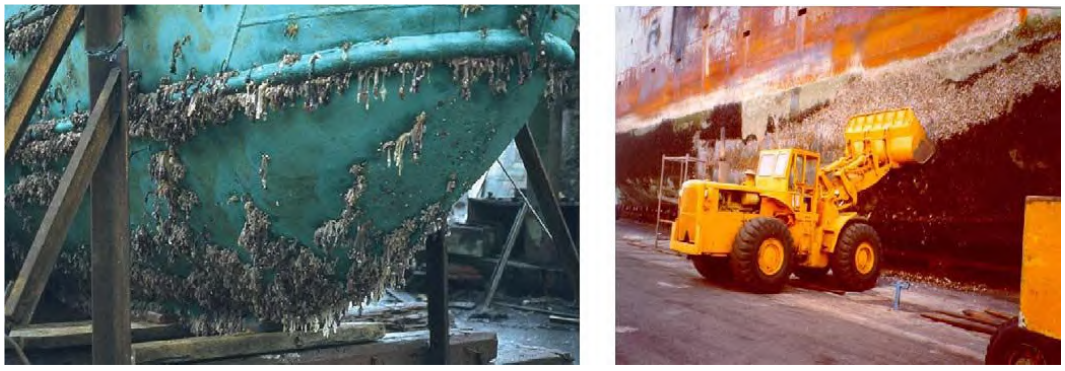
Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 1
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pemanasan global akibat dari emisi karbon yang meningkat menjadi isu hangat dalam 10 tahun terakhir ini. Semua sektor industri termasuk industri perkapalan menyumbang cukup besar pada meningkatnya emisi karbon ini. Penempelan makhluk hidup laut (*biofouling*) pada lambung kapal secara fisik menambah volume (displasemen) dan pola aliran saat kapal berlayar.

Pertumbuhan *biofouling* terjadi secara alami. Kecepatan pertumbuhannya tergantung pada daerah operasi, rasio waktu berlabuh dan berlayar, kecepatan dinas, metode pengecatan lambung, dan frekuensi *docking* (Railkin, 2003). Pada penelitian sebelumnya (Curtin, 1985) diperkirakan bahwa ketebalan lapisan *biofouling* 200 μm pada lambung kapal dapat mengurangi kecepatan sebesar 20 %. Berkurangnya kecepatan ini tentu menimbulkan kerugian yang cukup besar bagi manusia. *Biofouling* ini berkembang menyebabkan permukaan halus menjadi kasar dan bahkan kadang menonjol (Tarasov, 1961).



Gambar 1. 1 Contoh dari lambung kapal yang ditempeli banyak *fouling.* Foto dari Hempel's Marine Paints A/S.

Gambar 1.1 adalah lambung kapal yang dipenuhi dengan *biofouling*. Munculnya *biofouling* mengakibatkan penurunan kecepatan dan maneuver daya jelajah kapal. Laju kapal yang semakin berat otomatis mengakibatkan peningkatan bahan bakar yang dibutuhkan kapal. Pemakaian bahan bakar pada kapal yang

berlayar di perairan beriklim sedang selama 6 bulan akan meningkat sebesar 35%-50% (Redfield & Hutchins, 1952). Sedangkan di perairan tropis, penggunaan bahan bakar diperkirakan akan lebih meningkat. Hal ini disebabkan kandungan nutrien di perairan tropis yang lebih tinggi sehingga meningkatkan mekanisme pertumbuhan *biofouling*. Indonesia merupakan negara maritim beriklim tropis yang memiliki banyak spesies *biofouling* yang berbeda. Pertumbuhan *biofouling* ini diawali dengan terbentuknya *biofilm* pada permukaan kapal yang tercelup dalam air laut secara cepat. Awalnya terdiri atas molekul organik dan bakteri, *film* selanjutnya didukung oleh mikroorganisme lain dan hewan yang lebih besar seperti tiram dan teritip. Penelitian ini bertujuan untuk mengamati *biofouling* pada kapal yang sedang *annual docking*.

Aliran fluida yang melintas sekitar *biofouling* mengakibatkan timbulnya *turbulent boundary layer* karena permukaan lambung kapal menjadi lebih kasar dari sebelumnya. Aliran turbulen menimbulkan *skin friction drag* lebih besar dibandingkan dengan aliran laminer. *Biofouling* dapat menyebabkan dinding lambung kapal menjadi tidak teratur dan kasar sehingga menyebabkan pengeluaran tambahan bahan bakar untuk mempertahankan kecepatan yang diperlukan (Safriel, et al., 1993). Hambatan gesek meningkat dengan signifikan akibat *biofouling* pada lambung oleh mikro dan makroorganisme (Ketchum, 1952).

Untuk permasalahan yang diangkat dalam penelitian ini adalah tentang pengaruh ketebalan *biofouling* terhadap hambatan total kapal. *Skin friction drag* merupakan komponen gaya dari hambatan viskos, dimana hambatan viskos terdiri atas hambatan gesek dan hambatan gelombang. Arah sumbu kerja hambatan gesek adalah tangensial (mengikuti *stream line*) terhadap lambung kapal. Hambatan ini timbul akibat dari gesekan antara lambung kapal terhadap fluida (Edward, 1988). Aliran air di sekitar lambung kapal yang terdapat *biofouling* memberikan efek pada ketebalan *boundary layer*.

1.2 Perumusan Masalah

Adapun permasalahan dalam penelitian ini adalah:

1. Memprediksi seberapa besar hambatan total kapal (R_T) yang terjadi bila *biofouling* muncul setelah kapal beroperasi selama 1 tahun.
2. Menentukan faktor kekasaran (ΔC_F) setelah *biofouling* muncul setelah kapal beroperasi selama 1 tahun.

1.3 Batasan Masalah

Supaya permasalahan dapat dikaji dan dipecahkan secara mendalam perlu ada batasan masalah, yaitu sebagai berikut:

1. Model fisik yang dibuat dan diuji merupakan jenis kapal *general cargo.*
2. Survey pengamatan tebal *biofouling* pada kapal jenis *ferry* yang sedang *annual docking* di PT. Dok Perkapalan Surabaya. Daerah yang diambil sama meliputi buritan, *midship*, dan haluan kapal.
3. Pengamatan *biofouling* di lambung kapal hanya pada saat survey saja. Dengan asumsi kapal dioperasikan selama 1 tahun sesuai dengan penjelasan pemilik kapal. Tidak sampai pada pengamatan secara periodik kaitannya dengan pertumbuhan *biofouling* karena keterbatasan waktu penelitian.

1.4 Tujuan

Tujuan dari penelitian ini adalah melakukan analisa hidrodinamik secara sistematis dalam kajian analisa hambatan. Tujuan penelitian yang akan dilakukan, diuraikan sebagai berikut:

1. Melakukan *review* dari studi literatur tentang hambatan kapal dengan adanya *biofouling*.
2. Mengidentifikasi dan mengembangkan perihal hambatan kapal melalui eksperimen *model scale.*
3. Mendapatkan data eksperimen (hambatan total) dari model fisik dengan 3 kondisi lambung kapal yang berbeda yaitu *smooth hull, regular roughness,* dan *irregular roughness*.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat yang merupakan hasil dari penelitian ini adalah:

1. Mengetahui jenis dan bentuk *biofouling* pada lambung kapal.
2. Mengetahui besar hambatan total kapal yang terjadi bila *biofouling* muncul setelah kapal beroperasi selama 1 tahun.

BAB 2
KAJIAN PUSTAKA

2.1 Biofouling

Biofouling merupakan masalah serius di industri perkapalan yang meningkatkan konsumsi bahan bakar karena menambah volume (displasemen kapal). Secara otomatis, biaya perawatan kapal juga akan bertambah besar akibat *biofouling* ini. Akhirnya, produktifitas pelayaran akan menurun (Legg, et al., 2015). Pada penelitian sebelumnya (Redfield & Hutchins, 1952) menyebutkan bahwa *biofouling* yang terbentuk pada lambung kapal menyebabkan kecepatan kapal berkurang hingga 40 % bahkan lebih.

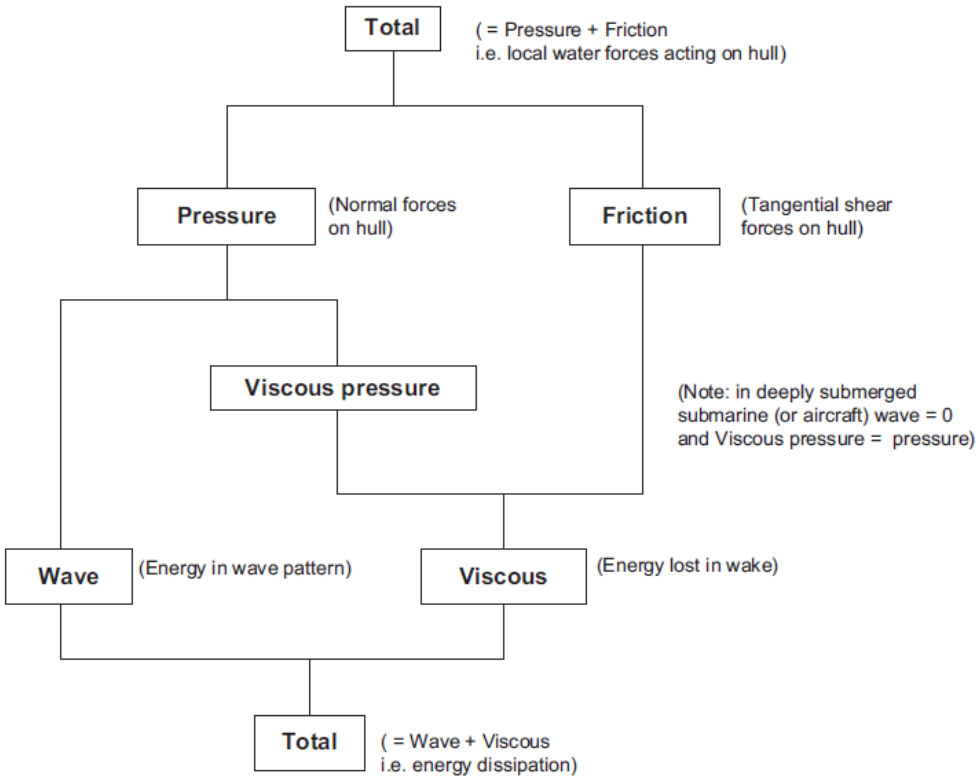
Biofouling adalah kumpulan mikroorganisme berupa: tumbuhan, alga, atau binatang (teritip, bryozoa, dan kerang) yang menempel pada permukaan basah kapal (WSA). Sejak *biofouling* dapat terjadi hampir di seluruh permukaan yang terkena air, *biofouling* menimbulkan risiko untuk berbagai benda seperti konstruksi bawah air dan pabrik desalinasi (Vladkova, 2009). Bakteri mengawali penempelan dan membentuk lapisan lendir (*biofilm* atau *slime*) pada permukaan benda-benda yang terendam air laut (Ayers & Turner, 1952). Secara khusus, penumpukan *biofouling* pada kapal laut menimbulkan masalah yang signifikan. Dalam beberapa kasus, struktur lambung dan sistem propulsi bisa rusak (Chambers, Stokes, Walsh, & Wood, 2006). Seiring waktu, kumpulan *biofouling* pada lambung dapat meningkatkan baik volume, hidrodinamik dari kapal dan efek gesekan yang menyebabkan peningkatan *drag* hingga 60 %. Kenaikan *drag* dapat menurunkan kecepatan hingga 10 %, yang dapat meningkatkan konsumsi bahan bakar sampai 40 %. Dengan bahan bakar biasanya sampai setengah dari biaya transportasi laut (Communications, 2016). Peningkatan penggunaan bahan bakar karena *biofouling* berkontribusi pada efek lingkungan yang merugikan dan diprediksi akan meningkatkan emisi karbon dioksida dan sulfur dioksida antara 38 % dan 72 % pada tahun 2020 (Salta, et al., 2010).

Pertumbuhan *biofouling* tidak linier atau bisa dikatakan sulit untuk diprediksi karena dipengaruhi banyak faktor. Misalnya pada jenis hewan (teritip), tingkat pertumbuhan ditentukan oleh tingkat makanannya. Berdasarkan periode pertumbuhannya, *biofouling* cepat pertumbuhannya pada periode awal (1,5 bulan pertama) dan semakin melambat pada periode berikutnya (Railkin, 2003).

