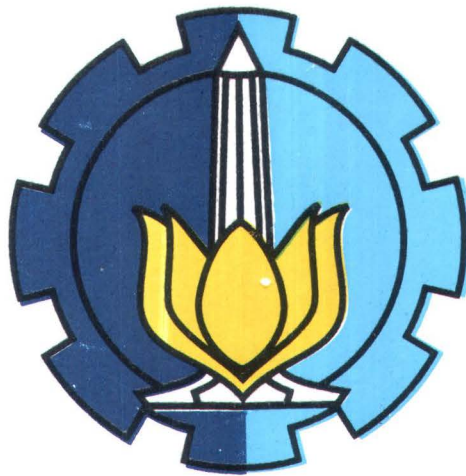


15. 564 / H / 02



TUGAS AKHIR
KP 1701

**OPTIMISASI PENENTUAN UKURAN UTAMA KAPAL
BERDASARKAN PENGARUH KARAKTERISTIK ADDED
RESISTANCE YANG DIALAMI KAPAL DI GELOMBANG
IRREGULER DENGAN PEMROGRAMAN KOMPUTER**



NSP
623. DI
wid.
0-1
2001

Oleh :

WAHYU WIDIARTO
4194 100 034

**JURUSAN TEKNIK PERKAPALAN
FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2001**

PEEPUSTAKAAN ITS	
Tgl. Terima	2-1-2002
Terima	H
No. Agenda	21. 4791

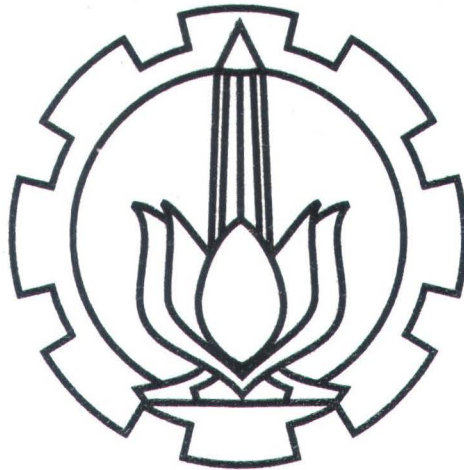
LEMBAR PENGESAHAN

TUGAS AKHIR

KP 1701

JUDUL

**OPTIMISASI PENENTUAN UKURAN UTAMA KAPAL
BERDASARKAN PENGARUH KARAKTERISTIK ADDED
RESISTANCE YANG DIALAMI KAPAL DI GELOMBANG
IRREGULER DENGAN PEMROGRAMAN KOMPUTER**



Telah diajukan pada sidang Tugas Akhir
Tanggal : 3 Agustus 2001
Sebagai syarat keserjanaan (S-1)
Pada Jurusan Teknik Perkapalan

Surabaya, Agustus 2001
Mengetahui dan Menyetujui
Dosen Pembimbing

4/9⁻⁰¹

A handwritten signature in brown ink, which appears to read "Irdy Jurt", is written over the printed name of the supervisor.

Ir. H. Murdjianto, M.Eng
NIP. 130 532 028



DEPARTEMEN PENDIDIKAN NASIONAL
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN
JURUSAN TEKNIK PERKAPALAN

Kampus ITS - Sukolilo, Surabaya 60111 Telp. 5947254, 5994251-5 Pes, 1173 - 1176 Fax 5947254

SURAT KEPUTUSAN TUGAS AKHIR

No. : 564b / K03.4.2/PP/2001

Nama Mahasiswa : Wahyu Widiarto
Nomor Pokok : 4194100034
Tanggal diberi tugas : 01 Pebruari 2001
Tanggal selesai tugas : 30 Juni 2001
Dosen Pembimbing : 1. Ir. Murdijanto, M.Eng
2.

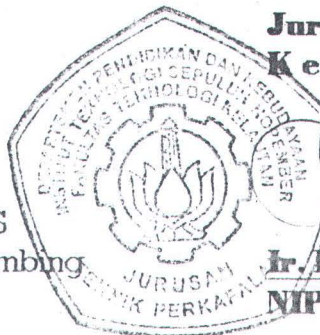
Uraian / judul tugas akhir yang diberikan :

*#OPTIMISASI PENENTUAN UKURAN UTAMA KAPAL BERDASARKAN KARAKTERISTIK
TAHANAN TAMBAHAN YANG DIALAMI KAPAL DI GELOMBANG IRREGULER DENGAN
PEMROGRAMAN KOMPUTER#*

Surabaya, 19 Pebruari 2000

Jurusan Teknik Perkapalan

Ketua,



[Signature]
Ir. Djauhar Manfaat, MSc., Ph.D.
NIP. 131 651 444.

Tembusan :

1. Yth. Dekan FTK-ITS
2. Yth. Dosen Pembimbing
3. Arsip

Kupersembahkan untuk

Ayahanda tercinta yang telah berada disisi Allah Swt.

Waluyo BCHK (alm)

Juga teruntuk ibu, eyang putri, Mas Yuris, mas ERY
Dik Rini, Dik Atiek, Dik Wulan, mbak Dewi, dan Rania Hana

< قُواْ اَنْفُسَكُمْ وَاٰهْلِيْكُمْ نَارًا >

INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER

ABSTRAK

FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN
JURUSAN TEKNIK PERKAPALAN

Sarjana Teknik (S-1)

**OPTIMISASI PENENTUAN UKURAN UTAMA KAPAL
BERDASARKAN KARAKTERISTIK ADDED RESISTANCE YANG
DIALAMI KAPAL DI GELOMBANG IRREGULER DENGAN
PEMROGRAMAN KOMPUTER**

Oleh

Wahyu Widiarto

Dosen Pembimbing

Ir. H. Murdijanto, M.Eng

Pengamatan terhadap tataran keberhasilan suatu rancangan kapal pada akhirnya tampak pada performa dinamika kapal ketika kapal berlayar di perairan bergelombang, terutama kemampuan kapal untuk tetap mempertahankan kecepatan operasinya. Kenyataan yang masih ada sekarang ini menunjukkan bahwa dalam proses perencanaan kapal, perancang masih sering menggunakan prediksi perhitungan kondisi air tenang yang kemudian ditambahkan dengan faktor tahanan angin dan tahanan gelombang yang diperkirakan sekitar 10%-15% (Bhattacharrya,1978). Dengan mengacu pada kenyataan tersebut perlu sekali diadakan penelitian-penelitian untuk mengintegrasikan prediksi terhadap kemungkinan pergerakan kapal ketika beroperasi di perairan bergelombang dengan proses perencanaan kapal.

Pada tugas akhir ini akan dilakukan proses optimisasi ukuran utama kapal dengan mengintegrasikan prediksi karakteristik seakeeping yang dialami kapal, dengan fungsi tujuan adalah minimum added resistance. Pengembangan model dimensi kapal dilakukan berdasarkan batasan teknis dari series 60. Hasil akhir dari penelitian ini adalah sebuah kerangka kerja perangkat lunak yang ditulis dalam utility Visual Basic, yang dapat dimanfaatkan untuk mengoptimisasikan ukuran utama kapal yang ketika beroperasi di perairan bebas memiliki minimum added resistance dan optimum seakeeping characteristics.

SEPULUH NOPEMBER INSTITUTE OF TECHNOLOGY

ABSTRACT

FACULTY OF MARINE TECHNOLOGY
DEPARTEMENT OF NAVAL ARCHITECTURE
AND SHIP BUILDING TECHNOLOGY

Degree in Engineering (S-1)

OPTIMIZATION ON PRINCIPAL DIMENSION FIXATION BASED ON
CHARACTERISTICS OF ADDED RESISTANCE WHICH EXPERIENCED
INTO THE SHIP IN IRREGULER SEAWAY AIDED COMPUTER
PROGRAMMING

By

Wahyu Widiarto

Lecture

Ir. H. Murdijanto, M. Eng.

The success of ship design depends ultimately on its dynamics performance (more specific on its capability to sustain speed) in seaway and not in calm water, since the sea is mostly not calm. Yet most ship designers still select their ship dimension mainly on the basis of calm water performance, then traditionally the resistance required to attain speed in seaway determined by making allowance of 15% to 30% for wind and waves (Bhattacharyya, 1978). According to that reality, the research on prediction of seakeeping characteristics in seaway integrating with ship design process should be done frequently.

This final project shows the process of ship principal dimension optimization integrated with seakeeping characteristics prediction, with minimum added resistance as target objective function. Ship dimension developed based on series 60 technical constrain. The final results of this experiment is a software framework which be written on visual basic programming, that can be used for optimizing ship principal dimension having minimum added resistance and optimum seakeeping characteristics when experience in seaway.

Kata Pengantar

السلا م عليكم ورحمه الله وبركاته
بسم الله الرحمن الرحيم

Syukur alhamdulillah senantiasa terpanjat kepada Allah Swt. yang telah memberikan kesempatan kepada kami sehingga tugas akhir ini dapat terselesaikan dengan baik dan tepat pada waktunya. Tidak lupa pula sholawat dan salam semoga tetap terlimpah atas junjungan kita Muhammad Saw. Rahmatan lil 'alamiin.

Setelah melalui berbagai hambatan dan tekanan dalam menempuh studi di Jurusan Teknik Perkapalan, ITS Surabaya ini, akhirnya kami berhasil mengakhiri proses tersebut dengan menyelesaikan penyusunan tugas akhir ini. Tugas akhir ini sendiri merupakan syarat akhir untuk dicapainya gelar kesarjanaan teknik dalam Jurusan Teknik Perkapalan, ITS Surabaya.

Kami berharap bahwa tugas akhir ini nantinya dapat memberikan kontribusi bagi dunia perkapalan khususnya dan masyarakat bidang kemaritiman pada umumnya. Namun demikian kami menyadari sepenuhnya bahwa apa yang kami hasilkan ini masih jauh dari kata sempurna, untuk itu kami terbuka sekali terhadap kritik dan saran membangun yang disampaikan kepada kami. Demikian sekapur sirih dari kami, semoga penulisan tugas akhir ini memberikan kemanfaatan sesuai niat dan tujuannya. Amiin.

ن والقلم وما يشطرون
والسلا م عليكم ورحمه الله وبركاته

Surabaya, Agustus 2001

Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih sedalam-dalamnya kami sampaikan kepada

1. **Ir. Djauhar Manfaat, MSc, Ph.D.** Ka.Jur. Teknik Perkapalan ITS Surabaya
2. **Ir. I K Aria Pria Utama, M.Sc, Ph.D.** Sek. Jur. Teknik Perkapalan ITS Surabaya.
3. **Ir. Setijo Prajudo, MSE.** Dosen Wali.
4. **Ir. Murdijanto, M.Eng.** Dosen Pembimbing tugas akhir.
5. **Ir. R. Sjarief Widjaja, Ph. D,** Direktur LPIU ITS dan Dosen Pembimbing Kerja Praktek
6. **Ayahanda (alm.), Ibunda, Eyang Wiryo, Mas Yuris, Mas Ery, Dik Rini, Dik Atiek, Dik Wulan, mbak Dewi, Rania Hana,** dan seluruh keluarga di Jogja.
7. **Bp. Suhdiono, Bp. Mujianto, Mas Heru, mbak Roem,** dan segenap staff Jurusan, kecuali Lingkungan Laboratorium komputasi dan staff-nya.
8. **Dedy “ forever ABG” Setiawan + anak kost GL 103, Rian, Anang, Amin “uud”din, Iwan, Fauzi, Ulum, Putu Arsa** terima kasih buat dorongan moral, material, mental, spiritual, dan lain lain terserah.
9. Para *highlander* **Khusnul, Lukman, Ichi, Zainul,** calon penerus *highlander* **Yusa , Unyil, Gito, Yosi** dan mantan *highlander* **Fiko, Liswanto.**
10. Pihak-pihak yang belum sempat penulis sebutkan satu-persatu, dengan tetap tidak mengurangi rasa hormat dan terima kasih kami.