2.2 Hambatan Kapal

Hambatan kapal adalah gaya fluida yang melawan gerakan kapal tersebut. Adanya penempelan *biofouling* pada lambung akan menambah hambatan kapal. Dengan penambahan hambatan ini akan menambah konsumsi bahan bakar sehingga menyumbang penambahan emisi karbon.

Hambatan pada kapal merupakan gaya yang menghambat kecepatan kapal sehingga membutuhkan gaya dorong (*thrust*) lebih untuk mempertahankan kecepatan kapal. Kapal akan mengalami beberapa jenis hambatan saat berlayar akibat dari interaksi antara kapal dengan lingkungan di laut. Hambatan-hambatan tersebut adalah hambatan gelombang, udara, dan gesek. Selain itu, ada juga hambatan kekasaran akibat korosi dan *biofouling* pada lambung kapal (Harvald, 1983). Para peneliti (Couser, Molland, Armstrong, & Utama, 1997) mengklasifikasi hambatan kekasaran (*skin friction drag*) kedalam hambatan viskos (*viscous resistance*). Hambatan gesek erat kaitannya dengan *Reynolds number* (Re). Sedangkan hambatan gelombang (*wave-making resistance*) berkaitan dengan *Froude number* (Fr). Korelasi ini diperlihatkan pada Gambar 2.1.



Gambar 2. 1 Komponen dasar hambatan (Molland, Turnock, & Hudson, 2011)

Skin Friction Drag adalah komponen dari *parasitic drag* yang terjadi secara berbeda berdasarkan pada jenis aliran yang melewati benda (laminer atau turbulen). Seperti halnya jenis *drag* yang lain, koefisien dari *skin friction drag* dihitung dengan beberapa persamaan dan pengukuran berdasarkan pada aliran dan kemudian ditambahkan bentuk koefisien yang lain dari *drag* untuk menghitung *drag* total. Hambatan viskos yang terjadi pada lambung kapal dapat dilihat pada Gambar 2.2.

Gambar 2. 2 Gaya gesek (τ) dan gaya normal (P) (Molland, Turnock, & Hudson, 2011)

Jenis aliran yang berbeda akan mempengaruhi *drag* karena setiap jenis aliran yang terjadi akan merubah *boundary layer* benda secara alami. Secara

singkat, aliran turbulen menimbulkan *boundary layer* yang lebih besar dibandingkan dengan aliran laminer dan oleh karena itu lebih menimbulkan *skin friction.*

Pembahasan teori lapisan batas (*boundary layer theory*) dapat dijelaskan dalam bentuk non-dimensi dari persamaan Navier-Stokes, dengan ketentuan:

V = kecepatan yang jauh dari bendanya (kecepatan fluida yang belum terganggu karena keberadaan benda tersebut);

L = karakteristik panjang, seperti jarak dari *leading edge*;

Po = tekanan acuan (*reference pressure*) seperti tekanan hidrostatis pada kedalaman tertentu.

maka:

$$x_i' = \frac{x_i}{L};\ u_i' = \frac{u_i}{V};\ t' = \frac{Vt}{L};\ p' = \frac{p}{p_o};\ F_{Bi}' = \frac{F_{Bi}}{\rho g} \qquad (2.1)$$

sehingga bentuk persamaan Navier-Stokes-nya menjadi:

$$\frac{\rho V}{\frac{L}{V}} \frac{D_{ui}'}{Dt'} = -\frac{p_o}{L}\frac{\partial p'}{\partial x_i'} + \frac{\mu V}{L^2}\nabla' + \rho g F_{Bi}', i = 1, 2, 3, \ldots \qquad (2.2)$$

dan didapat:

$$\frac{D_{ui}'}{Dt'} = -\frac{p_o}{\rho V^2}\frac{\partial p'}{\partial x_i'} + \frac{\mu}{\rho V L}\nabla' u_i' + \frac{gL}{V^2}F_{Bi}', i = 1, 2, 3, \ldots \qquad (2.3)$$

Perlu diperhatikan bahwasanya rangkaian persamaan Navier-Stokes dengan persamaan kontinuitas merupakan gabungan lengkap dari persamaan diferensial parsial *non-linier* yang dapat diselesaikan hanya pada beberapa hal. Untuk praktisnya, pada bidang hidrodinamika dipakai perkiraan terhadap persamaan Navier-Stokes. Kenyataan ini menyangkut 3 hal utama yang dapat digambarkan sebagai berikut:

- Angka Reynold rendah (Re <<):

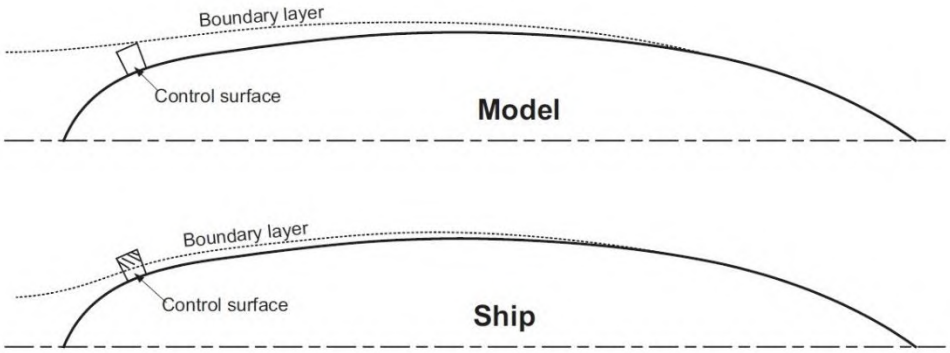
  Bila angka Reynold sangat rendah maka bagian inersia diabaikan dengan bagian kekentalan, sehingga menghasilkan $\frac{D_{ui}'}{Dt'} = 0$. Dengan asumsi ini maka pada persamaan Reynold akan dihasilkan persamaan linier.

- Angka Reynold tinggi (Re >>):

  Bila Re mendekati tak berhingga maka bagian kekentalan diabaikan dan dihasilkan aliran fluida ideal atau aliran fluida tanpa kekentalan.

- Teori Lapisan Batas:

  Hipotesa (Prandtl and Schlichting, 1934) menyatakan bahwa keadaan pada situasi angka Reynold yang tinggi tapi terbatas seperti umumnya udara dan air, efek kekentalan dinyatakan pada daerah lapisan tipis dekat dengan *body.* Daerah lapisan tipis ini dinamakan lapisan batas (*boundary layer*), dimana tidak terdapat kondisi batas slip. Aliran di luar lapisan batas diasumsikan tanpa kekentalan. Gambar 2.3 menunjukkan perbedaan bentuk *boundary layer* terhadap model dan kapal. Dari gambar tersebut terlihat bahwa *boundary layer* model 2 kali lebih besar dibandingkan dengan kapal aslinya.



Gambar 2. 3 Perbedaan bentuk *boundary layer* pada model dan kapal (Molland, Turnock, and Hudson, 2011)

Pendekatan penyelesaiannya adalah dengan mengabaikan batas dan menyelesaikan aliran fluida ideal yang melingkupi benda untuk mendapatkan tekanan dp/dx sepanjang benda. Tekanan ini kemudian digunakan di luar lapisan batas. Untuk maksud tersebut, kita dapat memperoleh hasil dengan memakai penyederhanaan persamaan Navier-Stokes. Salah satu hasilnya adalah berupa tebal displasemen (*displacement thickness,* δ) dari lapisan batas tersebut. Untuk memperbaiki hasil ini, tebal displasemen dapat ditambahkan pada bendanya dan penyelesaian untuk aliran ideal dapat diulang untuk harga dp/dx yang baru. Penyelesaian lapisan batas selanjutnya dapat diperbaiki dengan menggunakan harga dp/dx yang baru.

2.3 Towing Tank

Model kapal yang telah diskalakan bisa digunakan untuk mengetahui karakteristik-karakteristik hidrodinamika pada kolam uji di *Towing Tank*. *Towing tank* bisa menghasilkan keluaran berupa hambatan total (R_T) kapal, koefisien-koefisien hambatan yang terjadi pada kapal, *Froude number*, serta *Reynold number* dari model yang diuji.

Towing tank pada umumnya digunakan untuk mengetes hambatan dengan menggunakan model yang bergerak dalam tangki pada kecepatan tertentu sepanjang tangki. Ada 2 jenis *towing tank* yaitu:

1) *Towing Tank* dengan kereta penarik

Model dikemudikan oleh mesin (kereta) dan dilengkapi dengan penarik yang berlawanan arah dengan model yang berada di bawahnya. Kereta penarik tersebut membawa alat yang dapat mengukur dan mencatat kecepatan pelayaran dan hambatan model yang bergerak di air.

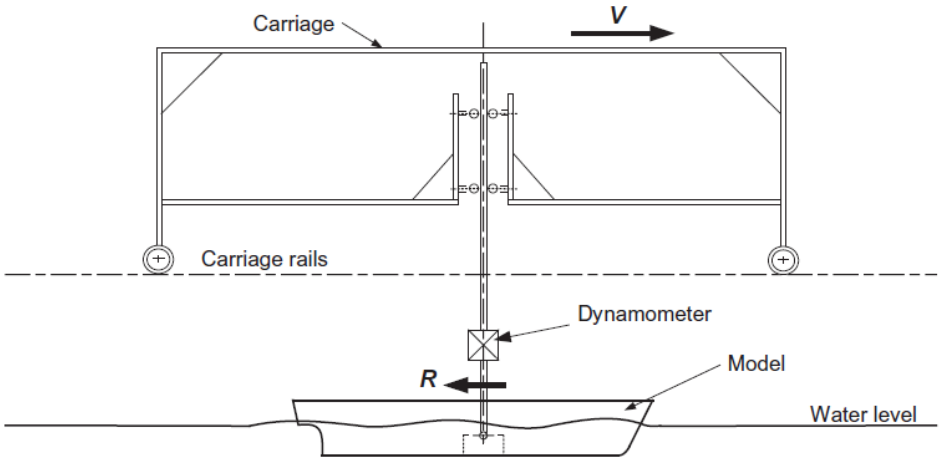
2) *Towing Tank* dengan beban atau gravitasi

Tangki ini dilengkapi dengan tali (senar) yang mengelilingi rol atau katrol, masing-masing saling berlawanan pada ujung katrol. Salah satu katrol bertindak sebagai pengemudi dan lainnya sebagai pengikat atau pengantar. Katrol pengemudi ini mempunyai poros pada axisnya, proyeksi, proyeksi dari poros pada kedua sisinya. Salah satu sisi poros menahan tali pengikat sistem pemberat dan yang lainnya menahan bobot lawan. Hambatan dapat diketahui dengan menggunakan sistem pembebanan dengan memakai gaya pemberat melalui katrol, dimana pembebanan pada piringan bobot mula lebih berat dari bobot lawan.

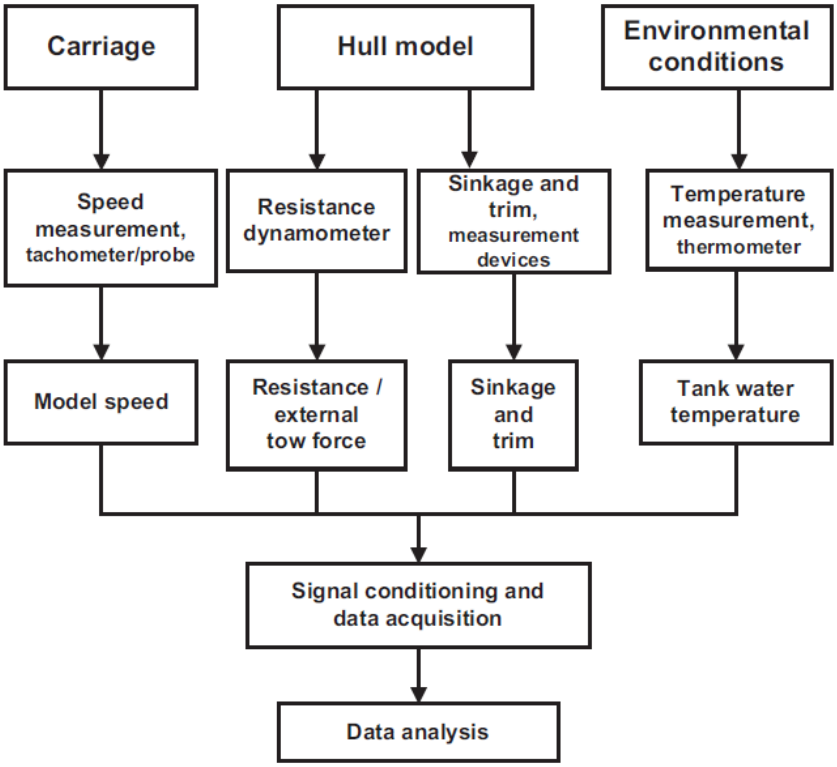
Apabila model yang ditarik bergerak pada kecepatan konstan di bawah gaya ini, maka gaya tersebut sama dengan hambatan total model pada kecepatan tersebut. Tipe semacam inilah yang digunakan pada percobaan model dalam penentuan hambatan.

Hambatan tes model diukur dalam *Towing Tank* yang dikenalkan pertama kali oleh William Froude pada tahun 1871 (Froude, 1872). Gambar 2.4 menunjukkan model kapal terikat pada kereta yang bergerak dan ditarik pada kecepatan yang diatur konstan (V), dan diukur hambatan model (R). Gaya penarik oleh kereta berlawanan arah dengan hambatan kapal. Pengukuran uji hambatan,

seperti yang dijelaskan di ITTC (2002), ditunjukkan pada Gambar 2.5. Sedangkan, Gambar 2.6 menunjukkan contoh model yang menjalani uji hambatan.



Gambar 2. 4 Skema uji tarik di *towing tank* (Molland, Turnock, & Hudson, 2011)



Gambar 2. 5 Pengukuran uji hambatan (Molland, Turnock, & Hudson, 2011)

Kecepatan model diukur dari kecepatan roda kereta, dari waktu yang dibutuhkan untuk pengangkutan atau penarikan model.

Gambar 2. 6 Uji hambatan model (Molland, Turnock, & Hudson, 2011)

2.4 *Review* Hasil Penelitian Terdahulu

Pengkajian tentang pengaruh kekasaran akibat *biofouling* terhadap hambatan kapal telah dilakukan lebih awal melalui eksperimen oleh (Lewthwaite, Molland, & Thomas, 1985), (Candries, 2001), dan (Hansen, 2011), kemudian kajian ekonomi oleh (Schultz, Bendick, Holm, & Hertel, 2011) tentang dampak ekonomi secara menyeluruh dari *fouling* pada lambung kapal.

Thesis (Akinlade, 2005) tentang "Pengaruh Kekasaran Permukaan pada Karakteristik Aliran dalam *Turbulent Boundary Layer*" yang memodelkan kekasaran dengan amplas (*sandpaper*), plat berlubang (*perforated sheet*), dan anyaman kawat (*woven wire mesh*). Ketiga pemodelan kekasaran tersebut dilakukan pada plat datar untuk mengetahui efek kekasaran permukaan pada karakteristik aliran di lapisan batas turbulen.

Walaupun kekasaran permukaan adalah fenomena 3D, umumnya didefinisikan hanya dengan ketinggian kekasaran. Kekasaran lambung rata-rata (AHR) umumnya digunakan untuk mengkarakterisasi kekasaran permukaan lambung (ITTC, 1990). Ketinggian kekasaran pada permukaan dapat didefinisikan dalam 2 cara yang berbeda, contohnya *extreme-value parameters* dan *average parameters* (Candries, 2001). Candries juga menyebutkan bahwa banyak penelitian dan penyelidikan tentang masalah aliran yang melewati permukaan yang kasar memiliki fokusan dengan kekasaran yang teratur yang terbuat dari amplas atau

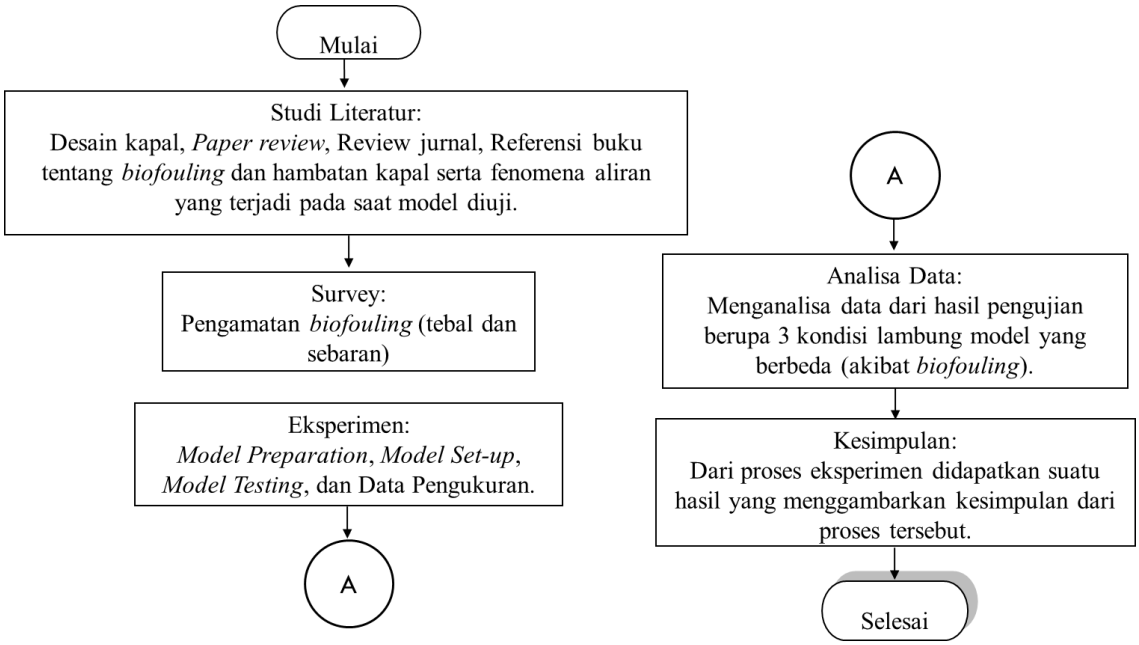
kawat dengan ukuran dan bentuk yang berbeda. Karakteristik permukaan ini biasanya dibuat dengan parameter 1D: ketinggian dari elemen kekasaran.

Penyebaran *biofouling* yang menimbulkan kekasaran sepanjang badan kapal memiliki ketebalan yang berbeda-beda bergantung letaknya. Lapisan batas yang lebih tebal di dekat buritan daripada haluan dan akan lebih tipis di lambung kapal. Kekasaran ini berpengaruh pada kecepatan aliran lokal yang tinggi. Untuk model kapal, kekasaran dapat menyebabkan transisi yang lebih awal dari laminar ke aliran turbulen (Molland, Turnock, & Hudson, 2011). Metode pengolahan data penyebaran *biofouling* dengan menggunakan bantuan foto visual. Ini seperti yang dilakukan oleh seorang peneliti dari Denmark (Hansen, 2011) dengan judul "*Monitoring Performa Kapal*". Pengamatan lapangan dan foto ini akan menunjukkan ketebalan masing lokasi yang sudah dikelompokkan (*bottom*, haluan, buritan, dan *side hull*).

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 3
METODA PENELITIAN

Metode yang akan digunakan dalam penelitian ini adalah pengujian model fisik dengan skala 1: 53,027. Uji model dilakukan di *towing tank* Laboratorium Hidrodinamika Jurusan Teknik Perkapalan ITS. Diagram alir penelitian dapat dilihat pada Gambar 3.1. *Output* hasil eksperimen dapat dijelaskan bahwa dari uji hambatan di *towing tank* didapatkan hambatan total (R_T). Hambatan total model dapat dipecah menjadi 2 komponen (Froude, 1872): hambatan gesek (R_F) dan hambatan sisa (R_R). Hambatan sisa disebabkan karena pengaruh gaya gravitasi dan gaya inersia, sedangkan hambatan gesek disebabkan karena pengaruh gaya viskositas dan gaya inersia.



Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian

2.1 Teknik Pembuatan Model Fisik

Kapal yang dipakai dalam penelitian ini adalah jenis kargo. Model kapal yang diuji harus mempunyai bentuk yang sama dengan bentuk kapal yang sebenarnya dalam suatu skala yang dikecilkan (kesamaan geometris). Model

tersebut dibuat dari kayu, dikerjakan di Laboratorium Hidrodinamika Jurusan Teknik Perkapalan ITS. Model dari kayu dibuat secara pergading yang dihubungkan dengan memakai perekat tahan air hingga membentuk blok yang kuat dan kaku. Skala model yang akan dibuat disesuaikan dengan ukuran utama kapal dan fasilitas dari *Towing Tank*. Data ukuran utama kapal adalah sebagai berikut:

Tabel 3. 1 Data ukuran utama kapal

	Actual ship	*Model ship*
LoA	109 m	2,056 m
Lpp	101 m	1,905 m
Lwl	106,07 m	2 m
B	17,8 m	0,336 m
H	10 m	0,188 m
T	7 m	0,132 m
Volume displacement	9816,667 m^3	0,066 m^3
WSA	2646,84 m^2	0,941 m^2
Skala	1:53,027	

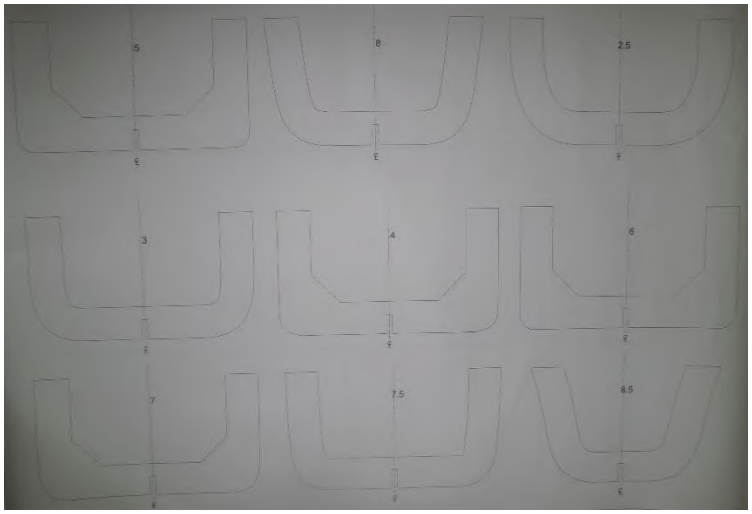
Pemodelan kekasaran lambung kapal divariasikan berdasarkan ketebalan pertumbuhan *biofouling* dalam periode 1 tahun (*annual docking*). Dalam tes model, pengukuran hambatan total terutama disebabkan dua komponen: gesekan dan sisa. Untuk menghitung tahanan gesekan (*frictional resistance*) untuk model dan kapal sesungguhnya menggunakan persamaan empiris. Salah satu pendekatan yang sering dipakai adalah *International Towing Tank Conference* (ITTC-57 *method*).

Model fisik kapal untuk uji hambatan dibuat 2 (dua) kali karena pembuatan model yang pertama kurang tepat (tidak presisi) dan tidak mengikuti instruksi dari teknisi dari Laboratorium Hidrodinamika Jurusan Teknik Perkapalan ITS.

Gambar 3. 2 Model Fisik setelah dicat dasar (putih)

Meskipun langkah kerjanya hampir sama yaitu pembuatan per*stations* (gading-gading). Adapun langkah-langkah pembuatan model fisik adalah sebagai berikut:

- Persiapan alat dan bahan yang meliputi: penggaris, gunting, cutter, kape yang terbuat dari plastik, mesin gerinda, kertas untuk print *lines plan* (*stations, parallel middle body, base line*, dan *deck*), 1 lembar tripleks 6 mm, 1 lembar tripleks 4 mm, 1 lembar tripleks 2 mm, lem G, dempul alfaglos 2 kg, resin, *fiberglass mat*, pilox warna putih dan kuning.
- Pemotongan kertas *lines plan* dengan menggunakan penggaris dan *cutter* sesuai dengan paket-paket gambar yang sudah kita buat (meliputi: gading-gading, *parallel middle body, base line*, dan *deck*).



Gambar 3. 3 Sketsa gading-gading yang siap dipotong

Selanjutnya, penempelan kertas yang sudah dipotong pada tripleks yang sudah kita siapkan dengan menggunakan lem G. Setelah ditempel, tripleks dipotong menggunakan cutter sesuai dengan bentuk gambar yang tertempel.