DAFTAR ISI

HALAMAN SAMPUL

LEMBAR PENGESAHAN

LEMBAR PERSEMBAHAN

ABSTRAK

ABSTRACT

KATA PENGANTAR

UCAPAN TERIMA KASIH

DAFTAR ISI

DAFTAR GAMBAR

DAFTAR TABEL

BAB I	PENDAHULUAN		
	I.1	LATAR BELAKANG MASALAH	I-1
	I.2	DASAR PEMIKIRAN	I-3
	I.3	TUJUAN DAN MANFAAT	I-3
	I.4	METODOLOGI PENELITIAN	I-4
	I.5	BATASAN MASALAH	I-6
	I.6	SISTEMATIKA SKRIPSI	I-7
BAB II	DASAR TEORI		
	II.1	TEORI DASAR GERAK KAPAL	II-1
	II.2	COUPLED HEAVING DAN PITCHING	II-3
	II.3	GELOMBANG IRREGULER	II-24
	II.4	EFEK DINAMIS DARI GERAK KAPAL	II-39
	II.5	ADDED RESISTANCE	II-63

BAB III	PEMROGRAMAN DAN VALIDASI HASIL	
III.1	UMUM	III-1
III.2	PENYUSUNAN PROGRAM	III-2
III.3	GAMBARAN UMUM PEMANFAATAN PROGRAM	III-17
III.4	VALIDASI HASIL PEMROGRAMAN	III-20
III.5	ANALISIS HASIL VALIDASI	III-24
BAB IV	PEMODELAN OPTIMISASI DAN ANALISIS SENSITIVITAS	
IV.1	UMUM	IV-1
IV.2	KONSEP PEMODELAN	IV-1
IV.3	PEMODELAN KARAKTERISTIK ADDED RESISTANCE	IV-3
IV.4	ALTERNATIF MODEL UNTUK OPTIMISASI	IV-7
IV.5	ANALISIS SENSITIVITAS POLA OPTIMISASI	IV-7
IV.6	ANALISIS DAN PEMBAHASAN	IV-11
BAB V	KESIMPULAN DAN SARAN	
V.1	KESIMPULAN	V-1
V.2	SARAN	V-2

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

BIOGRAFI

DAFTAR GAMBAR

Gambar II.1	: Enam gerakan yang dialami kapal	II-1
Gambar II.2	: Sistem Koordinat untuk Strip Theory	II-4
Gambar II.3	: Koefisien Added Mass Gerakan Heaving	II-19
Gambar II.4	: Rasio amplitudo A untuk benda terapung 2-D pada Gerakan heaving	II-21
Gambar II.5	: Gelombang Irreguler	II-25
Gambar II.6	: Pembentukan Gelombang Irreguler	II-29
Gambar II.7	: Pembentukan Spektrum Energi dari empat gelombang	II-29
Gambar II.8	: Akhir Pembentukan spektrum energi	II-30
Gambar II.9	: Energi terbentuk secara parsial	II-31
Gambar II.10	: Significant wave height versus wind speed	II-37
Gambar II.11	: Relative Bow Motion	II-45
Gambar II.12	: Amplitudo Relative Bow Velocity	II-48
Gambar II.13	: Statical swell up dan effective board	II-51
Gambar II.14	: Dynamical Swell up	II-53
Gambar II.15	: Hubungan kecepatan relatif dengan impact pressure	II-56
Gambar III.1	: General Flowchart solution process	III-3
Gambar III.2	: Dimension Development Process	III-5
Gambar III.3	: Karakterisasi Gelombang	III-7
Gambar III.4	: Spektrum Gelombang standart ITTC	III-8
Gambar III.5	: Karakteristik Seakeeping	III-10
Gambar III.6	: Kopel heaving dan pitching	III-12
Gambar III.7	: Detail Karakteristik seakeeping	III-13
Gambar III.8	: Proses Optimisasi	III-16

Gambar III.9	: Main Form Program	III-17
Gambar III.10	: Form Dimension Development dan Solver Process	III-18
Gambar III.11	: Hasil Optimisasi	III-19
Gambar III.12	: Tampilan akhir karakteristik seakeeping	III-19
Gambar IV.1	: Pembentukan Dimensi Kapal Cb 0.6	IV-14
Gambar IV.2	: Pembentukan Dimensi Kapal Cb 0.7	IV-15
Gambar IV.3	: Pembentukan Dimensi Kapal Cb 0.8	IV-16
Gambar IV.4	: Analisis sensitivitas perubahan Added Resistance tiap Cb dengan B/T berubah	IV-17
Gambar IV.5	: Analisis sensitivitas perubahan Added Resistance Cb berubah tiap L/B	IV-18
Gambar IV.6	: Analisis sensitivitas untuk L/B berubah tiap Cb	IV-19

DAFTAR TABEL

Tabel II.1	: Formula tinggi dan Amplitudo	II-33
Tabel II.2	: Tabel awal swH versus kecepatan angin	II-37
Tabel II.3	: Most Probable Largest Wave Amplitudo	II-38
Tabel III.1	: Tabel Validasi	III-24
Tabel IV.1	: Variasi model lambung interval series 60	IV-7
Tabel IV.2	: Variasi gelombang reguler	IV-8

إقرأ باسم ربك الذي خلق ○ خلق الإنسان من علق ○
إقرأ وربك الأكرم ○ الذي علم بالقلم ○ علم الإنسان ما لم يعلم ○
(العلق ٥ - ١)

Bacalah dengan nama Tuhanmu Yang Menciptakan - Yang
menciptakan manusia dari segumpal darah - Bacalah dan
Tuhanmulah Yang Maha Pemurah - Yang Mengajar manusia
dengan perantaraan kalam - Dia mengajarkan pada manusia apa
yang tidak diketahuinya.
(QS. Al - 'Alaq 1 - 5)



Bab I

Pendahuluan



BAB I

PENDAHULUAN

I.1. LATAR BELAKANG MASALAH

Penilaian terhadap tataran keberhasilan suatu rancangan kapal pada akhirnya tampak pada tingkah laku dinamis kapal ketika beroperasi di perairan bebas dan terutama pada kemampuan untuk mempertahankan kecepatannya. Namun demikian selama ini prediksi terhadap gerakan kapal, tahanan, daya, dan beban struktur di perairan yang sebenarnya merupakan permasalahan yang kompleks, sehingga perancang kapal lebih sering melakukan pemilihan bentuk lambung dan dimensi kapal berdasarkan perhitungan dengan kondisi di air tenang yang kemudian dari keadaan tersebut dibuat asumsi tambahan untuk kondisi lingkungan laut tempat dimana kapal akan dioperasikan. Sesuai dengan prosedur konvensional tersebut, untuk menentukan daya mesin yang digunakan, biasanya hanya digunakan perhitungan di air tenang, yang kemudian untuk faktor angin dan gelombang ditambahkan nilai



sebesar 15% – 30 % dari keadaan di air tenang (*SNAME volume 81, 1973*).

Saat ini perkembangan metode komputasi modern telah memungkinkan perancang untuk melakukan perhitungan analitis untuk memprediksikan gerakan kapal. Bahkan perkembangan terbaru dari metode tersebut juga dapat digunakan untuk melakukan prediksi analitis terhadap tahanan tambahan yang terjadi ketika sebuah kapal beroperasi diperairan bebas. Metode – metode tersebut antara lain dikembangkan oleh Mauro (1960), Joosen (1966), serta Gerritsma dan Beukelman (1972). Meskipun metode- metode tersebut terbatas untuk posisi tertentu dari suatu kapal terhadap gelombang dan untuk waktu kejadian tertentu pula, namun metode tersebut dapat dijadikan langkah awal yang baik untuk memprediksikan daya kapal yang akan digunakan untuk beroperasi di perairan bergelombang.

Dengan perkembangan metode-metode tersebut maka perlu kiranya dilakukan pengembangan pada proses perencanaan kapal dengan mengintegrasikan metode analitis untuk memprediksi tahanan tambahan tersebut ke dalam proses perencanaan kapal sehingga prediksi terhadap daya mesin yang akan digunakan dalam suatu kapal dapat lebih akurat. Namun demikian karena dalam pergerakannya di perairan bergelombang juga ada fenomena lain yang dialami kapal, seperti *deck wetness*, *slamming impact*, dan lain lain, maka perlu juga dilakukan optimisasi



terhadap karakteristik gerakan kapal , sehingga dihasilkan desain kapal dengan tingkah laku dinamis yang baik dengan *minimum added resistance*.

I.2. DASAR PEMIKIRAN

Berangkat dari permasalahan yang ada perlu kiranya untuk disusun suatu kerangka kerja dengan memanfaatkan metode-metode analitis yang sudah dikembangkan tersebut untuk mengintegrasikan prediksi tahanan tambahan ke dalam proses perencanaan kapal. Sebagai langkah otomatisasi perlu juga disusun suatu perangkat lunak yang sekaligus juga melakukan proses optimisasi terhadap fenomena yang timbul akibat pergerakan kapal di gelombang.

I.3. TUJUAN DAN MANFAAT

Berdasarkan permasalahan dan dasar pemikiran diatas, maka penulis berusaha untuk menyusun suatu kerangka kerja perangkat lunak yang dapat digunakan untuk melakukan optimisasi terhadap dimensi ukuran utama kapal berdasarkan karakteristik tahanan tambahan yang dialami kapal, dengan juga memperhatikan fenomena lain yang terjadi selama kapal beroperasi di perairan bergelombang.

Lebih jauh lagi, dengan diketahuinya karakteristik tahanan tambahan yang dialami kapal, maka perancang kapal dapat lebih



akurat untuk menentukan daya mesin yang akan dipasang di kapal. Selain itu, dengan diketahuinya karakteristik lingkungan laut, terutama gelombang, maka dalam operasinya kecepatan dan arah gerakan kapal dapat lebih dikendalikan sehingga waktu tempuh terhadap jarak pelayaran dapat ditempuh dengan lebih efisien.

I.4. METODOLOGI PENELITIAN

Dalam penyusunannya, tugas akhir melalui beberapa tahap proses yang saling terkait. Adapun tahapan-tahapan tersebut dapat diuraikan secara umum sebagai berikut

1. Studi Literatur

Studi Literatur dilakukan untuk mendapatkan pedoman prosedur langkah maupun kerangka kerja yang tepat untuk menyelesaikan masalah. Beberapa literatur yang dijadikan bahan acuan awal adalah laporan-laporan riset yang pernah dilakukan sebelumnya, jurnal-jurnal, serta referensi untuk dasar teori yang akan digunakan. Untuk permasalahan ini studi yang akan dilakukan menyangkut permasalahan perencanaan kapal, karakteristik seakeeping terutama masalah tahanan tambahan, pemodelan optimisasi, dan pemrograman komputer.



2. Penyusunan Konsep dan Pemodelan Analitis

Penyusunan konsep awal disini adalah perumusan masalah, pemberian batasan, serta asumsi yang digunakan. Dari konsep awal ini kemudian disusun model matematis untuk fungsi-fungsi yang digunakan dalam proses optimisasi. Bagian ini juga menyertakan pengambilan data grafis dari series 60 untuk pembentukan lambung dan juga data grafis dari literatur yang digunakan untuk perhitungan *added mass* dan *added damping*. Selain itu juga dilakukan pembuatan *framework* untuk perhitungan tiap-tiap komponen fungsi objektif yang akan dicari variabelnya.

3. Evaluasi Pemodelan

Dari pemodelan matematis yang sudah disusun kemudian dilakukan pengecekan dengan menjalankan model dalam proses optimisasi dengan input data secara manual, kemudian dilakukan pengamatan terhadap proses yang dikarjakan.