- Setelah tripleks terpotong semua sesuai dengan bentuk atau gambar yang tertempel. Proses selanjutnya adalah perakitan. Bentuk yang paling awal

Gambar 3. 4 Pemotongan tripleks

untuk dirakit adalah *parallel middle body, base line, deck*, dan 3 gading yang menempel pada *parallel middle body* (lihat Gambar 3.3). Proses perakitan harus dilakukan di meja kerja yang datar supaya didapatkan rangka model yang tegak dan benar. Selanjutnya memasang gading-gading pada rangka model yang telah dibuat tadi.

Gambar 3. 5 Perakitan awal

- Setelah gading-gading terpasang lengkap, tahap berikutnya adalah pemasangan kulit menggunakan tripleks 2 mm. Tahap ini cukup lama pengerjaannya karena tripleks harus dirajang kecil dengan tujuan

meminimalisir celah. Hal yang tersulit adalah pemasangan kulit pada gading-gading yang lengkung, khususnya bagian *bulbous bow*.

Gambar 3. 6 Gading-gading sudah terpasang pada rangka model

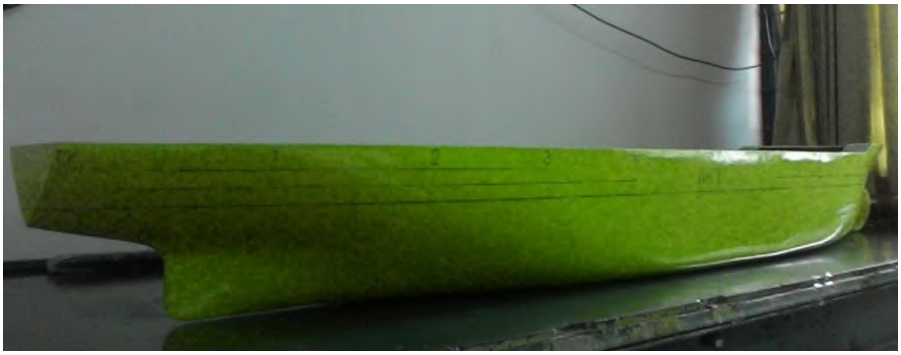
- Pendempulan dilakukan setelah kulit terpasang pada gading-gading. Tujuan pendempulan adalah untuk menutup pori-pori kulit model yang terbuat dari tripleks. Pekerjaan pendempulan membutuhkan keahlian khusus karena permukaan yang diperlukan cukup tipis sehingga tidak menambah dimensi pada model. Pendempulan harus dilakukan berulang-ulang (beberapa lapis) karena sifat dempul yang cepat kering dan sulit dibentuk terutama untuk model yang *stream lines.* Proses ini juga diikuti dengan *grinding* dan resin *fiberglass* pada bagian dalam model. Proses resin ini bertujuan untuk membuat kedap bagian dalam model. Pada saat pendempulan tidak boleh terkena matahari langsung karena akan mempercepat deformasi pada tripleks. Proses gerinda menggunakan kertas amplas *roll* dan harus memperhatikan bentuk *stream lines* dari model sehingga saat model diuji di kolam tarik, aliran air tidak terhambat oleh model yang menonjol atau ada tonjolan-tonjolan. Pendempulan tahap akhir juga diikuti dengan penancapan bekas potongan tripleks yang berupa gading supaya bentuk model presisi.

Gambar 3. 7 Proses dempul

- Proses berikutnya adalah pengecatan menggunakan cat semprot. Lapisan cat pertama adalah warna putih untuk cat dasar. Dan berikutnya adalah warna kuning untuk *finishing*-nya. Sebenarnya juga bisa menggunakan warna hijau. Karena 2 (dua) warna tersebut memberikan efek yang kontras dari warna air. Sehingga untuk pengamatan aliran air di sekitar model kapal bisa tampak jelas.

Gambar 3. 8 Pengecatan model

Model fisik berhasil dibuat dalam waktu kurang lebih 2 minggu dengan berat 10,1 kg. Sedangkan berat displamen model fisik adalah 64,265 kg sehingga membutuhkan beban tambahan (*ballast*) supaya model fisik terendam setinggi sarat seberat 54,165 kg.



Gambar 3. 9 Pandangan dari sisi samping model *smooth hull*

2.2 Metode Eksperimen Model Fisik di *Towing Tank*

Pengujian model fisik di *towing tank* dilakukan berdasarkan rekomendasi ITTC (*International Towing Tank Conference*), baik prosedur pengujian maupun analisa pengukuran. Metode yang digunakan adalah mengukur hambatan total dan mengaplikasikan formulasi empiris untuk hambatan gesek (*friction*). Adapun prosedur pengukurannya adalah sebagai berikut:

- Mengukur besarnya hambatan total (R_T) berdasarkan variasi kecepatan, termasuk mengamati aliran di sekitar lambung kapal.
- Komponen hambatan total (R_T) yang terdiri dari hambatan gesek (R_F) dan hambatan sisa (R_R) diperoleh dari hasil uji di *towing tank*.
- Hambatan sisa (R_R) dapat diperoleh dari hasil pengukuran hambatan total (R_T) dengan hambatan gesek (R_F) melalui persamaan: $C_R=C_T-C_F$ (Harvald, 1983) dan (Molland, Turnock, & Hudson, 2011).
- Total hambatan lambung kapal diukur dengan *load cell transducer*. *Load cell* adalah suatu *transducer* gaya yang bekerja berdasarkan prinsip deformasi suatu material akibat adanya tegangan mekanis yang bekerja. Besar tegangan mekanis berdasarkan pada deformasi yang diakibatkan oleh regangan. Regangan tersebut terjadi pada lapisan permukaan dari material sehingga dapat terukur pada alat sensor regangan atau *strain gage*. *Strain gage* ini merupakan transduser pasif yang merubah suatu pergeseran mekanis menjadi perubahan hambatan.

- Dimensi *towing tank* berukuran panjang 50 m, lebar 3m, kedalam 2 m, dan sarat airnya 1,8 m sebagaimana yang diperlihatkan pada Gambar 3.5. Kecepatan kereta tarik (*towing carriage*) 0,8-4 m/s.

Gambar 3. 10 *Towing Tank*

- Model uji diberikan *turbulence stimulation* yang terdiri dari pasir (*sand grain strips*) dengan lebar 10 mm, ukuran butir 0.50 mm dan terpasang dengan *leading edge* sekitar 5% LPP belakang FP sesuai rekomendasi ITTC (Harvald, 1983). Tujuan *turbulence stimulation* pada model uji adalah untuk menstabilkan model hambatan gesek sehingga kesesuaian hambatan gesek tersebut dapat dihitung secara akurat.
- Model fisik diuji dalam 1 kondisi sarat yaitu 7 m.

2.3 Survey Ketebalan dan Kekasaran *Biofouling*

Survey dilakukan di PT. Dok Perkapalan Surabaya pada tanggal 23 Maret 2016. Kapal yang disurvey adalah jenis *ferry*, penyeberangan Selat Lombok yang sudah berlayar selama 1 tahun. Karena keterbatan waktu dan akses, penulis merasa kesulitan kalau harus mencari data ketebalan *biofouling* pada kapal jenis kargo dengan panjang dan ukuran yang sama. Hal ini, penulis batasi pada Bab 1.

Gambar 3. 11 Survey ketebalan *biofouling*

Tujuan dari survey ini adalah untuk mendapatkan besarnya ketebalan *biofouling* yang menempel sepanjang badan kapal untuk kapal yang beroperasi di perairan Indonesia. Adapun bagian dan hasil surveynya adalah sebagai berikut:

Tabel 3. 2 Hasil Pengukuran Ketebalan *Biofouling*

	Haluan	***Midship***	**Buritan**
Port (m)	$15x10^{-3}$	$16x10^{-3}$	$23x10^{-3}$
Starboard (m)	$15x10^{-3}$	$16x10^{-3}$	$23x10^{-3}$
Flat bottom (m)	$15x10^{-3}$	$18x10^{-3}$	$20x10^{-3}$

Berdasarkan Tabel 3.2, *biofouling* semakin menebal dari haluan ke buritan kapal. Tebal ini berdasarkan tingkat pertumbuhan yang ditentukan oleh tingkat makanannya (Railkin, 2003). Diperkirakan makanan *biofouling* yang tersedia dan kadar oksigen pada bagian buritan lebih banyak daripada haluan.

Namun hasil ketebalan yang lebih besar diberikan oleh (Redfield & Hutchins, 1952), dimana ketebalan biota penempel ini mencapai 0,05 - 0,08 m dan beratnya dapat mencapai 50 x 10^3-100 x 10^3 kg pada kapal yang berlayar selama 6-8 bulan di Samudera Atlantik. Hal ini bisa disebabkan untuk saat ini sudah banyak cat antifouling yang beredar sehingga ketebalan *biofouling* yang menempel lebih kecil. Penulis juga menemukan fakta di lapangan terdapat kapal ferry yang sedang *docking* sama sekali tidak terdapat *biofouling* yang menempel di lambung kapal. Setelah ditelusuri, ternyata kapal ferry tersebut menggunakan cat antifouling

dengan merk intersleek yang harganya mahal. Dalam buku *Ship Resistance and Propulsion* nilai kekasaran *biofouling* disebut Ks. Nilai Ks untuk teritip (*barnacle*) adalah 5.000 x 10^{-6} m. Sebagai perbandingan nilai Ks untuk kapal yang sudah terlapisi cat (*marine paint* dan *antifouling*) adalah 150 x 10^{-6} m (Molland, Turnock, & Hudson, 2011).

2.4 Teknik Pembuatan Kekasaran Lambung Model Fisik

Setelah dilakukan survey *biofouling* terhadap kapal yang *docking*. Selanjutnya adalah penskalaan terhadap tebal *biofouling* yang menempel pada badan kapal. Nilai hasil skala adalah ukuran butir pasir yang menjadi media kekasaran model. Latar belakang pemilihan pasir sebagai representasi *biofouling* adalah karena dengan permukaan pasir ini memungkinkan pengamatan perbedaan yang sangat jelas dalam lapisan batas (*boundary layer*). Kekasaran pasir adalah yang dikenal baik dan sangat relevan dalam kaitannya dengan permukaan lambung kapal (Candries, 2001).

Dalam pembuatan kekasaran model kapal memerlukan beberapa alat dan bahan, antara lain: ayakan (ukuran mesh 30, 40, dan 50), lem epoxy avian, lem fox, cat emco, pasir besi lumajang, dan pilox matt clear. Berikut adalah langkah-langkah pembuatan kekasaran lambung model fisik:

- Pasir besi dijemur pada terik matahari supaya benar-benar kering. Setelah kering dilakukan pengayakan untuk mendapatkan grit pasir yang berbeda-beda yaitu mesh 30, 40, dan 50. Penentuan mesh ini dari penskalaan dari hasil survey ketebalan *biofouling.*

Gambar 3. 12 Penjemuran pasir Lumajang

- Percobaan penempelan pasir yang tepat pada permukaan lambung model fisik. Ada 3 alternatif media penempelan, yaitu cat emco, lem epoxy avian, dan lem fox. Dari hasil percobaan maka diputuskan menggunakan cat emco karena cukup rekat dan bisa dikontrol ketebalannya. Lem fox memiliki kelemahan tidak cukup kuat merekatkan pasir pada permukaan tripleks. Sedangkan lem avian sangat kuat menempelkan pasir pada permukaan tripleks. Namun, sangat sulit untuk kontrol ketebalan lem. Selanjutnya, sampel-sampel tersebut dibenamkan dalam air untuk menguji kerekatannya dan melihat media mana yang cukup tahan air. Hasilnya, cat emco cukup tahan terhadap air.

Gambar 3. 13 Uji coba penempelan pasir pada potongan tripleks

- Selanjutnya, penempelan pasir pada model fisik dengan bantuan ayakan supaya persebaran pasir merata. Setelah pasir tertempel pada cat, ada

kekhawatiran akan ada pasir yang rontok saat model dimasukkan dalam kolam uji (tidak mengotori kolam) sehingga penulis merasa perlu adanya media lain untuk memperkuat penempelan yaitu dengan melapiskan atau menyemprotkan pilox matt clear secukupnya.