4. Penyusunan Kerangka Kerja Perangkat Lunak

Dari langkah-langkah kerja dan fungsi yang sudah tersusun kemudian ditulis dalam bahasa pemrograman sebagai bentuk otomatisasi proses. Program komputer ditulis dengan menggunakan Visual Basic dengan memanfaatkan Solver dari Microsoft Excel untuk proses optimisasinya.



5. Evaluasi Akhir

Pada bagian ini dilakukan proses validasi antara hasil pemrograman dengan perhitungan yang sudah dilakukan sebelumnya.

1.5. BATASAN MASALAH

Untuk mengantisipasi supaya tidak terjadi pelebaran masalah dan hasil akhir yang sesuai dengan tujuan maka perlu dilakukan pembatasan masalah pada penulisan tugas akhir ini. Batasan masalah yang tercantum disini adalah batasan masalah umum, batasan masalah secara lebih mendalam akan dibahas dalam bab-bab terkait dalam tugas akhir ini. Adapun batasan masalah tersebut adalah

1. Hasil akhir dari tugas akhir ini adalah sebuah perangkat lunak yang dapat melakukan proses optimisasi hanya sampai pada tahap penentuan ukuran utama kapal dengan nilai *minimum added resistance* dan grafik prediksi karakteristik gerakan kapal yang dialami serta fenomena yang terjadi yaitu *deck wetness* dan *slamming*.
2. Interval variabel yang digunakan adalah sesuai dengan batasan yang digunakan dalam metode pembentukan lambung kapal dengan series 60.
3. Metode-metode analitis perhitungan gerak kapal yang digunakan diambil metode yang mendekati hasil dari



pendekatan dengan eksperimen. Metode metode yang akan digunakan sebagai bahan perbandingan adalah metode Mauro, Joosen, serta Gerritsma-Beukelmann.

I.6. SISTEMATIKA SKRIPSI

Bab I Pendahuluan

Bab ini berisikan tentang latar belakang masalah, dasar pemikiran, tujuan, metodologi, dan batasan masalah, serta gambaran umum dari penulisan tugas akhir ini. Agar penulisan tidak melebar dari pokok permasalahan dan hasilnya sesuai dengan tujuan yang ingin dicapai maka ditetapkan batasan masalah penulisan secara umum, yang kemudian untuk lebih detailnya akan ditentukan di dalam masing-masing bab yang terkait.

Bab II Dasar Teori

Pada bab ini akan diuraikan mengenai dasar teori yang akan digunakan untuk penyelesaian permasalahan yang ada. Disamping itu juga akan dicantumkan beberapa penelitian yang pernah dilakukan sebelumnya. Beberapa teori yang akan diuraikan antara lain adalah dasar teori gerak kapal, teori gelombang, tahanan di gelombang, dan pengaruh seakeeping dalam perencanaan kapal.



Bab III Pemrograman dan Validasi Program

Bab ini berisikan permasalahan pemrograman yang dilakukan dalam tugas akhir ini, yaitu mengenai pemrograman visual basic, integrasi solver dengan visual basic, dan pengambilan data grafis. Selain itu pada bab ini juga akan diuraikan validasi hasil program, baik terhadap pengolahan secara manual maupun terhadap hasil dari eksperimen yang pernah dilakukan sebelumnya.

Bab IV Perhitungan dan Analisis Sensitivitas

Pada bab ini akan ditampilkan hasil optimisasi dari beberapa contoh input data dan juga dapat diamati analisis sensitivitas untuk proses optimisasi yang dilakukan. Analisis sensitivitas sendiri adalah bagian proses yang akan menunjukkan pengaruh suatu variabel terhadap konvergenitas hasil dari fungsi obyektif.

Bab V Kesimpulan dan Saran

Bab ini memuat tentang kesimpulan dan saran, yang berisi tentang hasil kesimpulan dari proses dan analisis yang dilakukan dalam tugas akhir ini. Pada akhirnya hasil kesimpulan ini diharapkan dapat menjadi pertimbangan dan masukan bagi pihak-pihak yang berkepentingan untuk mengembangkan penelitian dalam tugas akhir ini secara lebih mendalam.

له معقب من بين يديه ون خلفه يحظونه من أمر الله
إن الله لا يغير ما بقوم حتى يغيروا ما بأنفسهم
وإذا أرا دالله بقوم سوءا فلا مرد له وما لهم من دونه من وال
(الرعد : ١١)

Bagi manusia ada malaikat-malaikat yang selalu mengikutinya bergiliran, dimuka dan di belakangnya, mereka menjaganya atas perintah Allah. Sesungguhnya Allah tidak mengubah keadaan suatu kaum sehingga mereka mengubah keadaan mereka sendiri, dan apabila Allah menghendaki keburukan terhadap suatu kaum, maka tak ada yang dapat menolaknya dan sekali kali tak ada pelindung bagi mereka (QS Ar-Ra'd:11) selain Dia



Bab II

Dasar Teori

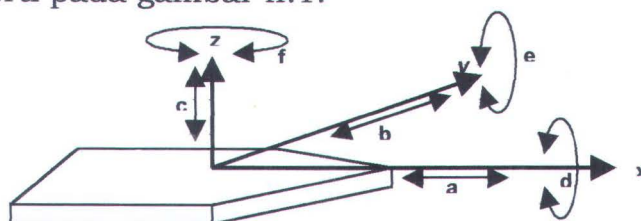
BAB II

DASAR TEORI

II.1. TEORI DASAR GERAK KAPAL

Sebuah kapal yang berlayar di perairan bebas akan mengalami gerakan yang kompleks, sehingga arah kapal dapat berubah dari arah yang sudah direncanakan. Meskipun demikian masih memungkinkan sekali untuk melakukan pengamatan terhadap karakteristik gerak kapal ketika berlayar diperairan bebas untuk dapat menjelaskan sifat alami dan menyusun bentuk teori dasar serta persamaan gerak kapal.

Ketika bergerak di perairan bebas, kapal akan mengalami enam macam gerakan dasar, yaitu *surging*, *swaying*, *heaving*, *rolling*, *pitching*, dan *yawing*. Keenam macam gerakan yang dialami kapal dapat ditunjukkan dengan pertolongan sistem koordinat sumbu seperti pada gambar II.1.



Gambar II.1. Enam gerakan yang dialami kapal



Keterangan gambar

- a : surge = gerakan kapal ke depan dan ke belakang searah dengan sumbu x
- b : sway = gerakan kapal dengan arah menyamping searah dengan sumbu y
- c : heave = gerakan kapal vertikal ke atas dan ke bawah searah sumbu z
- d : roll = gerakan angular terhadap sumbu x
- e : pitch = gerakan angular dengan sumbu putar y
- f : yaw = gerakan angular dengan sumbu putar z

Dari enam derajat kebebasan gerak kapal tersebut, hanya tiga macam yang merupakan gerakan osilasi, yaitu *heaving*, *rolling*, dan *pitching*. Gerakan gerakan tersebut terjadi akibat adanya *restoring force* atau *restoring moment* yang terjadi ketika kapal terganggu dari posisi equilibriumnya.

Untuk mempermudah dalam menyelesaikan permasalahan gerakan seringkali hanya digunakan satu derajat kebebasan, padahal dalam kenyataannya ketika kapal berlayar di perairan bebas akan mengalami enam derajat kebebasan dari enam macam gerakan kapal tersebut diatas. Namun untuk melakukan penelitian dengan enam derajat kebebasan juga merupakan hal yang sulit, oleh karena itu dalam penelitian mengenai gerakan kapal sering digunakan *coupled* dari gerakan-gerakan berikut:

1. Heave and Pitch



2. Yaw and sway
3. Yaw, sway, and roll
4. Roll ,yaw ,and pitch

Dalam tugas akhir ini digunakan alternatif kopel gerakan heaving dan pitching untuk mempermudah penyelesaian persamaan gerak kapal.

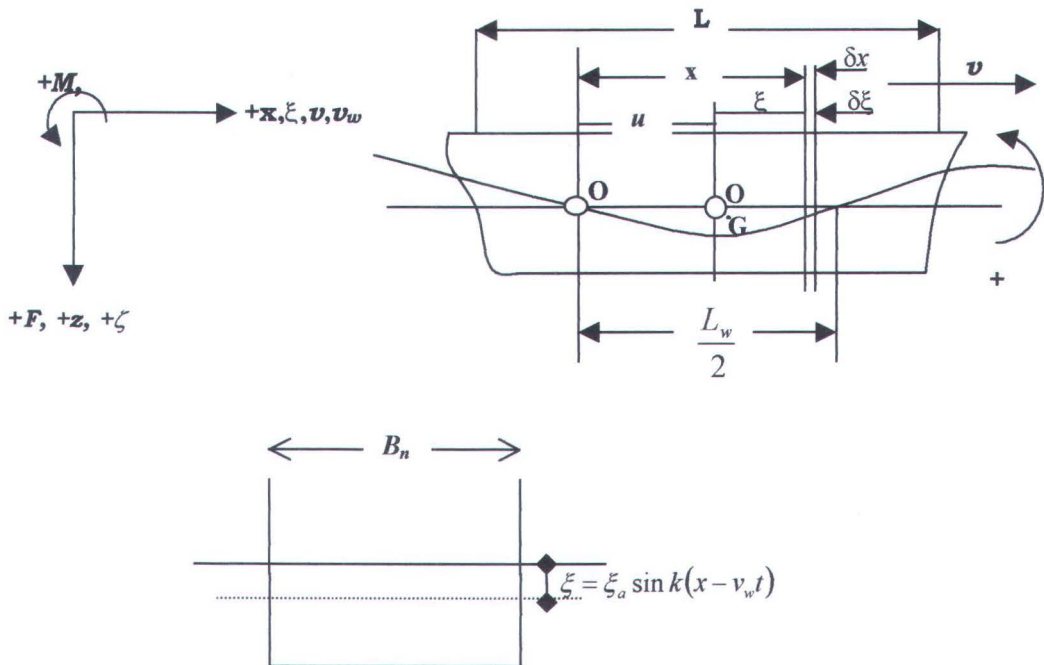
II.2. COUPLED HEAVING AND PITCHING

II.2.1 Pendekatan Dasar

Untuk mempermudah kompleksitas permasalahan gerak, perlu dilakukan pembatasan masalah dan penentuan asumsi-asumsi. Asumsi pertama yang diambil adalah bahwa kapal bergerak dalam arah melintang dari puncak gelombang. Gelombang yang digunakan adalah gelombang sinusoidal, gerak *surge*, *sway*, *yaw*, dan *roll* diabaikan.

II.2.2. Sistem Koordinat

Sebelum memasuki detail analisis untuk teori gerak kapal, perlu terlebih dahulu ditentukan sistem koordinat yang akan digunakan. Pada gambar II.2 terlihat sistem koordinat yang digunakan pada *strip theory*. Bidang horisontal terletak pada sistem sumbu x dan y , dengan z ke arah vertikal dengan harga positif ke arah bawah.



Gambar II.2. Sistem koordinat untuk strip theory

Sistem koordinat yang kedua dibentuk oleh sepasang sumbu koordinat kapal dengan titik origin, O' , yang berada pada posisi titik potong garis air muat dengan garis vertikal pada *center of gravity* (CG) kapal. Sedang koordinat memanjang untuk sistem ini adalah ξ , dengan nilai positif ke arah depan.

Dengan mengacu pada sistem koordinat yang sudah ditetapkan tersebut, maka didapatkan dasar sistem koordinat untuk menguraikan gerak kapal. Komponen heaving z menunjukkan displesemen vertikal dari gerakan CG kapal. Komponen pitching θ adalah displesemen sudut pada bidang $x-y$ terhadap titik origin dari sumbu referensi kapal. Kedudukan vertikal dari setiap titik pada posisi ξ di sepanjang garis air muat,



adalah $z - \xi \sin \theta$, dimana θ dalam radian. Kecepatan dan percepatan, baik linier maupun angular, dinyatakan dengan \dot{z} dan \ddot{z} untuk heaving, serta $\dot{\theta}$ dan $\ddot{\theta}$ untuk pitching.

II.2.3. Dasar Persamaan Gaya

Pada bagian ini akan duraikan lebih jauh mengenai analisis persamaan gaya yang digunakan pada *strip theory*. Ketika kapal berada di air tenang dalam keadaan diam, bekerja gaya-gaya sesuai dengan hukum Archimedes, yaitu gaya tekan ke atas yang dialami sama proporsinya dengan berat volume air yang dipindahkan oleh massa tersebut. Konstanta proporsionalitas dinyatakan dengan c , didapatkan dari *waterplane area* bidang potongan (*strip*) dan densitas air laut. Ketika dipindahkan dari posisi keseimbangannya oleh gaya eksternal ke arah bawah secara mendadak, momen strip akan mengubah gaya tekan ke atas sebagai akibat adanya perubahan berat, hal ini akan mengakibatkan timbulnya percepatan vertikal ke arah atas. Reaksi inersia yang berlawanan arah dengan percepatan tersebut dapat dinyatakan secara sederhana dalam bentuk

$$F = m' \ddot{z}$$

dimana \ddot{z} : percepatan heaving

m' : massa dengan kuantitas lebih besar dari massa strip sendiri.



Sedangkan *added mass* (massa tambahan), kuantitasnya tergantung pada bentuk badan kapal. Sehingga didapatkan resultan gaya inersia, yaitu

$$F = (m + a_z)\ddot{z}$$

dimana m : massa kapal

a_z : *added mass* untuk gerakan heaving

Kecepatan gerak ke arah vertikal menyebabkan munculnya reaksi gaya yang berhubungan dengan tahanan hidrodinamis kapal. Dalam hal ini dapat digunakan metode eksperimen maupun metode empiris untuk menguraikan konstanta damping b yang timbul.

Dengan melakukan analisis terhadap gaya yang bekerja pada strip, kita akan mendapatkan tiga macam gaya yang bekerja, yaitu hidrostatis, hidrodinamik, dan inersia. Sehingga kemudian persamaan menjadi

$$cz = (m + a_z)\ddot{z} + b\dot{z} \quad (2.1)$$

Dengan mengacu pada kesepakatan awal untuk z , bahwa arah ke bawah adalah positif dan arah sebaliknya adalah negatif, maka jika diberlakukan pada persamaan (2.1)

$$cz = (m + a_z)\left(-\ddot{z}\right) + b\left(-\dot{z}\right) \quad (2.2)$$

atau

$$\left(\frac{\Delta}{g} + a_z\right)\ddot{z} + b\dot{z} + cz = 0 \quad (2.3)$$

Δ : berat kapal (*displacement*)



Jika kemudian diasumsikan bahwa strip mendapatkan gangguan dari aliran gelombang ζ_a , *initial force* yang bekerja pada strip disebabkan oleh adanya perubahan level air (dengan kata lain yang bekerja adalah gaya bouyancy). Lebih jauh lagi, fluktuasi ketinggian air menyebabkan timbulnya gaya yang berkelanjutan, yang berikutnya diketahui sebagai *exciting force*. Harga gaya eksitasi (*exciting force*) ini pada saat tertentu sama dengan penjumlahan percepatan relatif, kecepatan, dan posisi antara strip dengan permukaan air, sehingga

$$m\ddot{z} = F = a_z(-\ddot{z} + \ddot{\zeta}) + b(-\dot{z} + \dot{\zeta}) + c(-z + \zeta) \quad (2.4)$$

atau

$$m\ddot{z} + a_z(\ddot{z} - \ddot{\zeta}) + b(\dot{z} - \dot{\zeta}) + c(z - \zeta) \quad (2.5)$$

dimana $\zeta, \dot{\zeta}$, dan $\ddot{\zeta}$ adalah posisi, kecepatan dan percepatan permukaan air sesaat.

Untuk selanjutnya persamaan (2.5) dapat disusun menjadi

$$(m + a_z)\ddot{z} + b\dot{z} + cz = a_z\ddot{\zeta} + b\dot{\zeta} + c\zeta \quad (2.6)$$

dimana sisi kanan merupakan gaya eksitasi, yang disalurkan pada badan kapal oleh gelombang. Gaya akibat adanya gelombang dianalisis dengan asumsi fluida ideal, yaitu dengan mengabaikan viskositas yang ada.

Untuk menguraikan gerakan kapal di gelombang, hal pertama yang harus dilakukan adalah menguraikan gerakan relatif kapal dengan gelombang. Posisi absolut vertikal setiap titik

sepanjang kapal dapat dinyatakan dengan $z - \xi \theta$. Sehingga posisi vertikal setiap titik terhadap gelombang adalah

$$z_r = z - \xi \theta - \zeta \quad (2.7)$$

untuk gerakan pitching kecil. Diferensiasi persamaan (2.7) terhadap waktu menghasilkan persamaan kecepatan relatif vertikal

$$w_r = \dot{z}_r = \dot{z} - \left(\dot{\xi} \theta + \theta \dot{\xi} \right) - \dot{\zeta} \quad (2.8)$$

Hal yang perlu diingat pada kejadian ini adalah bahwa kapal bergerak ke depan dengan kecepatan u . Sehingga

$$\frac{d\xi}{dt} = \dot{\xi} = -u$$

dan percepatan relatif vertikal adalah

$$\begin{aligned} \dot{w}_r &= \ddot{z} - \xi \ddot{\theta} - \dot{\theta}(-u) + u\dot{\theta} - \ddot{\zeta} \\ &= \ddot{z} - \xi \ddot{\theta} + 2u\dot{\theta} - \ddot{\zeta} \end{aligned} \quad (2.9)$$

II.2.4. Aplikasi Persamaan Gaya

Dengan menggunakan dasar persamaan gaya dan gerak relatif, persamaan khusus untuk total respon kapal dapat disusun (Lewis, E.V, 1967). Dalam menjelaskan teorinya, Kovin-Kroukovsky dan Jacobs membagi kapal menjadi bagian-bagian secara melintang atau strip, sepanjang badan kapal. Pada gambar II.7 bagian tersebut didefinisikan dengan pembagian lambung kapal oleh bidang vertikal dengan jumlah tak terbatas.

Kombinasi gaya yang bekerja pada strip harus berada dalam kondisi setimbang pada setiap saat. Meskipun demikian, pada setiap bagian strip dimungkinkan akan diseimbangkan oleh adanya gaya geser pada struktur kapal. Kontribusi gaya geser vertikal setiap bagian strip dinyatakan dengan $df_n/d\xi$ dan sama dengan dasar persamaan gaya, dengan memasukkan gerak relatif kapal, maka

$$\frac{\delta f_n}{\delta \xi} = -m_n \ddot{z}_n - \left(a_n \dot{w}_r + b_n w_r \right) - c_n z_r \quad (2.10)$$

dimana $m_n \ddot{z}_n$: gaya inersia akibat dengan percepatan massa strip.

$a_n \dot{w}_r$: gaya hidrodinamik akibat dengan percepatan massa tambahan

$b_n w_r$: gaya damping hidrodinamik akibat kecepatan relatif

$c_n z_r$: gaya hidrostatis akibat kedudukan relatif

Koefisien a_n , b_n , dan c_n didapatkan dari tiap bagian strip, karena ketiga variabel tersebut merupakan fungsi dari bentuk lambung kapal. Karena koefisien a_n berubah sesuai dengan bentuk potongan strip dan waktu, maka derivatif $d(a_n w_r)/dt$ harus diuraikan untuk mempermudah penyelesaian $a_n w_r$, sehingga

$$\begin{aligned} \frac{d(a_n w_r)}{dt} &= w_r \frac{da_n}{dt} + a_n \frac{dw_r}{dt} \\ &= w_r \frac{da_n}{dt} + a_n \dot{w}_r \end{aligned}$$



Kombinasi persamaan tersebut dengan persamaan gaya akan menghasilkan

$$\frac{\delta f_n}{\delta \xi} = -m_n \ddot{z}_n - a_n \dot{w}_r - \left(b_n + \frac{da_n}{dt} \right) w_r - c_n z_r \quad (2.11)$$

Dari persamaan tersebut dapat dihitung gaya setiap potongan strip di sepanjang kapal. Hal itu dapat dilakukan dengan mengintegrasikan $\delta f_n / \delta \xi$ terhadap x , hasilnya

$$\frac{\delta f_n}{\delta \xi} dx = 0$$

Satu hal yang harus diingat adalah bahwa dispersemen horisontal adalah

$$x = \xi + ut$$

dimana, ut : dispersemen jarak antara titik origin sistem koordinat dengan titik origin kapal

ξ : jarak dari origin kapal ke titik yang ditinjau oleh persamaan.

Untuk setiap waktu t , ut mempunyai nilai konstan, sehingga

$$dx = d\xi + d(ut) = d\xi$$

dan persamaan penjumlahan gaya menjadi

$$\int \frac{\delta f_n}{\delta \xi} d\xi = 0$$

atau, dengan memasukkan persamaan (2.66)

$$-\int \frac{\delta f_n}{\delta \xi} d\xi = \int m_n \ddot{z}_n d\xi + \int a_n \dot{w}_r d\xi$$

$$+ \left(\int b_n w_r d\xi - u \int \frac{da_n}{d\xi} w_r d\xi \right)$$



$$+ \int c_n z_r d\xi \quad (2.12)$$

dimana

$$\ddot{z}_n = \ddot{z} - \xi \ddot{\theta} \quad (2.13)$$

Seperti telah didefinisikan sebelumnya, bahwa $z_r = z - \xi\theta - \zeta$, selanjutnya persamaan tersebut haruslah dimodifikasi sebagai akibat adanya efek fluktuasi tekanan. Untuk menghitung efek fluktuasi tersebut maka persamaan relatif kedudukan vertikal dimodifikasi menjadi

$$z_r = z - \xi\theta - \zeta e^{-kz} \quad (2.14)$$

dimana e^{-kz} adalah faktor fluktuasi tekanan yang besarnya sama dengan tekanan gelombang setinggi sarat strip yang ditinjau. Dengan demikian didapatkan pula persamaan untuk kecepatan relatif

$$w_r = \frac{dz_r}{dt} = \dot{z} - \xi \dot{\theta} + u \dot{\theta} - \dot{\zeta} e^{-kz} \quad (2.15)$$

dan percepatan relatif

$$\dot{w}_r = \frac{dw_r}{dt} = \ddot{z} - \xi \ddot{\theta} + 2u \dot{\theta} - \ddot{\zeta} e^{-kz} \quad (2.16)$$

II.2.5. Persamaan Gerak

Substitusi persamaan untuk $\ddot{z}_r, \dot{w}_r,$ dan w_r pada integrasi persamaan gaya menghasilkan persamaan yang sangat kompleks dan sulit. Untuk mempermudah permasalahan ini maka keadaan tersebut dapat dibagi menjadi persamaan gerak absolut kapal dan



gerak gelombang. Dengan menempatkan seluruh kondisi absolut kapal di sebelah kiri persamaan dan kondisi gelombang di sebelah kanan, didapatkan kondisi yang merupakan analog untuk kondisi *uncoupled motion* seperti bagian sebelumnya. Dengan kata lain, pada sisi kiri persamaan menunjukkan respon natural dari displasemen kapal di air tenang. Pada sisi kanan persamaan menunjukkan disusun oleh karakteristik gelombang yang merupakan fungsi gaya.