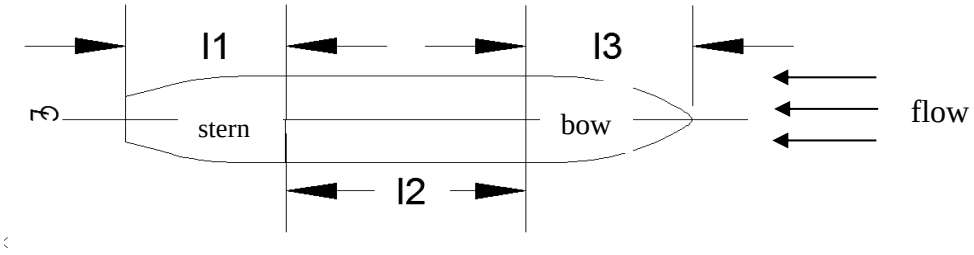
Gambar 3. 14 Penempelan pasir pada model fisik

Gambar 3. 15 Penyemprotan model dengan pilox matt clear

Pembuatan model kekasaran pada penelitian ini ada 2 kondisi yaitu *regular roughness* dan *irregular roughness*. *Regular roughness* adalah kekasaran merata pada lambung model kapal setinggi garis air (sarat). Nilai Ks pada *regular roughness* adalah nilai rata-rata tinggi *biofouling* yang menempel di sepanjang badan kapal. Tinggi rata-rata *biofouling* ini diskalakan dalam model menjadi butiran pasir (Ks) dengan ukuran 0,337 x 10^{-3} m. Sedangkan *irregular roughness* adalah kekasaran tidak merata setinggi sarat dan sesuai hasil survey di PT. DPS

Gambar 3. 16 Model *regular roughness*

(tinggi *biofouling* penempel pada haluan dan buritan berbeda). Khusus untuk *irregular roughness* bentuk kapal pada bidang garis air (sarat) disederhanakan sehingga berbentuk seperti Gambar 3.15, untuk mempermudah pemodelan. Ukuran diameter butiran pasir yang ditempel pada model ini dapat dilihat pada Tabel 3.3.



Gambar 3. 17 Klasifikasi area beda kekasaran sepanjang badan kapal dimana: l1 = 0,571 m; l2 = 0,857 m; dan l3 = 0,597 m.

Gambar 3. 18 Model *irregular roughness*

Tabel 3. 3 Ukuran Diameter Butir Pasir untuk Model *Irregular Roughness*

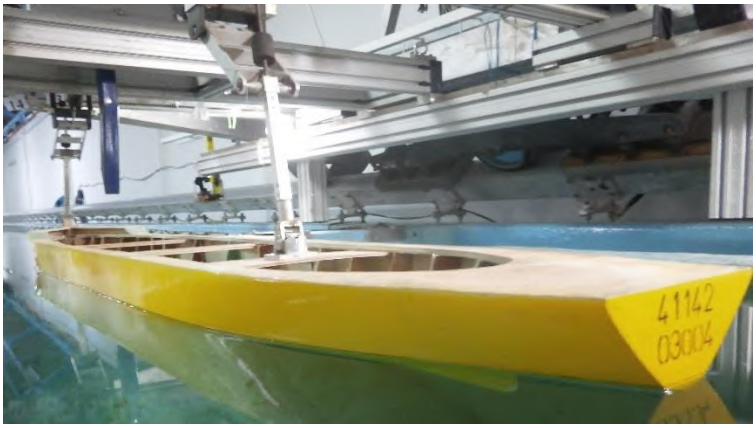
	Buritan	***Midship***	**Haluan**
Port (x10^{-3} m)	0,434	0,302	0,283
Starboard (x10^{-3} m)	0,434	0,302	0,283
Flat bottom (x10^{-3} m)	0,377	0,339	0,283

2.5 Pengujian Model Fisik

Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Hidrodinamika Jurusan Teknik Perkapalan ITS. Setiap metode dilakukan untuk menilai besarnya hambatan kapal (*smooth* dan *roughness hull*) dengan mempertimbangkan batasan masalah yang telah dijelaskan pada Bab 1. Eksperimen model uji dilakukan untuk menganalisa hambatan total kapal. Uji hambatan ini dikerjakan dengan 3 kondisi lambung yang berbeda yaitu: *smooth hull*, *regular roughness*, dan *irregular roughness*. Kondisi kekasaran model berdasarkan ketebalan *biofouling* yang menempel pada lambung kapal selama satu tahun (*annual docking*).

Prosedur pengujian tarik (hambatan kapal) diawali dengan pemberian *ballast* (beban) pada model supaya posisi air sesuai dengan garis air (kondisi *even keel*). Selanjutnya, pemasangan model kapal yaitu menempatkan model kapal pada posisi *centerline*.

Gambar 3. 19 Pemberian *ballast* pada model *regular roughness*



Gambar 3. 20 Posisi *centerline* pada model *smooth hull*

Selanjutnya model dipasang pada pengait (tidak mengubah posisi sarat). Profil logam dipasang ke kereta dengan menggunakan *holder*. Model dan *load cell* diikat dengan tali (diikat kuat supaya model tidak lepas ketika ditarik). Beban dipasang ke *load cell* dengan menggunakan tali (untuk kalibrasi).

Gambar 3. 21 *Holder* untuk mengaitkan model

Gambar 3. 22 Pengikatan *load cell* pada model

Proses penting dari pengujian tarik ini adalah kalibrasi alat, sebelum model ditarik oleh kereta. Adapun langkah-langkah kalibrasi alat adalah sebagai berikut:

- Semua peralatan dikalibrasi *zero set* dengan cara menekan tombol kalibrasi (pada alat) untuk melihat hasil konversi kalibrasi (*standard load cell*).
- Kalibrasi hambatan menggunakan amplifier.
- Model kapal diberi pembebanan (1 kg) kemudian diukur berapa millimeter pergeseran *strip chart* dengan memperhatikan volt pada amplifier tersebut.

Tabel 3. 4 Kalibrasi alat

***Load cell* (kg)**	***Strip chart* (mm)**	**Amplifier (volt)**

Setelah alat berhasil dikalibrasi, selanjutnya pelaksanaan penarikan model kapal. Adapun langkah-langkahnya adalah sebagai berikut:

- Model kapal yang telah siap, ditarik oleh kereta tarik dengan kecepatan yang diinginkan.
- Percobaan direkam dengan menggunakan 2 kamera untuk melihat aliran air di haluan dan buritan.
- Jarak tempuh kapal dalam percobaan sejauh ± 20 m.
- Pengambilan sampel data pada jarak 13 - 15 m atau 2 detik saat kecepatan kapal sudah stabil.

Pada tangki percobaan terdapat kereta penarik (*carriage*) model kapal yang menggunakan 4 buah motor listrik yang memungkinkan untuk tercapainya kecepatan konstan yang diinginkan dengan waktu yang relatif singkat sehingga tersedia waktu pengukuran yang cukup sebelum kereta berhenti pada ujung tangki atau kolam. Selama percobaan model kapal ditarik oleh kereta dengan mempergunakan poros vertikal yang dilengkapi *load cell*, dimana *load cell* inilah yang mengukur besarnya *force* atau hambatan model kapal. *Load cell* lalu dihubungkan ke penguat tegangan sebelum masuk ke jaringan komputer di dalam ruang kontrol. Percobaan ini dilakukan dalam kondisi air tenang (*calm water condition*) dan selama percobaan model kapal dapat melakukan gerakan mengangguk (*heaving* dan *pitching*) secara bebas tetapi terbatas.

Dalam pengujian model ini akan mendapatkan nilai R_T dalam satuan kilogram yang selanjutnya dibawa pada satuan newton dengan dikalikan dengan gravitasi bumi (9,8 m/s^2). Dengan menggunakan pendekatan Froude (ilmuwan pertama yang memperkenalkan tentang rincian hambatan total model kapal) komponen hambatan dapat diketahui dengan persamaan:

$$R_{TM} = R_{FM} + R_{RM}, \qquad (3.1)$$

dengan:

R_{TM} = Hambatan total dari eksperimen pada model,

R_{FM} = Hambatan gesek (*friction*),

R_{RM} = Hambatan sisa (*residuary*).

Selanjutnya, R_{RM} inilah yang digunakan sebagai ekstrapolasi untuk mendapatkan hambatan total kapal (R_{RM} sama dengan R_{RK}) (Froude, 1872).

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 4
HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Eksperimen

Model kapal diuji di Laboratorium Hidrodinamika Jurusan Teknik Perkapalan FTK-ITS yang dilengkapi dengan *loadcell* sebagai alat ukurnya. *Loadcell* digunakan untuk mengukur besar hambatan total model. Percobaan model dan analisanya dilakukan menurut metode Froude, yaitu hambatan total (R_T) terbagi atas hambatan gesek (R_F) dan hambatan sisa (R_R).

$$R_T = R_F + R_R, \qquad (4.1)$$

Pengujian model pada angka *Froude* (Fr) 0,16-0,29. Program pengujian pada model lambung diperlihatkan pada Tabel 4.1.

Tabel 4. 1 Program Pengujian (*test tank*)

Skala Model:		**53,027**	**Tanggal Pengujian:** **2016**
Uji ke	**Kapal** Knot	**Kereta** Volt	**Model** m/s
1	10	1,77	0,706
2	12	2,12	0,848
3	14	2,47	0,989
4	16	2,83	1,130
5	18	3,18	1,271

Analisis hasil percobaan didasarkan pada sifat-sifat fisik berikut:

Percepatan gravitasi, $g = 9{,}81\ m/s^2$

Density air laut (28 ^oC), $\rho = 1022{,}25\ kg/m^3$

Viskositas kinematis air laut (28 ^oC), $\nu = 0{,}885 \times 10^{-6}\ m^2/s$

Density air tawar (27 ^oC), $\rho = 996{,}45\ kg/m^3$

Viskositas kinematis air tawar (27 ^oC), $\nu = 0{,}854 \times 10^{-6}\ m^2/s$

Tabel 4. 2 Hubungan Kecepatan dengan R_T Model pada *Smooth Hull*

MODEL							
Run ke-	V(m/s)	R_T (N)	Re ($x10^6$)	$C_T(x10^{-3})$	$C_F(x10^{-3})$	$C_R(x10^{-3})$	Fr
1	0,706	1,26	1,575	5,374	4,257	1,117	0,16
2	0,848	1,76	1,890	5,225	4,101	1,124	0,20
3	0,989	2,52	2,205	5,484	3,975	1,508	0,23
4	1,130	3,52	2,520	5,878	3,871	2,007	0,26
5	1,272	4,02	2,835	5,308	3,783	1,525	0,29

Kecepatan model dapat diperoleh dengan rumus berikut:

$$V_M = \frac{V_S}{\sqrt{\lambda}} \ , \qquad (4.2)$$

V_M dan V_S masing-masing adalah kecepatan model (m/s) dan kecepatan kapal (m/s), dan λ adalah rasio skala. Dari eksperimen didapatkan nilai R_T dalam satuan kilogram yang selanjutnya dikalikan dengan gravitasi (g=9,81 m/s^2) sehingga didapatkan R_T dengan satuan newton.

Angka Reynolds (Re) didapatkan dari rumus:

$$R_e = \frac{V \times L}{\upsilon} \ , \qquad (4.3)$$

dengan V merupakan kecepatan model (m/s), ν merupakan viskositas kinematis air (m^2/s) dan L adalah panjang kapal/model (m). Panjang model dalam penelitian ini adalah panjang antara garis tegak (*length between perpendicular*/Lpp) yang digunakan untuk angka Reynolds maupun angka Froude. Nilai panjang kapal ini adalah Lpp karena berdasarkan referensi buku (IMO, 2005), dimana L ada dalam 3 kondisi:

- L = 85% Lwl, jika Lpp < 85% Lwl,
- L = 96% Lwl, jika Lpp > 96% Lwl,
- L = Lpp, jika 85% Lwl < Lpp < 96% Lwl.

Analisa koefisien hambatan total (C_T) untuk model kapal dihitung berdasarkan persamaan:

$$C_T = \frac{R_T}{0{,}5 \times \rho \times (WSA) \times V^2}, \quad (4.4)$$

dimana ρ adalah massa jenis air (1000 kg/m^3), V adalah kecepatan model (m/s), dan WSA adalah luas bidang basah lambung kapal (m^2). Koefisien hambatan gesek dihitung dengan garis korelasi ITTC-1957 yang ditetapkan di Madrid, Spanyol.

$$C_F = \frac{0{,}075}{\log(\mathrm{Re} - 2)^2}, \quad (4.5)$$

Koefisien hambatan sisa (C_R) diperoleh dengan rumus:

$C_R = C_T - C_F$, (4.6)

Dan angka Froude (Fr) diperoleh dari persamaan:

$$F_r = \frac{V}{\sqrt{g \times L}}, \quad (4.7)$$

Demikian, perhitungan untuk model.