Substitusi persamaan untuk $\dot{z}_r, \dot{w}_r, \dot{w}_r,$ dan \dot{z}_r dari (2.14), (2.15), (2.16), dan (2.13) didapatkan

$$\begin{aligned} & \int m_n \left(\ddot{z} - \xi \ddot{\theta} \right) d\xi \\ & + \int a_n \left(\ddot{z} - \xi \ddot{\theta} + 2u\dot{\theta} - \zeta e^{-kz} \right) d\xi \\ & + \left[\int b_n \left(\dot{z} - \xi \dot{\theta} + u\theta - \zeta e^{-kz} \right) d\xi \right. \\ & \quad \left. + \int \frac{da_n}{d\xi} \left(\dot{z} - \xi \dot{\theta} + u\theta - \zeta e^{-kz} \right) d\xi \right] \\ & + \int c_n \left(z - \xi \theta - \zeta e^{-kz} \right) d\xi = 0 \end{aligned} \tag{2.17}$$

Dengan menyusun ulang seluruh bagian karakteristik gelombang dan menyamakan dengan nol, maka didapatkan

$$\begin{aligned} & m_n \left(\ddot{z} - \xi \ddot{\theta} \right) \\ & + a_n \left(\ddot{z} - \xi \ddot{\theta} + 2u\dot{\theta} \right) + b_n \left(\dot{z} - \xi \dot{\theta} + u\theta \right) \\ & - \frac{da_n}{d\xi} \left(\dot{z} - \xi \dot{\theta} + u\theta \right) + c_n \left(z - \xi \theta \right) \end{aligned}$$



$$\begin{aligned}
 &= \ddot{\xi} e^{-kz} a_n + \dot{\xi} e^{-kz} b_n \\
 &\quad - u \frac{da_n}{d\xi} \dot{\xi} e^{-kz} + \zeta e^{-kz} c_n
 \end{aligned}
 \tag{2.18}$$

Ekspresi di sebelah kanan persamaan tersebut menunjukkan gaya eksitasi setiap strip terhadap gelombang dF / dx .

Dengan asumsi bahwa gelombang yang masuk adalah reguler dan harmonik, maka ζ adalah

$$\zeta = \zeta_a \sin k(x - V_w t)$$

Dari persamaan gelombang tersebut kemudian dikombinasikan dengan persamaan

$$x = \xi + ut$$

maka didapatkan

$$\zeta = \zeta_a \sin k(\xi + ut - V_w t)$$

atau

$$\zeta = \zeta_a \sin k[\xi + (u - V_w)t]$$

Sedangkan diketahui bahwa $-k(u - V_w)$ adalah frekuensi encounter, ω_e , sehingga

$$\zeta = \zeta_a \sin(k\xi - \omega_e t) \tag{2.19}$$

$$\dot{\zeta} = -\zeta_a \omega_e \cos(k\xi - \omega_e t) \tag{2.20}$$

$$\ddot{\zeta} = -\zeta_a \omega_e^2 \sin(k\xi - \omega_e t) \tag{2.21}$$

Substitusi dari ζ , $\dot{\zeta}$, dan $\ddot{\zeta}$ ke persamaan (2.73) menghasilkan

$$m_n \ddot{z} + a_n \dot{z} + b_n z - u \frac{da_n}{d\xi} \dot{z} + c_n z$$



$$\begin{aligned}
 & -m_n \ddot{\xi} \dot{\theta} - a_n \dot{\xi} \ddot{\theta} + a_n 2u \dot{\theta} - b_n \dot{\xi} \dot{\theta} + b_n u \theta \\
 & + u \frac{da_n}{d\xi} \xi \dot{\theta} - u^2 \frac{da_n}{d\xi} \theta + c_n \xi \dot{\theta} \\
 = & (m_n + a_n) \ddot{z} + b_n \dot{z} - u \frac{da_n}{d\xi} \dot{z} + c_n \dot{z} \\
 & - m_n \ddot{\xi} \ddot{\theta} - a_n \dot{\xi} \ddot{\theta} \\
 & + a_n 2u \dot{\theta} - b_n \dot{\xi} \dot{\theta} + u \frac{da_n}{d\xi} \xi \dot{\theta} \\
 & + b_n u \theta - u^2 \frac{da_n}{d\xi} \theta - c_n \xi \dot{\theta} \\
 = & -\zeta_a \omega_e^2 \sin(k\xi - \omega_e t) e^{-kz} a_n \\
 & - \zeta_a \omega_e \cos(k\xi - \omega_e t) e^{-kz} \left(b_n - u \frac{da_n}{d\xi} \right) d\xi \quad (2.22) \\
 & + \zeta_a \sin(k\xi - \omega_e t) e^{-kz} c_n d\xi
 \end{aligned}$$

Dengan mengintegrasikan persamaan sepanjang kapal, didapatkan penyelesaian umum persamaan gerak

$$(m + a_z) \ddot{z} + b \dot{z} + cz + d \ddot{\theta} + e \dot{\theta} + h \theta = F(t) \quad (2.23)$$

dimana $m = \int m_n d\xi$

$$a_z = \int a_n d\xi$$

$$b = \int b_n d\xi$$

dengan asumsi $u \int \left(\frac{da_n}{d\xi} \right) d\xi = 0$, maka

$$c = \int c_n d\xi$$

$$d = - \int a_n \xi d\xi$$



jika $\int m_n \xi d\xi = 0$ (dengan kata lain momen massa total terhadap CG bernilai nol), maka

$$\begin{aligned} e &= -\int b_n \xi d\xi + 2u \int a_n d\xi + u \int \frac{da_n}{d\xi} \xi d\xi \\ &= -\int b_n \xi d\xi + ua_z \end{aligned}$$

dengan $\int \xi \left(\frac{da_n}{d\xi} \right) d\xi = \int \xi da_n = -a_z$

$$\begin{aligned} h &= -\int c_n \xi d\xi + u \int b_n d\xi \\ &= -\int c_n \xi d\xi + ub \end{aligned}$$

jika $u^2 \int \left(\frac{da_n}{d\xi} \right) d\xi = 0$, dan

$$\begin{aligned} F(t) &= \int \frac{dF}{dx} dx = \zeta_a e^{-kz} \int (-\omega_e^2 a_2 + c_n) \sin(k\xi - \omega_e t) d\xi \\ &\quad - \zeta_a e^{-kz} \omega_e \int \left(b_n - u \frac{da_n}{d\xi} \right) \cos(k\xi - \omega_e t) d\xi \end{aligned}$$

Jika gaya eksitasi F sinusoidal secara alami, maka dapat dinyatakan dalam bentuk persamaan umum

$$\begin{aligned} F &= F_1 \cos \omega_e t + F_2 \sin \omega_e t \\ &= F_o \cos(\omega_e t + \sigma) \end{aligned} \tag{2.24}$$

dimana F_o adalah amplitudo gaya eksitasi, yaitu

$$F_o = \sqrt{F_1^2 + F_2^2}$$

dan σ adalah fase gaya eksitasi relatif terhadap gerak gelombang

$$\sigma = -\tan^{-1} \left(\frac{F_2}{F_1} \right)$$

F_o dan σ didapatkan dari penyelesaian fungsi gaya, di mana F_1 dan F_2 didapatkan dari

$$F_1 = \int \frac{dF_1}{dx} dx$$



dimana

$$\begin{aligned} \frac{dF_1}{dx} &= \zeta_a e^{-kz} (-\omega_e^2 a_n + c_n) \sin k\xi \\ &+ \zeta_a e^{-kz} \omega_e \left(b_n - u \frac{da_n}{d\xi} \right) \cos k\xi \end{aligned} \quad (2.25)$$

dengan cara yang sama

$$F_2 = \int \frac{dF_2}{dx} dx$$

dimana

$$\begin{aligned} \frac{dF_2}{dx} &= \zeta_a e^{-kz} (-\omega_e^2 a_n + c_n) \cos k\xi \\ &+ \zeta_a e^{-kz} \omega_e \left(b_n - u \frac{da_n}{d\xi} \right) \sin k\xi \end{aligned} \quad (2.26)$$

Persamaan (2.23) merupakan persamaan gerak pertama yang memadukan seluruh komponen gaya yang bekerja pada kapal. Persamaan gerak kedua merupakan persamaan gerak anguler yang mengacu pada persamaan pertama, yaitu

$$(I_{yy} + A_{yy})\ddot{\theta} + B\dot{\theta} + C\theta + D\ddot{z} + E\dot{z} + Hz = M(t) \quad (2.27)$$

yang menunjukkan momen gaya yang bekerja pada kapal.

Koefisien momen yang ada diuraikan sebagai berikut

$$A_{yy} = \int a_n \xi^2 d\xi$$

$$B = \int b_n \xi^2 d\xi$$

jika diketahui $2u \int a_n \xi d\xi = -u \int \left(\frac{da_n}{d\xi} \right) \xi^2 d\xi,$

$$C = \int c_n \xi^2 d\xi - uE$$

$$D = d$$

$$E = -\int b_n \xi d\xi - ua_z$$

$$H = -\int c_n \xi d\xi$$

$$M = M_o \cos(\omega_e t + \tau) = \int \frac{dF}{d\xi} \xi d\xi$$

dimana M_o adalah amplitudo momen eksitasi, yang didapatkan dari

$$M_o = \sqrt{M_1^2 + M_2^2}$$

dan τ adalah fase momen eksitasi relatif terhadap gerak gelombang, yang besarnya

$$\tau = \tan^{-1} \left(\frac{M_2}{M_1} \right)$$

$$M_1 = \int \frac{dM_1}{dx} d\xi$$

dimana $\frac{dM_1}{dx} = \xi \left(\frac{dF_1}{dx} \right)$, dan

$$M_2 = \int \frac{dM_2}{dx} d\xi$$

dimana $\frac{dM_2}{dx} = \xi \left(\frac{dF_2}{dx} \right)$.

Catatan : Koefisien-koefisien yang ada pada persamaan (2.23) dan (2.27) tergantung pada geometri lambung kapal, kecepatan kapal, dan frekuensi encounter. Untuk mendapatkan hasil koefisien hidrodinamis yang lebih akurat, penyelesaian untuk b , e , dan B harus diselesaikan tanpa menggunakan asumsi yang ada.

Linearitas dari persamaan (2.23) dan (2.27) tergantung dari amplitudo gerakan yang proporsional linier terhadap amplitudo fungsi gaya.



Untuk *added mass*, a_n , yang digunakan dalam penyelesaian persamaan tersebut berlaku pengertian bahwa koefisien massa tambahan (*added mass*), C , dapat didefinisikan dengan massa tambah untuk setiap section kapal dengan lebar B_n dan sarat T_n , dibagi dengan massa tambah dari luasan setengah lingkaran dengan diameter B_n (Lewis, F.M, 1929), sehingga dapat dituliskan

$$C = \frac{\text{added mass untuk setiap section kapal dengan lebar } B_n \text{ dan sarat } T_n}{\text{added mass dari luasan setengah lingkaran dengan diameter } B_n}$$

dengan setengah dari *added mass* untuk setiap segmen lingkaran dengan diameter B_n adalah

$$\frac{1}{2} \rho \pi r^2 = \frac{\rho \pi B_n^2}{8} \quad (2.28)$$

dimana, $B_n = 2r$

maka,

$$a_n = C \frac{\rho \pi B_n^2}{8} \quad (2.29)$$

Koefisien C untuk *Lewis-form sections* didapatkan dengan membaca grafik seperti yang ditunjukkan oleh gambar II.3 sebagai fungsi dari rasio B/T dan koefisien luas area. Total *added mass* didapatkan dengan mengintegrasikan persamaan (2.8) dengan

batas

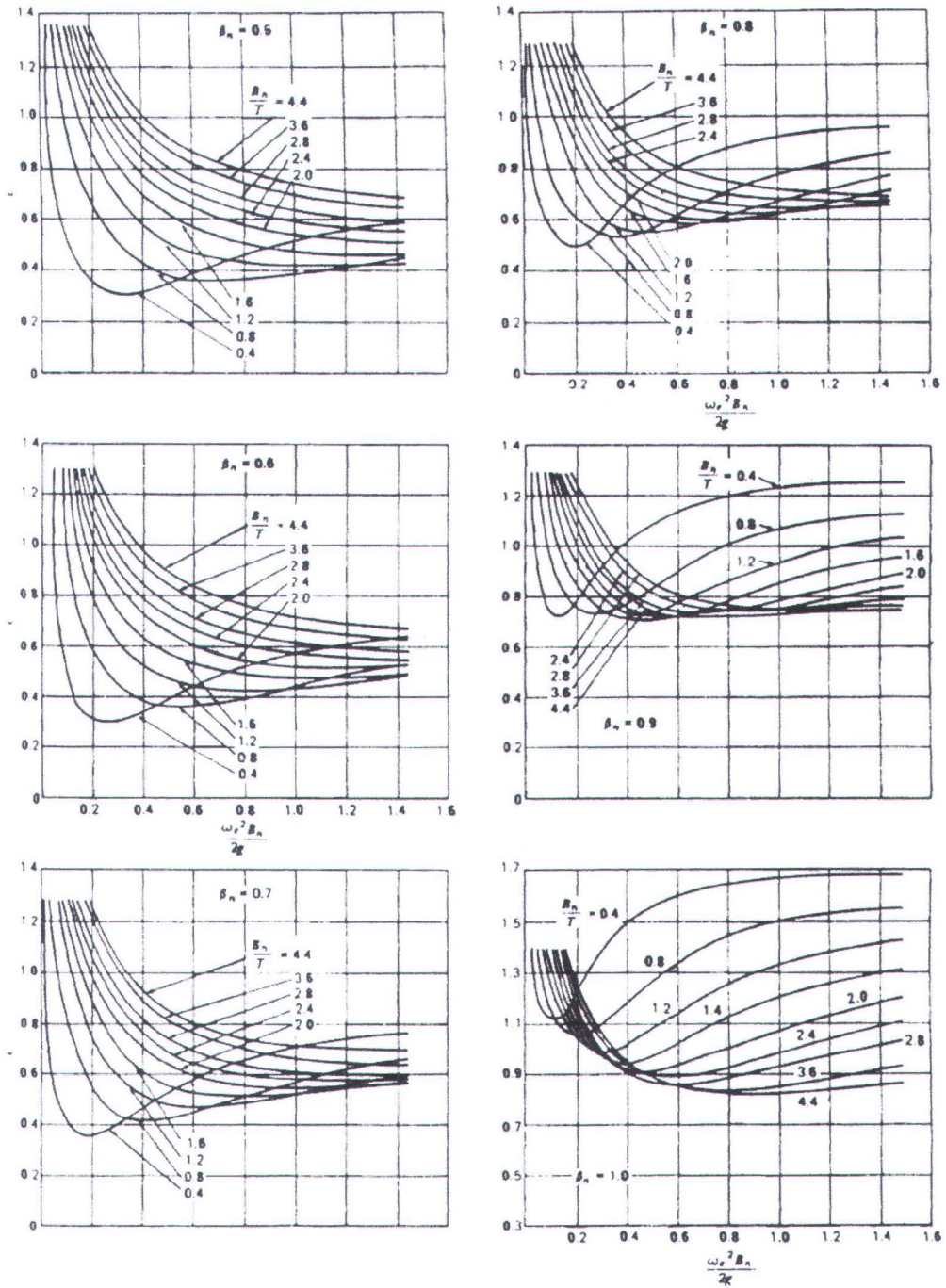
$$-L/2 \leq x \leq L/2$$

sehingga didapat

$$a_z = \int_{-L/2}^{L/2} a_n \, dx \quad (2.30)$$

Dengan menggunakan harga a_n dan $B_n = 2y(x)$, dimana $y(x)$ adalah setengah lebar *waterline* maka didapatkan

$$a_z = \rho \frac{\pi}{2} \int_{-L/2}^{L/2} C y^2(x) \, dx \quad (2.31)$$



Gambar II.3. Koefisien added mass gerakan heaving

Secara umum dapat dikatakan bahwa koefisien massa tambahan (*added mass*) untuk gerakan heaving bertambah sesuai dengan besarnya koefisien blok kapal (C_b) dan rasio B/L (Bhattacharyya, 1978).

Seperti halnya dalam permasalahan *added mass*, koefisien damping b dapat dihitung dengan menggunakan *strip theory*. Karena timbulnya damping pada gerakan heaving secara umum disebabkan adanya gelombang yang terjadi karena gerakan heaving, maka koefisien damping untuk setiap unit panjang secara langsung berhubungan dengan amplitudo gelombang. Dari HSVA Report 1171 (*Grim, 1959*), koefisien damping per unit panjang, b_n , ditunjukkan oleh

$$b_n = \frac{\rho g^2 \bar{A}}{\omega_e^3} \quad (2.32)$$

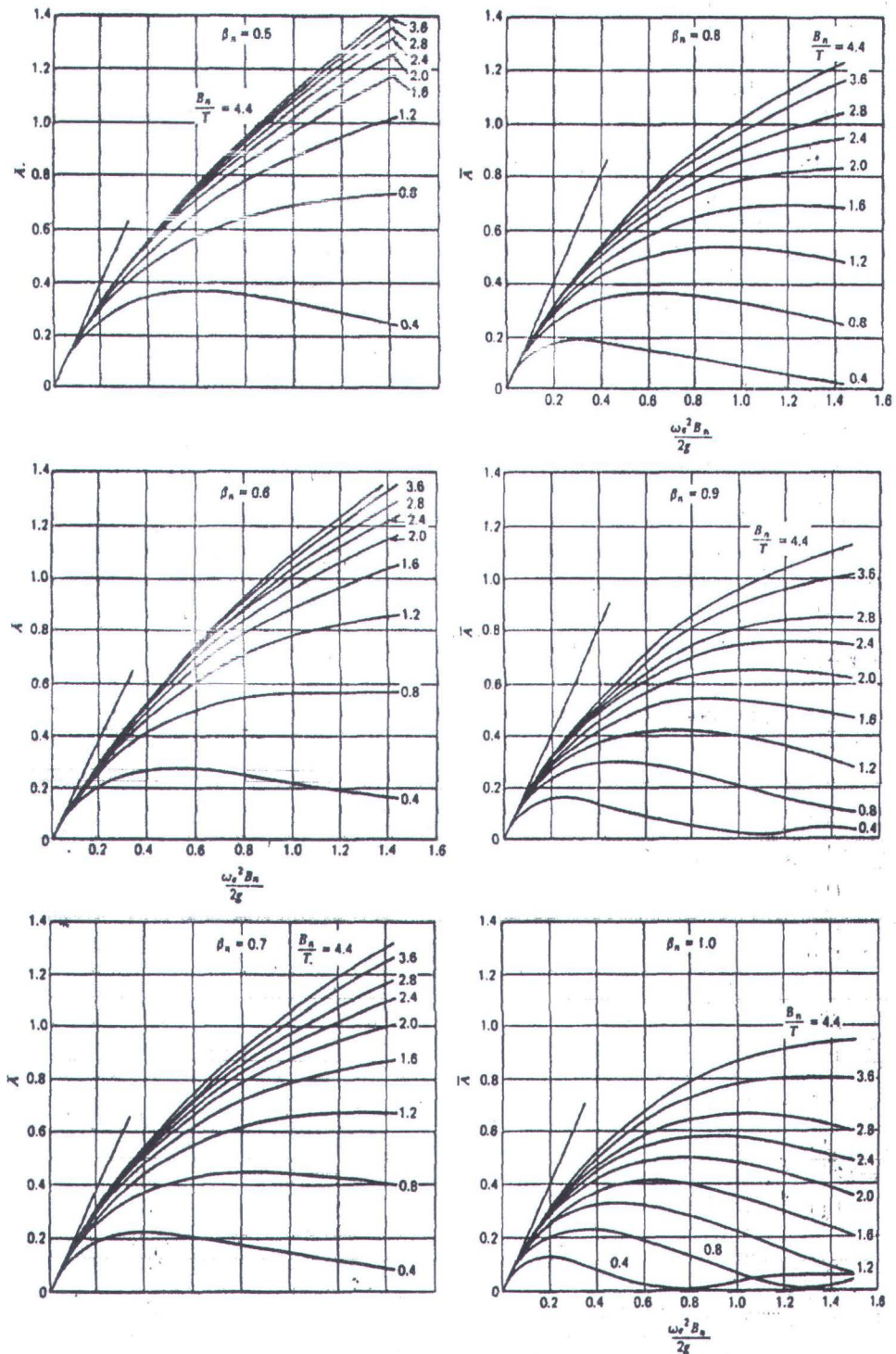
dimana ω_e adalah frekuensi gelombang radiasi (yang dalam hal ini adalah frekuensi encounter), dan

$$\bar{A} = \frac{\text{Amplitudo of the Radiated Waves}}{\text{Amplitudo of the Heaving Motion}} = \frac{\bar{\zeta}_a}{z_a} \quad (2.33)$$

Rasio amplitudo \bar{A} bisa didapatkan dari gambar II.4; dan hasil akhir untuk total *damping coefficient* didapatkan dengan mengintegrasikan b_n sepanjang badan kapal, yaitu

$$b = \int_{-L/2}^{L/2} b_n dx \quad (2.34)$$

Persamaan gerak kopel heaving dan pitching di air tenang dapat diselesaikan dengan menyamakan sisi kanan dari persamaan (2.78) dan (2.82) dengan nol dan mengasumsikan koefisien-koefisien dari a_z sampai h dan A_{yy} sampai H sama untuk keadaan di air tenang maupun di gelombang.



Gambar II.4. Rasio amplitudo \bar{A} untuk benda terapung 2-D pada gerakan heaving, β_n koefisien luasan section, B_n lebar section terkait, T adalah sarat.

II.2.6. Penyelesaian Persamaan Gerak

Pada bagian ini dapat disusun penyelesaian akhir dari permasalahan gerak dengan *strip theory*. Penurunan terhadap waktu dari respektif displasemen akan memberikan penyelesaian persamaan heaving dan pitching.

Karena dalam penyelesaian persamaan gerak didalamnya termasuk amplitudo dan fase, maka bentuk terbaik untuk menyelesaikannya adalah dalam bentuk bilangan kompleks, sehingga

$$\bar{F} = F_o e^{i\sigma} \quad (2.35)$$

$$\bar{M} = M_o e^{i\tau} \quad (2.36)$$

Jika P , Q , R , dan S adalah bentuk kompleks dari koefisien-koefisien yang berhubungan dalam persamaan gerak, maka dari (2.78)

$$P = -(m + a_z)\omega^2 + iB\omega + c \quad (2.37)$$

$$Q = -d\omega^2 + ie\omega + h$$

dan dari (2.82)

$$S = -(I_{yy} + A_{yy})\omega^2 + iB\omega + c \quad (2.38)$$

$$R = -D\omega^2 + iE\omega + H$$

Jika \bar{z} menunjukkan seluruh turunan z dan $\bar{\theta}$ menunjukkan seluruh turunan dari θ , maka persamaan gerak dapat dituliskan secara umum

$$\text{Persamaan pertama (heave)} : P \bar{z} + Q \bar{\theta} = \bar{F} \quad (2.39)$$

$$\text{Persamaan kedua (pitch)} : S \bar{\theta} + R \bar{z} = \bar{M} \quad (2.40)$$



dimana \bar{z} dan $\bar{\theta}$ adalah amplitudo gerak dalam bentuk kompleks, yaitu

$$\bar{z} = z_a e^{i\delta}$$

$$\bar{\theta} = \theta_a e^{i\varepsilon}$$

Penyelesaian untuk \bar{z} dan $\bar{\theta}$

$$\bar{z} = \frac{\bar{F} - Q\bar{\theta}}{P} \quad (2.41)$$

$$\bar{\theta} = \frac{\bar{F} - P\bar{z}}{Q} \quad (2.42)$$

dan dalam persamaan pitching

$$\bar{z} = \frac{\bar{M} - S\bar{\theta}}{R} \quad (2.43)$$

$$\bar{\theta} = \frac{\bar{M} - R\bar{z}}{S} \quad (2.44)$$

Adanya kopel alami heaving dan pitching ditunjukkan oleh masuknya komponen z dalam persamaan θ dan begitu pula sebaliknya.