Tabel 4. 3 Hubungan Kecepatan Dinas dengan R_T Kapal pada *Smooth Hull*

KAPAL					
Run ke-	V(knots)	Re (x10^8)	C_F (x10^{-3})	C_T(x10^{-3})	R_T(kN)
1	10	5,872	1,637	3,154	112,906
2	12	7,047	1,600	3,124	161,001
3	14	8,221	1,569	3,477	243,948
4	16	9,396	1,543	3,949	361,902
5	18	10,570	1,520	3,445	399,563

Untuk selanjutnya adalah menghitung kapal sebenarnya dengan cara ekstrapolasi / konversi menurut Froude, yaitu nilai C_R model = C_R kapal. Perhitungan angka Reynolds menggunakan persamaan (4.3), nilai C_F kapal diperoleh dengan persamaan (4.5) dengan penyesuaian besarannya. Koefisien hambatan total kapal diperoleh dengan persamaan:

$C_T = C_R + C_F + C_A$, (4.8)

dengan faktor kekasaran (*correlation allowance*) C_A = 0,0004. Nilai C_A tersebut adalah untuk tujuan praktis ketika kapal baru (bangunan baru) pada perhitungan perkiraan koefisien hambatan total maka ditambahkan nilai tersebut. Namun pada

model berikutnya (*regular roughness* dan *irregular roughness*) tidak demikian karena ada faktor kekasaran yang diberikan. Nilai CA ini diganti dengan ΔC_F (faktor kekasaran).

Dari C_T inilah akan didapatkan nilai R_T kapal dengan rumus:

$$R_T = \frac{1}{2} \times \rho \times V^2 \times C_T \times WSA, \qquad (4.9)$$

Tabel 4. 4 Hubungan Kecepatan dengan R_T Model pada *Regular Roughness*

MODEL							
Run ke-	V(m/s)	R_T (N)	Re ($x10^6$)	C_T($x10^{-3}$)	C_F($x10^{-3}$)	C_R($x10^{-3}$)	Fr
1	0,706	1,55	1,575	6,619	5,502	1,117	0,16
2	0,848	2,32	1,890	6,899	5,775	1,124	0,20
3	0,989	3,10	2,205	6,758	5,250	1,508	0,23
4	1,130	4,13	2,520	6,894	4,887	2,007	0,26
5	1,272	5,16	2,835	6,805	5,280	1,525	0,29

Penambahan kekasaran yang disebabkan oleh *biofouling*, seperti pertumbuhan teritip. Total peningkatan kekasaran ini mengarah pada kenaikan C_F sekitar 2 % - 4 % perbulan (Aertsen, 1963). Sehingga, pada perhitungan C_F untuk model *regular roughness* secara eksperimental adalah dengan mengurangkan C_T model *regular roughness* dengan C_R model *smooth hull.* Asumsi C_R yang tetap untuk kedua model ini karena tidak ada perubahan yang besar / mencolok dari dimensi model. Nilai C_F tersebut bisa dilihat pada Tabel 4.4.

Dalam buku *Ship Resistance and Propulsion* (Molland, Turnock, & Hudson, 2011), faktor kekasaran (*roughness allowance*) adalah ΔC_F. Faktor kekasaran secara eksperimen bisa didapatkan dengan cara mengurangkan C_F model *roughness* dengan C_F model *smooth*, yaitu:

ΔC_F = C_F model *roughness* - C_F model *smooth* (4.10)

$\Delta C_F = 5{,}502x10^{-3} - 4{,}257x10^{-3}$

$\Delta C_F = 1{,}245x10^{-3}$

Nilai ΔC_F dari eksperimen ini diuji dengan rumus empiris (Prandtl & Schlichting, 1934) dan bisa dilihat pada Lampiran-II.

Tabel 4. 5 Hubungan Kecepatan Dinas dengan R_T Kapal pada *Regular Roughness*

KAPAL					
Run ke-	V(knots)	Re ($x10^8$)	C_F ($x10^{-3}$)	C_T($x10^{-3}$)	R_T(kN)
1	10	5,872	2,882	4,399	157,465
2	12	7,047	3,274	4,798	247,317
3	14	8,221	2,843	4,752	333,385
4	16	9,396	2,558	4,965	455,000
5	18	10,570	3,018	4,943	573,273

Perhitungan hambatan total kapal yang ditumbuhi/ditempeli *biofouling* selama 1 tahun sama dengan perhitungan kapal sebelumnya. Namun, ada perbedaan pada penentuan nilai C_F, yaitu dengan persamaan:

$$C_{FR} = C_{FS} + \Delta C_F, \qquad (4.11)$$

Dimana C_{FR} adalah C_F untuk permukaan yang kasar akibat *biofouling*, C_{FS} adalah C_F dari ITTC 1957, ΔC_F adalah selisih antara C_F model *roughness* dengan C_F model *smooth.* Nilai ΔC_F ini sebagai pengganti C_A seperti pada persamaan (4.8).

Tabel 4. 6 Hubungan Kecepatan dengan R_T Model pada *Irregular Roughness*

MODEL							
Run ke-	V(m/s)	R_T (N)	Re ($x10^6$)	C_T($x10^{-3}$)	C_F($x10^{-3}$)	C_R($x10^{-3}$)	Fr
1	0,706	1,69	1,575	7,218	6,101	1,117	0,16
2	0848	2,45	1,890	7,277	6,153	1,124	0,20
3	0,989	3,27	2,205	7,122	5,613	1,508	0,23
4	1,130	4,63	2,520	7,732	5,725	2,007	0,26
5	1,272	5,99	2,835	7,906	6,381	1,525	0,29

Perhitungan C_F untuk model *irregular roughness* secara eksperimental adalah dengan mengurangkan C_T model *irregular roughness* dengan C_R model *smooth hull.* Nilai C_F tersebut bisa dilihat pada Tabel 4.6. Faktor kekasaran secara eksperimen bisa didapatkan dengan cara mengurangkan C_F model *irroughness* dengan C_F model *smooth*, yaitu:

$\Delta C_F = C_F$ model *roughness* - C_F model *smooth* (4.10)

$\Delta C_F = 6{,}101 \times 10^{-3} - 4{,}257 \times 10^{-3} = 1{,}844 \times 10^{-3}$

Nilai ΔC_F dari eksperimen ini diuji dengan rumus empiris (Prandtl & Schlichting, 1934) dan bisa dilihat pada Lampiran-II.

Tabel 4. 7 Hubungan Kecepatan Dinas dengan R_T Kapal pada *Irregular Roughness*

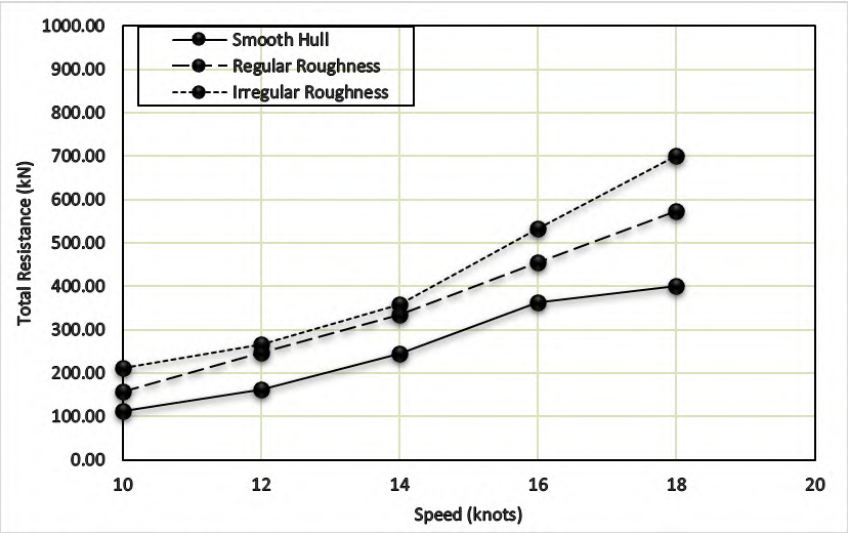
KAPAL					
Run ke-	V(knots)	Re ($x10^8$)	C_F ($x10^{-3}$)	C_T($x10^{-3}$)	R_T(kN)
1	10	5,872	3,473	4,990	178,623
2	12	7,047	3,652	5,176	266,824
3	14	8,221	3,207	5,115	358,895
4	16	9,396	3,397	5,803	531,829
5	18	10,570	4,119	6,044	700,971

Perhitungan hambatan total kapal yang ditumbuhi / ditempeli *biofouling* selama 1 tahun (*irregular roughness*) sama dengan perhitungan kapal sebelumnya (*regular roughness*). Data hasil perhitungan disajikan pada Tabel 4.7. Nilai C_F dan C_T ini lebih besar dibandingkan dengan kapal yang ditumbuhi *biofouling* merata di permukaan basahnya.

Pada kecepatan dinas (14 knots), perhitungan kenaikan C_F (ΔC_F) secara eksperimental dengan menggunakan persamaan (4.10) didapatkan persentase ΔC_F dari *smooth hull* ke *regular roughness* sebesar 32,06 % dan untuk ke *irregular roughness* adalah 41,20 %. Hasil ini menunjukkan *trend* yang sama (*good agreement*) dengan pengukuran yang dilakukan oleh (Lewthwaite, Molland, & Thomas, 1985), yang mendapatkan faktor kekasaran ΔC_F mencapai 80 % selama 2 tahun yang disebabkan oleh *fouling*. Dari nilai ΔC_F tersebut menunjukkan bahwa pemodelan *irregular roughness* mendekati nilai sebenarnya dengan verifikasi dari hasil penelitian Lewthwaite, Molland, dan Thomas (1985).

Hasil pengujian hambatan bisa dilihat pada Gambar 4.1, yang menggambarkan hubungan antara hambatan total dengan kecepatan kapal. Hasil dari analisis uji hambatan ini fokus pada peningkatan hambatan total yang disebabkan oleh pertumbuhan *biofouling* selama periode 1 tahun. Dari hasil

perhitungan, peningkatan hambatan total akibat pertumbuhan *biofouling* selama setahun sebesar 36,65% untuk kapal dengan *biofuling* merata pada luas permukaan basah setinggi sarat dan 47,11% untuk kapal dengan pertumbuhan *biofouling* yang tidak merata pada luas permukaan basah.



Gambar 4. 1 Hambatan total kapal

Efek dari penambahan hambatan adalah dapat mengurangi kecepatan kapal (Lewthwaite, Molland, & Thomas, 1985); (Curtin, 1985); (Redfield & Hutchins, 1952), menaikkan konsumsi bahan bakar (Champ, 2000); (Safriel, et al., 1993); (Communications, 2016). Oleh karena itu, tindakan yang harus diambil oleh pemilik kapal adalah melakukan survei tahunan sesuai dengan rekomendasi BKI.

4.2 Koreksi Hasil Eksperimen

Percobaan model dan perhitungannya dilakukan menurut metode Froude. Penulis merasa perlu mengadakan koreksi atau validasi terhadap nilai-nilai yang didapatkan terutama koefisien gesek dan faktor kekasaran.

4.2.1 Koreksi Koefisien Gesek dan Faktor Kekasaran Model *Regular Roughness*

Koefisien gesek C_F untuk model *regular roughness* ini diverifikasi dengan menggunakan rumus empiris dari (Prandtl & Schlichting, 1934) untuk koefisien gesekan total akibat kekasaran butiran pasir, yaitu:

$$C_F = \left[\left(1{,}894 + 1{,}62\ \log_{10}\left(\frac{L}{K_s}\right)\right)\right]^{-2{,}5} \qquad (4.12)$$

dengan L adalah panjang model dan Ks adalah amplitudo semu rata-rata dari kekasaran permukaan. Nilai Ks dalam eksperimen ini adalah ukuran butir pasir yang menempel dalam model kapal. Nilai Ks sebesar 0,34x10^{-3} m, didapatkan dari tinggi *biofouling* yang menempel (17,89 x10^{-3} m) dibagi dengan faktor skala (53,0267). L adalah panjang model kapal (1,9 m). Sehingga didapat nilai C_F sebesar 5,583x10^{-3}. Nilai C_F tersebut *comparable* dengan nilai C_F hasil eksperimen. Pada permukaan yang kekasarannya penuh (menyeluruh), seperti pada model *regular roughness*, hambatan bentuk mendominasi dan efek kekasaran disebabkan oleh pemisahan aliran dan *eddy shedding* benar-benar menguasai efek viskos (Candries, 2001).