Dari masing-masing persamaan respektif terhadap \bar{z} dan $\bar{\theta}$ akan menghasilkan

$$\frac{F - Q\bar{\theta}}{P} = \frac{\bar{M} - S\bar{\theta}}{R}$$

$$\frac{\bar{F} - P\bar{z}}{Q} = \frac{\bar{M} - R\bar{z}}{S}$$

sehingga

$$\bar{z} = \frac{\bar{M}Q - \bar{F}S}{QR - PS} \quad (2.45)$$

$$\bar{\theta} = \frac{\bar{F}R - \bar{M}P}{QR - PS} \quad (2.46)$$



Dengan mendapatkan amplitudo dan *phase lag* untuk \bar{z} dan $\bar{\theta}$, dapat ditunjukkan bentuk penyelesaian akhir untuk dua gerakan, yaitu

$$\bar{z} = z_a e^{i\delta} = z_a (\cos \delta + i \sin \delta) \quad (2.47)$$

$$\bar{\theta} = \theta_a e^{i\varepsilon} = \theta_a (\cos \varepsilon + i \sin \varepsilon) \quad (2.48)$$

dimana z_a dan δ adalah amplitudo dan fase heaving, θ_a dan ε adalah amplitudo dan fase untuk gerakan pitching.

II.3. Gelombang Irreguler

II.3.1. Klasifikasi Gelombang

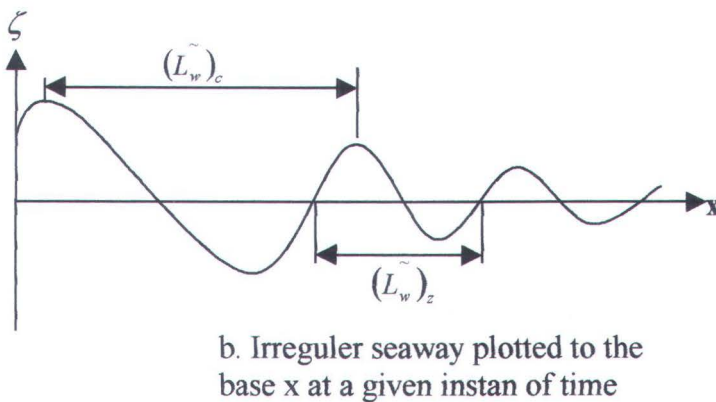
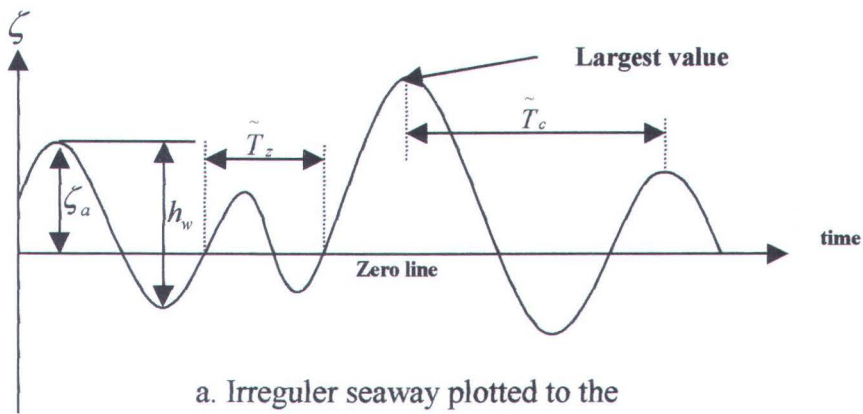
Pada pembahasan sebelumnya, kapal diasumsikan bergerak di sepanjang gelombang reguler, sedangkan pada keadaan sebenarnya permukaan gelombang tidaklah bersifat reguler.

Meskipun permukaan gelombang yang sebenarnya sangat tidak teratur, para ahli oceanografi telah membuat analisis statistik mengenai variasi tinggi gelombang dalam periodisasi waktu berdasarkan energi yang ditimbulkan.

Permukaan gelombang sangatlah bervariasi dari waktu ke waktu dan dari perpindahan posisinya, serta tergantung pada kecepatan angin atau biasa disebut *Beaufort number*, yang merupakan rata-rata perkiraan atau dari data laporan kecepatan angin. Metode ini pertama kali diperkenalkan oleh Admiral Beaufort dari Angkatan Laut Inggris. Dengan melakukan observasi terhadap permukaan gelombang secara terpisah, didapatkan



beaufort number yang dalam hal ini merupakan kecepatan angin. Gambaran mengenai kondisi laut dapat diamati dalam lampiran. Dalam permasalahan gelombang sinusoidal, amplitudo, periode, dan lain lain, dapat dikatakan sama untuk penyelesaiannya, tetapi untuk gelombang irreguler properti-properti tersebut berubah sesuai waktu dan posisi. Pada gelombang irreguler, gangguan permukaan gelombang pada setiap titik posisi sebagai fungsi waktu ditunjukkan oleh gambar II.5, dengan notasi yang digunakan



Gambar II.5. *Gelombang Irreguler*



$\tilde{\zeta}$: elevasi gelombang (displasemen sesaat dari permukaan gelombang dari posisi tenang atau *reference line*).

$\tilde{\zeta}_a$: amplitudo gelombang sebenarnya (jarak puncak gelombang dari posisi tenang datar atau *reference line*).

\tilde{h}_w : tinggi gelombang sebenarnya (jarak vertikal antara puncak dengan lembah gelombang)

\tilde{T}_z : periode zero-point amplitudo (waktu yang dibutuhkan untuk terjadinya dua kali gerakan ke depan memotong *reference line* / saat amplitudo bernilai nol).

\tilde{T}_c : periode sebenarnya (waktu yang dibutuhkan untuk terjadinya dua puncak gelombang).

Elevasi gelombang irreguler diplotkan dengan axis x pada waktu tertentu pada gambar II.8b, dimana

$(\tilde{L}_w)_z$: panjang gelombang antara dua keadaan dimana memiliki amplitudo nol dan gelombang saat bergerak ke atas memotong *reference line*.

$(\tilde{L}_w)_c$: panjang gelombang antara dua puncak gelombang.

Rata-rata tinggi gelombang (*average wave height*) gelombang irreguler pada waktu dan tempat tertentu adalah rata-rata aritmetik dari tinggi seluruh gelombang pada pengamatan tertentu, kecuali untuk gelombang dengan tinggi di bawah satu feet. Karakteristik tinggi gelombang (*characteristic wave height*) atau *significant wave height*, $(h)_{1/3}$, suatu gelombang irreguler pada



tempat dan waktu tertentu adalah rata-rata aritmetik tinggi dari sepertiga gelombang tertinggi dari data record yang diberikan, dimana gelombang dengan tinggi di bawah satu feet tidak dimasukkan. Dengan prinsip yang sama pula, rata-rata 10% tinggi gelombang $(h)_{1/10}$, adalah rata-rata tinggi dari sepersepuluh gelombang dari data observasi yang sama.

II.3.2. Spektrum Gelombang

Pattern untuk gelombang irreguler dapat disusun dari sejumlah gelombang sinusoidal yang masing-masing mempunyai panjang gelombang yang berbeda, yang kemudian disuperposisikan. Hasilnya berupa gelombang dengan *definite pattern* baik untuk tinggi gelombang, panjang gelombang, ataupun untuk periode gelombangnya. Keadaan ini dapat diamati pada gambar II.6., dengan mengambil contoh empat macam gelombang reguler sinusoidal, yang masing-masing memiliki panjang gelombang, tinggi, dan periode yang berbeda. Kombinasi dari empat gelombang tersebut adalah berupa gelombang dengan bentuk yang sangat tidak teratur (*extremely irreguler*) pada properti panjang dan tinggi gelombangnya.

Untuk mendapatkan bentuk irreguler, selain dengan melakukan superposisi dari beberapa gelombang reguler sinusoidal, perlu juga diperhatikan bahwa tidak terjadi perulangan bentuk dari waktu ke waktu. Sehingga hanya ada satu cara untuk



menguraikan irregularitas gelombang yaitu dengan jalan menguraikan total energi yang dihasilkan, langkah ini dilakukan dengan jalan menjumlahkan energi masing-masing gelombang reguler dengan superposisi.

Energi yang dihasilkan oleh gelombang reguler dinyatakan dengan

$$\frac{1}{2} \rho g \zeta_a^2$$

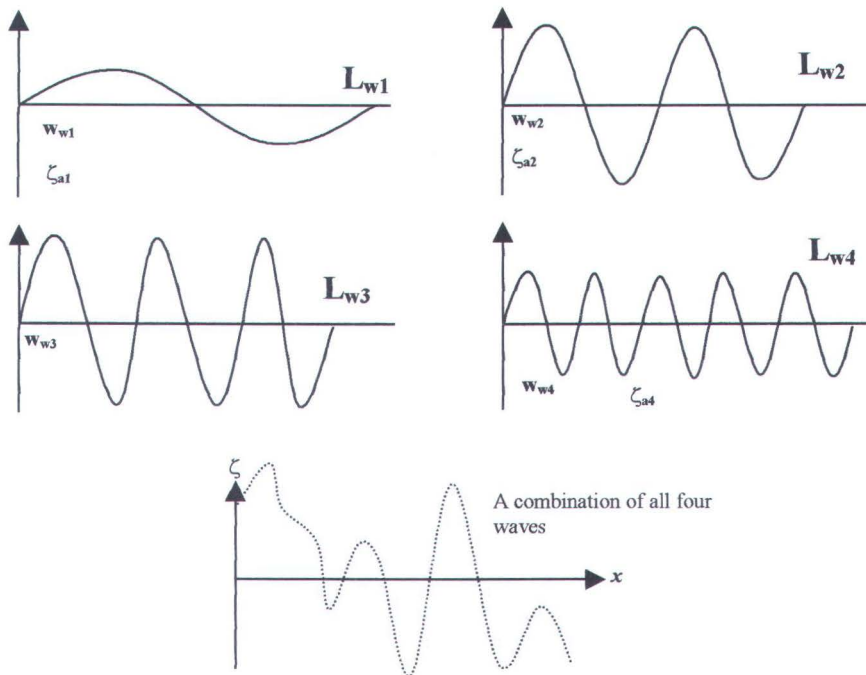
per satuan luas permukaan gelombang. Sehingga total energi per satuan luas untuk seruruh gelombang reguler pembentuk gelombang irreguler dengan ampilitudo $\zeta_{a1}, \zeta_{a2}, \dots, \zeta_{an}$ dinyatakan dengan

$$E_T = \frac{1}{2} \rho g (\zeta_{a1}^2 + \zeta_{a2}^2 + \dots + \zeta_{an}^2) \quad (2.49)$$

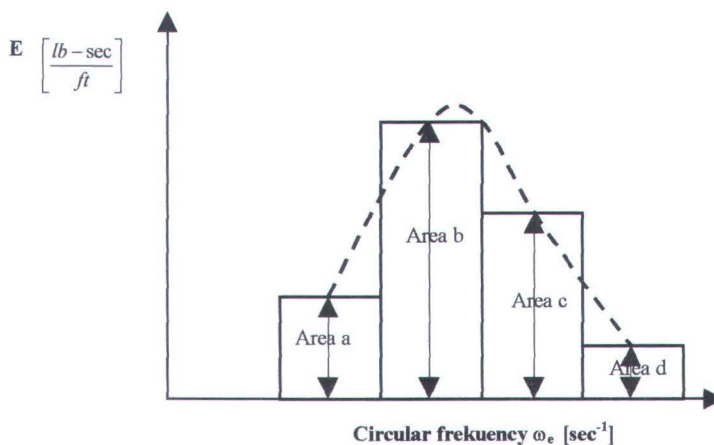
Dengan cara tersebut untuk setiap gelombang irreguler dapat diuraikan menjadi suatu bentuk grafik distribusi energi dengan frekuensi (atau panjang gelombang atau periode gelombang) untuk berbagai variasi komponen gelombang. Distribusi frekuensi gelombang selanjutnya disebut sebagai spektrum energi (*energy spectrum*), dan dapat diamati dalam contoh gambar II.7.