Nilai ΔC_F ini bisa diverifikasi dengan menggunakan rumus empiris yang diajukan oleh (Townsin, 1985) untuk mendapatkan ΔC_F (faktor kekasaran). Pada kondisi ini, efek kekasaran bergantung pada angka Reynolds.

$$\Delta C_f = \left\{\left[44 \times \left(\frac{K_s}{L}\right)^{\frac{1}{3}} - 10 \times Re^{-1/3}\right] + 0{,}125\right\} \times 10^{-3} \qquad (4.13)$$

Nilai Ks sebesar 0,34x10^{-3} m, didapatkan dari tinggi *biofouling* yang menempel (17,89 x10^{-3} m) dibagi dengan faktor skala (53,0267). L adalah panjang model kapal (1,9 m). Angka Reynolds 1,575x10^{6}. Sehingga didapat nilai ΔC_F sebesar 1,259x10^{-3} untuk sepanjang model fisik. Nilai ΔC_F tersebut *comparable* dengan nilai ΔC_F hasil eksperimen.

4.2.2 Koreksi Koefisien Gesek dan Faktor Kekasaran Model *Irregular Roughness*

Pertumbuhan *biofouling* tidak linier karena dipengaruhi banyak faktor. Berdasarkan hasil pengamatan dan pengukuran ketebalan *biofouling* pada kapal yang *docking*, didapatkan ketebalan *biofouling* yang berbeda-beda pada setiap daerah yang diamati (telihat pada Tabel 3.2). Dengan kondisi tersebut, perlu dibuat model fisik dengan ketebalan pasir yang berbeda-beda untuk setiap daerah (bisa dilihat pada Tabel 3.3). Perhitungan untuk model *irregular roughness*

menggunakan persamaan (Prandtl & Schlichting, 1934) untuk C_F lokal dari setiap daerah kekasaran yang berbeda, yaitu:

$$C_F = \left[\left(2{,}87 + 1{,}58\ \log_{10}\left(\frac{x}{K_s}\right)\right)\right]^{-2{,}5} \qquad (4.14)$$

Data hasil perhitungan disajikan pada Tabel 4.6. Perkiraan nilai C_F terkait perbedaan ukuran pasir dengan menggunakan persamaan (4.14) untuk setiap luas permukaan yang kekasarannya berbeda-beda. Untuk daerah haluan, nilai C_F didapatkan sebesar 5,301x10^{-3}; *midship* 5,525x10^{-3}; dan buritan 5,879x10^{-3}. Perhitungan nilai C_F dan ΔC_F untuk masing-masing luasan yang berbeda-beda ini, disajikan pada Lampiran-II.

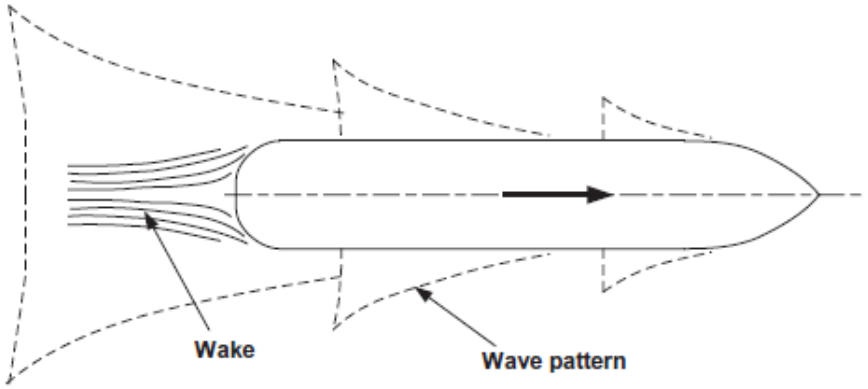
Tabel 4. 8 Komparasi nilai koefisien gesek

No.	Fr	CFD			Eksperimen			Formula empiris	
		Smooth (x10^{-3})	*Regular* (x10^{-3})	*Irregular* (x10^{-3})	*Smooth* (x10^{-3})	*Regular* (x10^{-3})	*Irregular* (x10^{-3})	*Regular* (x10^{-3})	*Irregular* (x10^{-3})
1	0,16	4,393	5,677	6,905	4,257	5,502	6,101	5,583	5,61
2	0,20	4,281	5,863	7,594	4,101	5,775	6,153	5,583	5,61
3	0,23	4,191	5,366	6,504	3,975	5,250	5,613	5,583	5,61
4	0,26	4,116	5,291	6,429	3,871	4,887	5,725	5,583	5,61
5	0,29	4,052	5,327	7,365	3,783	5,280	6,381	5,583	5,61

Tabel 4.8 merupakan komparasi nilai koefisien gesek dari beberapa metode perhitungan yaitu CFD, eksperimen, dan formula empiris dari Prandtl-Schlichting. Penelitian dengan simulasi CFD dilakukan oleh (Baital, 2016) dengan skala model 1:25. Nilai koefisien gesek model *smooth hull* dari CFD lebih besar daripada eksperimen. Hal ini dimungkinkan karena CFD dihitung secara 3 dimensi dengan *finite volume methods.* Sedangkan dalam perhitungan eksperimen menggunakan pendekatan ITTC, dengan asumsi pelat datar. Penulis menggunakan pendekatan ITTC atas rekomendasi perhitungan yang selama ini dilakukan di Laboratorium Hidrodinamika ITS. Nilai C_F formula empiris baik untuk model *regular roughness* maupun *irregular roughness* tetap untuk angka Froude yang berbeda. Hal ini dikarenakan formula empiris yang dikeluarkan (Prandtl & Schlichting, 1934) tidak tergantung pada angka Froude maupun angka Reynolds.

4.3 Karakteristik Pola Gelombang (*Wave Pattern*) pada Lambung Kapal

Observasi lambung kapal yang bergerak di permukaan air menimbulkan 2 (dua) pola aliran, sebagaimana yang diperlihatkan pada Gambar 4.2, yaitu pola gelombang (*wave pattern*) yang bergerak dengan lambung dan aliran turbulen yang terbentuk di sepanjang lambung kapal yang kemudian membentuk suatu aliran di belakang kapal yang disebut *wake*. Kedua pola aliran tersebut menyerap energi dari lambung kapal, yang kemudian menimbulkan gaya/hambatan. Pola aliran dalam eksperimen ini dapat dilihat pada Gambar 4.3 dan 4.4.



Gambar 4. 2 Pola aliran gelombang pada lambung kapal

Lambung kapal yang terbenam dan bergerak di permukaan air mengalami tekanan yang bervariasi di sekitar lambungnya. Pada area di sekitar lambung dekat permukaan air, variasi tekanan tersebut akan merubah karakteristik fluida di permukaan air yang kemudian menimbulkan gelombang (*wave making*), (Molland, Turnock, & Hudson, 2011).

Dalam eksperimen ini, pola aliran sekitar lambung model bisa ditangkap dengan menggunakan 2 (dua) kamera yang terletak di depan dan belakang kereta penarik. Kamera terletak di sisi kanan kereta dan tertempel pada kereta penarik. Berikut hasil pengambilan gambar oleh kamera:

Gambar 4. 3 *Running* model tampak dari belakang

Gambar 4. 4 *Running* model tampak dari depan

Halaman ini sengaja dikosongkan

LAMPIRAN-I

FOTO EKSPERIMEN MODEL FISIK DI TOWING TANK

I.1 Model *Smoothhull*

Fr = 0,16

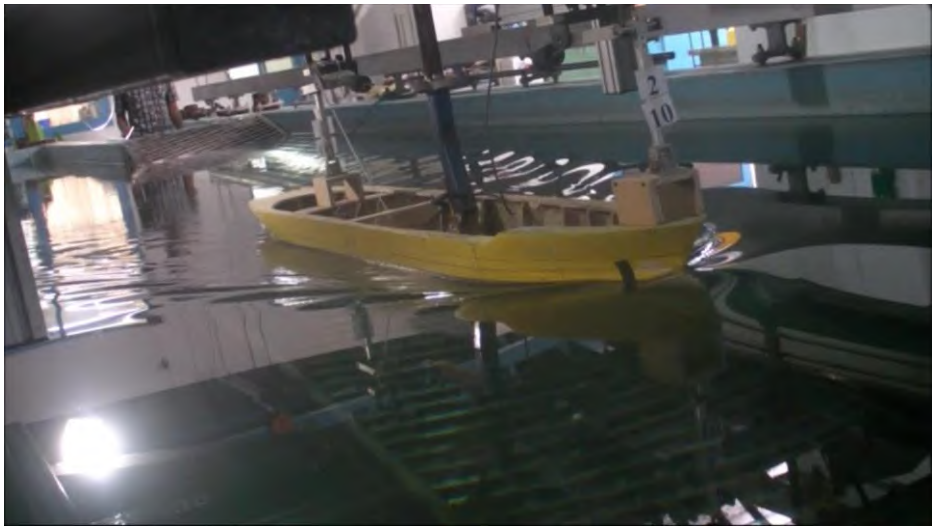
Fr = 0,20

Fr = 0,23

Fr = 0,26

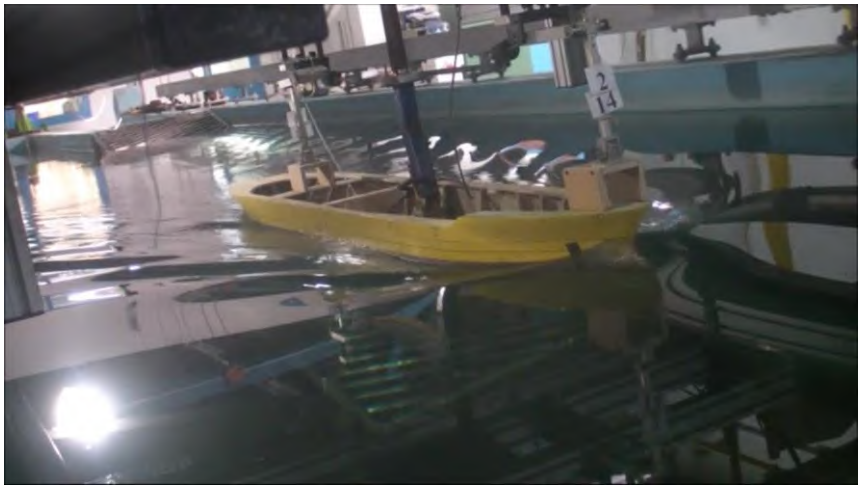
Fr = 0,29

I.2 Model *Regular Roughness*



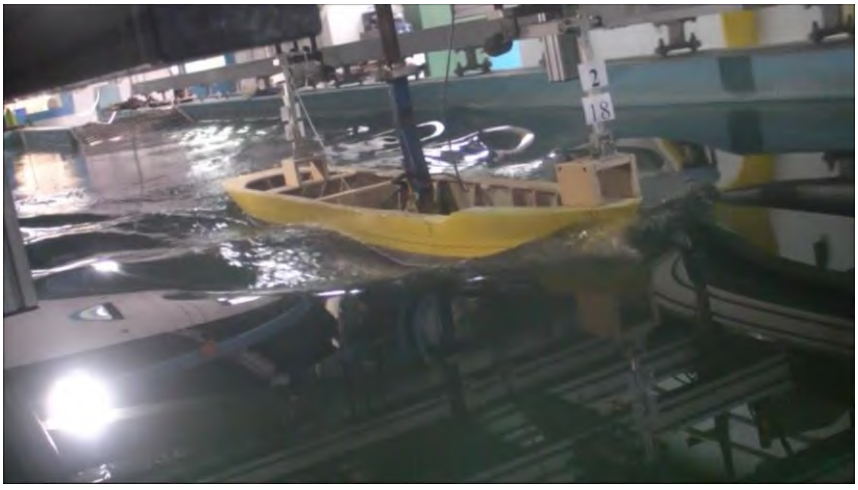
Fr = 0,16

Fr = 0,2



Fr = 0,23

Fr = 0,26



Fr = 0,29

I.3 Model *Irregular Roughness*

Fr = 0,16

Fr = 0,20

Fr = 0,23

Fr = 0,26

Fr = 0,29

LAMPIRAN-II

PERHITUNGAN KOEFISIEN GESEK DAN FAKTOR KEKASARAN

Dengan menggunakan persamaan (4.14) akan didapatkan koefisien gesek dengan memasukkan inputan nilai besaran yang sudah diketahui, maka:

II.1 Faktor Kekasaran ΔC_F untuk model *regular roughness*

II.1.1 Daerah Haluan

$$C_F = \left[\left(2{,}87 + 1{,}58\ \log_{10}\left(\frac{x}{K_s}\right)\right)\right]^{-2{,}5}$$

$$C_F = \left[\left(2{,}87 + 1{,}58\ \log_{10}\left(\frac{0{,}5966\ m}{0{,}28 \times 10^{-3}\ m}\right)\right)\right]^{-2{,}5}$$

$$C_F = 5{,}301 \times 10^{-3}$$

Faktor kekasaran ΔC_F diperoleh dengan mengurangkan C_F yang telah didapatkan di atas dengan C_F dari model *smooth*, maka:

$\Delta C_F = 5{,}301\text{x}10^{-3} - 4{,}257\text{x}10^{-3}$

$\Delta C_F = 1{,}044\text{x}10^{-3}$

II.1.2 Daerah *Midship*

$$C_F = \left[\left(2{,}87 + 1{,}58\ \log_{10}\left(\frac{x}{K_s}\right)\right)\right]^{-2{,}5}$$

$$C_F = \left[\left(2{,}87 + 1{,}58\ \log_{10}\left(\frac{0{,}6\ m}{0{,}34 \times 10^{-3}\ m}\right)\right)\right]^{-2{,}5}$$

$$C_F = 5{,}525 \times 10^{-3}$$

Faktor kekasaran ΔC_F diperoleh dengan mengurangkan C_F yang telah didapatkan di atas dengan C_F dari model *smooth*, maka:

$\Delta C_F = 5{,}525\text{x}10^{-3} - 4{,}257\text{x}10^{-3}$

$\Delta C_F = 1{,}268\text{x}10^{-3}$

II.1.3 Faktor Kekasaran ΔC_F untuk Daerah Buritan

$$C_F = \left[\left(2{,}87 + 1{,}58\ \log_{10}\left(\frac{x}{K_s}\right)\right)\right]^{-2{,}5}$$

$$C_F = \left[\left(2{,}87 + 1{,}58\ \log_{10}\left(\frac{0{,}5714\ m}{0{,}43 \times 10^{-3}\ m}\right)\right)\right]^{-2{,}5}$$

$$C_F = 5{,}879 \times 10^{-3}$$

Faktor kekasaran ΔC_F diperoleh dengan mengurangkan C_F yang telah didapatkan di atas dengan C_F dari model *smooth*, maka:

$\Delta C_F = 5{,}879\text{x}10^{-3} - 4{,}257\text{x}10^{-3}$

$\Delta C_F = 1{,}622\text{x}10^{-3}$

Dengan menggunakan metode persentase statistik, didapatkan ΔC_F model *irregular roughness* ini sebesar $1{,}281\text{x}10^{-3}$

II.2 Faktor Kekasaran ΔC_F untuk model *regular roughness*

$$C_F = \left[\left(1{,}894 + 1{,}62\ \log_{10}\left(\frac{L}{K_s}\right)\right)\right]^{-2{,}5}$$

$$C_F = \left[\left(1{,}894 + 1{,}62\ \log_{10}\left(\frac{2{,}05\ m}{0{,}34 \times 10^{-3}\ m}\right)\right)\right]^{-2{,}5}$$

$$C_F = 5{,}49 \times 10^{-3}$$

Faktor kekasaran ΔC_F diperoleh dengan mengurangkan C_F yang telah didapatkan di atas dengan C_F dari model *smooth*, maka:

$\Delta C_F = 5{,}49\text{x}10^{-3} - 4{,}257\text{x}10^{-3}$

$\Delta C_F = 1{,}233\text{x}10^{-3}$

BAB 5
KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan pembahasan, diketahui bahwa pengujian tarik model fisik di *towing tank* mampu menunjukkan efek kekasaran lambung model terhadap hambatan gesek dan hambatan total model. Dalam kasus ini, peningkatan hambatan gesek akibat permukaan lambung model fisik yang dikasarkan dengan penempelan pasir. Peningkatan hambatan gesek pada model fisik selanjutnya dapat digunakan untuk menghitung hambatan total kapal dengan menggunakan pendekatan Froude. Secara lengkap kesimpulan dalam penelitian ini adalah:

1. Tiga kondisi lambung model fisik yang berbeda (*smooth hull*, *regular roughness*, dan *irregular roughness*) telah diuji tarik dan dihitung dengan menggunakan pendekatan Froude. Hambatan total kapal didapatkan dari ekstrapolasi / konversi menurut Froude, yaitu C_R model = C_R kapal. Nilai hambatan total tersebut secara berturut-turut sebesar 243,95 kN; 333,37 kN; dan 358,88 kN pada kecepatan dinas. Hasil tersebut menunjukkan penambahan hambatan total dari kapal yang telah beroperasi selama 1 tahun sebesar 36,65% untuk kapal dengan *biofuling* merata pada luas permukaan basah dan 47,11% untuk kapal dengan pertumbuhan *biofouling* yang tidak merata pada luas permukaan basah.
2. Pertumbuhan dan penempelan *biofouling* pada kapal selama 1 tahun beroperasi menimbulkan faktor kekasaran ΔC_F tertentu. Dalam penelitian ini didapatkan ΔC_F (*roughness allowance*) sebesar 32,06% pada model *regular roughness* dan 41,20% pada model *irregular roughness*.

5.2 Saran

Untuk penelitian lebih lanjut, hendaknya membuat model fisik sesuai dengan kapal yang disurvey untuk mendapatkan hasil yang mendekati / mewakili kondisi sebenarnya. Pengamatan *biofouling* secara periodik pada kapal yang

beroperasi (berlayar) supaya variasi tentang pemodelan kekasaran lambung model fisik lebih banyak.

DAFTAR PUSTAKA

Aertsen, G. (1963). Service-performance and seakeeping trials on MV Lukuga. *Transactions of the Royal Institution of Naval Architects*, 293-335.

Akinlade, O. G. (2005). *Effect of surface roughness on the flow characteristics in a turbulent boundary layer*. Canada: Thesis Ph.D University of Saskatchewan.

Ayers, J. C., and Turner, H. J. (1952). The Principal Fouling Organisms. In W. H. Institution, *Marine Fouling and its Prevention* (p. 118). Wisconsin: George Banta Publishing Company.

Baital, M. S. (2016). *Analisa Pengaruh Penempelan Marine Biofouling terhadap Power Kapal dengan Simulasi CFD.* Surabaya: Tesis Master Jurusan Teknik Perkapalan FTK-ITS.

Candries, M. (2001). *Drag, boundary-layer and roughness characteristics of marine surfaces coated with antifoulings.* UK: Thesis Ph.D Newcastle University.

Chambers, L. D., Stokes, K. R., Walsh, F. C., and Wood, R. J. (2006). Modern approaches to marine antifouling coatings. *Surface and Coatings Technology* (pp. 3642–3652). Elsevier.

Champ, M. A. (2000). A review of organotin regulatory strategies, pending actions, related costs and benefits. *Science of the Total Environment*, Elsevier.

Communications, O. o. (2016, January 2). *New Hull Coatings Cut Fuel Use, Protect Environment*. Retrieved from http://www.navy.mil/local/onr/: http://www.navy.mil/submit/display.asp?story_id=45984

Couser, P. R., Molland, A. F., Armstrong, N. A., and Utama, I. (1997). Calm water powering prediction for high speed catamarans. *Proceeding of 4th International Conference on Fast Sea Transportation* (pp. 3642-3652). Sydney: FAST'97.

Curtin, M. E. (1985). Trying to Solve the Biofouling Problem. *Nature Biotechnology 3*, 38.

Edward, V. L. (1988). *Principles of Naval Architecture, Volume 2.* New York: Society of Naval Architects and Marine Engineers.

Froude, W. (1872). *Experiments on the surface-friction experienced by a plane moving throgh water.* Brighton: 42nd Report of the British Association for the Advancement of Science.

Hansen, S. V. (2011). *Performance monitoring of ships.* Denmark: Thesis Ph.D Technical University of Denmark.

Harvald, S. A. (1983). *Resistance and Propulsion of Ships.* New York: Wiley.

IMO. (2005). *Load lines.* London: IMO Publication.

ITTC. (1990). *Hull roughness.* Report of the ITTC Performance Committee.

Ketchum, B. H. (1952). Factors Influencing the Attachment and Adherence of Fouling Organisms. In W. H. Institution, *Marine Fouling and its Prevention* (p. 230). Wisconsin: George Banta Publishing Company.

Legg, M., Yücel, M. K., Carellan, I. G., Kappatos, V., Selcuk, C., and Gan, T. H. (2015). Acoustic methods for biofouling control: A review. *Ocean Engineering, Volume 103*, 237-247.

Lewthwaite, J. C., Molland, A. F., and Thomas, K. W. (1985). An investigation into the variation of ship skin frictional resistance with fouling. *The Royal Institute of Naval Architects*, 269-283.

Molland, A. F., Turnock, S. R., and Hudson, D. A. (2011). *Ship Resistance and Propulsion: Practical Estimation of Propulsive Power.* United States of America: Cambridge University Press.

Prandtl, L., and Schlichting, H. (1934). Das Widerstandsgesetz rauher Platten. *Springer*, 649-662.

Railkin, A. I. (2003). *Marine Biofouling: Colonization Processes and Defenses.* New York: CRC Press.

Redfield, A. C., and Hutchins, L. W. (1952). The Effect of Fouling. In W. H. Institution, *Marine Fouling and its Prevention* (p. 3). Wisconsin: George Banta Publishing Company.

Safriel, U. N., Cohen, Y., Erez, N., Gateno, D., Keasar, T., and Dolev, Y. (1993). Biological control of marine biofouling. *Oebalia*, 193-199.

Salta, M., Warton, J., Stoodley, P., Dennington, S., Goodes, L., Werwinski, S., . . . Stokes, K. (2010). Designing biomimetic antifouling surfaces. *Philosophical Transactions of the Royal Society* (pp. 4729–4754). The Royal Society Publishing.

Schultz, M. P., Bendick, J. A., Holm, E. R., and Hertel, W. M. (2011). Economic impact of biofouling on a naval surface ship. *Biofouling: The Journal of Bioadhesion and Biofilm*, 87-98.

Tarasov, N. (1961). Fouling in Soviet waters of the Sea of Japan. *Tr. Inst. Okeanol. Akad. Nauk*, 3.

Townsin, R. L. (1985). The ITTC line–its genesis and correlation allowance. *The Naval Architect, RINA*, E359–E362.

Vladkova, T. (2009). Surface modification approach to control biofouling. In U. f. Department of Polymer Engineering, *Marine and Industrial Biofouling* (pp. 135-163). Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BIODATA PENULIS

Penulis dilahirkan di Bojonegoro pada tanggal 24 Oktober 1987, sebagai anak pertama dari tiga bersaudara. Penulis dilahirkan dari kedua orang tua yang bernama Asim, Spd. dan Tri Yuniati, Spd. Penulis adalah alumnus dari SD Negeri 1 Kalitidu, SLTP Negeri 1 Kalitidu, SMA Negeri 2 Bojonegoro, dan Sarjana Sains di Jurusan Fisika FMIPA Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya. Setelah lulus S1, penulis sempat bekerja di sebuah perusahaan galvanizing selama 1 tahun sebagai Quality Control (QC). Penulis melanjutkan S2 di Jurusan Teknik Perkapalan ITS setelah mendapatkan beasiswa Pra S2 Saintek dari DIKTI. Dalam program beasiswa ini, penerima beasiswa harus menempuh martikulasi selama 1 tahun di Jurusan Fisika FMIPA dan Perkapalan, yang selanjutnya juga harus mengikusi seleksi masuk program pascasarjana. Setelah lulus S2 ini, penulis harus mengajar sebagai dosen sebagai bentuk pengabdian kepada Negara karena sudah diberikan beasiswa.