Total luasan di bawah grafik spektrum energi merupakan total energi dari seluruh komponen gelombang. Sebagai catatan disini bahwa energy dari masing-masing frekuensi gelombang dihubungkan untuk mendapatkan kurva spektrum dengan

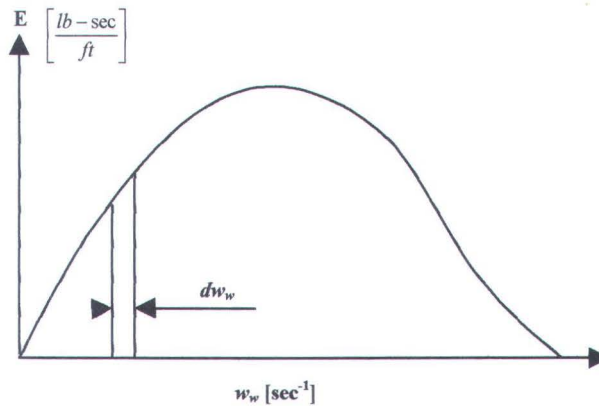
hubungan perubahan energi terhadap perubahan frekuensi sebesar δw_w . Jika keadaan gelombang laut yang sebenarnya disusun dari seluruh frekuensi dan pattern gelombang dengan tidak mengalami perulangan, spektrum energi akan berupa kurva kontinu yang berkesinambungan, yang terdiri dari gelombang reguler dengan panjang gelombang yang berbeda-beda.



Gambar II.6. Pembentukan gelombang irregular



Gambar II.7. Pembentukan spektrum energi dari empat gelombang

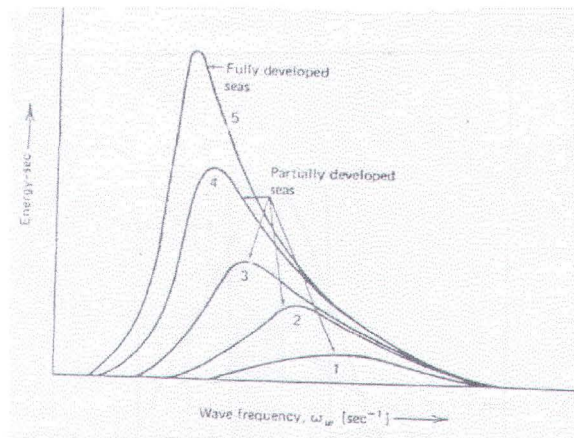


Gambar II.8. Akhir pembentukan spektrum energi

Spektrum energi akhir pada gambar II.8 mewakili kondisi untuk interval frekuensi gelombang yang ada dengan bandwidth $\delta\omega_w$. Pada saat yang sama, energi dari tiap-tiap komponen gelombang juga berkurang, meskipun demikian total energi gelombang tetap sama. Sehingga kurva kontinyu antara $\omega_w = 0$ dan $\omega_w = \infty$ menunjukkan spektrum energi gelombang.

Perlu ditambahkan bahwa untuk pengaruh kecepatan angin sesaat hanya mengakibatkan terjadinya gelombang pendek, panjang gelombang yang panjang akan terjadi jika angin bekerja pada gelombang secara terus menerus. Sehingga dapat ditarik kesimpulan bahwa *fully developed seas* merupakan kondisi yang stabil dan tidak terpengaruh oleh kontinuitas hembusan angin. Sehingga proses terbentuknya spektrum energi juga secara kontinyu berubah sampai terbentuk *fully developed seas*. Proses pembentukan gelombang yang terjadi dapat digambarkan seperti gambar II.9. Gambar tersebut juga menunjukkan bahwa selama terjadi pembentukan gelombang panjang, harga maksimum

spektrum energi bergerak ke arah frekuensi gelombang yang lebih kecil.



Gambar II.9. Energi terbentuk secara parsial

Selanjutnya dapat diamati pula bahwa dari formula (2.49) dan dari luasan di bawah kurva pada gambar II.8 akan menghasilkan nilai yang sama. Sehingga sekarang, pembentukan spektrum seperti halnya pada gambar II.8, dan dengan formula (2.49), dapat dibuat figure yang berbeda dengan ordinat yang menunjukkan

$$\frac{1}{2}(\zeta_{a1}^2 + \zeta_{a2}^2 + \dots + \zeta_{an}^2) \quad (2.50)$$

dengan keterangan bahwa faktor ρg dikeluarkan dan disusun kurva baru dengan m_0 adalah luasan di bawah kurva, yang jika kemudian dikalikan dengan ρg akan menghasilkan energi. Bentuk kurva ini selanjutnya disebut spektrum gelombang (*wave spectrum*), dengan ordinat yang digunakan adalah spektrum densitas energi gelombang, $S_\zeta(\omega_w)$.





II.3.3. Prediksi Gelombang Irreguler

Untuk menggunakan prinsip spektrum energi dalam rekayasa teknik, kuantitas spektrum gelombang untuk daerah perairan yang berbeda dan iklim yang berbeda haruslah terlebih dahulu diketahui.

Meskipun terjadi perbedaan antara beberapa formula spektrum gelombang, ordinat kurva secara umum dinyatakan dengan spektrum densitas energi gelombang, yang digunakan untuk menunjukkan energi total seluruh komponen gelombang. Jika energi komponen gelombang secara langsung berhubungan kuadrat amplitudo, densitas spektral dapat mengacu langsung pada kuadrat amplitudo gelombang. Lebih jauh lagi, *significant height* didapatkan dari hubungan

$$(h_w)_{1/3} = 4.0\sqrt{area} \quad \text{atau} \quad (h_w)_{1/3} = 4.0\sqrt{m_o}$$

dimana

$$m_o = \int_0^{\infty} S_{\zeta}(\omega_w) d\omega_w \quad (2.51)$$

adalah luasan di bawah kurva spektrum gelombang. Faktor 4.0 didapatkan dari pendekatan matematis dengan distribusi Rayleigh.

Dan

$$S_{\zeta}(\omega_w) / \delta\omega_w = \frac{1}{2}(\zeta_{a1}^2 + \zeta_{a2}^2 + \dots + \zeta_{an}^2) \quad (2.52)$$

untuk nilai partikular *bandwidth*, $\delta\omega_w$.

Informasi yang bisa diambil dari suatu spektrum gelombang

- a. Interval frekuensi yang merupakan bagian penting untuk kontribusi energi terhadap gelombang.



- b. Frekuensi pada saat energi maksimum disuplai.
- c. Perubahan energi pada tiap frekuensi.
- d. Adanya *swell* pada frekuensi rendah.

Dari suatu spektrum gelombang maka dapat diketahui amplitudo atau tinggi gelombang dengan menggunakan formula-formula yang ada pada tabel II.1. (*Bhattacharrya, 1978*) berikut ini

Tabel II.1. Formula tinggi dan amplitudo gelombang

	Amplitudo	Tinggi
Rata-rata	$1.25\sqrt{m_o}$	$2.50\sqrt{m_o}$
$(h_w)_{1/3}$	$2.00\sqrt{m_o}$	$4.00\sqrt{m_o}$
$(h_w)_{1/10}$	$2.55\sqrt{m_o}$	$5.09\sqrt{m_o}$
$(h_w)_{1/100}$	$3.34\sqrt{m_o}$	$6.67\sqrt{m_o}$

Luasan di bawah kurva spektrum gelombang, seperti telah disebutkan sebelumnya adalah

$$\int_0^{\infty} S_{\zeta}(\omega_w) d\omega_w = m_o \quad (2.53)$$

dimana m_o adalah elevasi gelombang dikuadratkan, atau $\sqrt{m_o}$ adalah akar kuadrat elevasi gelombang irreguler. *Root mean square* elevasi gelombang pada *zero line* diukur pada Δt konstan deviasi puncak (rata-rata amplitudo), tetapi memberikan rata-rata statistik deviasi dari *zero line*,

$$m_o = \left(\frac{1}{n}\right) \sum \zeta_n^2$$

dimana n adalah banyak pengukuran yang dilakukan. Dalam hal ini Δt kurang dari setengah interval minimum antara dua puncak gelombang dan n dalam jumlah besar pengamatan. Sehingga luasan di bawah kurva spektrum gelombang menghasilkan rata-rata kuadrat deviasi, dan disini harga **rms** response gelombang irreguler adalah $\sqrt{m_o}$. Demikian juga, jika histogram tinggi gelombang mengikuti pola distribusi Rayleigh, rata-rata kuadrat tinggi gelombang dihubungkan dengan luasan di bawah kurva spektrum gelombang mengikuti persamaan

$$\bar{H}^2 = 8m_o$$

Seperti halnya formula pada tabel II.1. yang diperoleh untuk distribusi Rayleigh histogram tinggi gelombang, oceanograf juga merekomendasikan adanya faktor koreksi (CF), yaitu

$$CF = (1 - \varepsilon^2)^{1/2} \quad (2.54)$$

yang dikalikan pada persamaan yang digunakan dari tabel II.1, untuk ketelitian spektrum. Parameter ketelitian (*broadness parameter*) didapatkan dari *even moment* spektrum dan ditunjukkan dengan formula

$$\varepsilon^2 = \frac{m_o m_4 - m_2^2}{m_o m_4} \quad (2.55)$$

dengan momen luasan dibawah spektrum

$$m_n = \int_0^{\infty} \omega_w^n S_{\zeta}(\omega_w) d\omega_w \quad (2.56)$$



dengan n integer, dan m_n momen ke n area di bawah kurva spektrum.

Secara umum, faktor-faktor yang perlu diketahui untuk mendapatkan bentuk spektrum gelombang adalah

- Kecepatan angin (parameter yang sangat significant)
- Durasi angin
- Fetch*
- Lokasi badai lain yang akan dilalui swell.

Persamaan rata-rata banyaknya kejadian *zero up-crossing* per detik, N_o , dapat dinyatakan dengan

$$N_o = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{m_2}{m_0}} \quad (2.57)$$

dan rata-rata periode *zero up-crossing*, \bar{T}_z , ditunjukkan oleh

$$\bar{T}_z = \frac{1}{N_o} = 2\pi \sqrt{\frac{m_0}{m_2}} \quad (2.58)$$

juga periode antara dua puncak gelombang

$$\bar{T}_c = 2\pi \sqrt{\frac{m_2}{m_4}}$$

Karakteristik lain yang penting dari gelombang irreguler adalah *average apparent wavelength*, $(\bar{L}_w)_z$, yang dinyatakan dengan

$$(\bar{L}_w)_z = 2\pi g \sqrt{\frac{m_0}{m_4}} \quad (2.59)$$



II.3.4. Standar Spektrum Gelombang

Jika pada suatu saat, kondisi tidak memungkinkan untuk dilakukannya pengambilan data gelombang, maka ITTC (*International Towing Tank Conference*) merekomendasikan formula untuk memprediksikan spektrum gelombang, dengan langkah sebagai berikut

a.

$$S(\omega_w) = \frac{A}{\omega_w^5} e^{-B/\omega_w^4} \quad (\text{cm}^2\text{-detik}) \quad (2.60)$$

dimana

ω_w : *circular frekuensi* (rad)

$$A = 8.10 \times 10^{-3} g^2$$

g : percepatan gravitasi

$$B = 3.11 \times 10^4 / (H)_{1/3}^2$$

$H_{1/3}$: significant wave height (cm)

atau

$$B = 33.56 / (H)_{1/3}^2$$

jika $S(\omega_w)$ dalam $\text{ft}^2\text{-detik}$, dengan $H_{1/3}$ dalam ft.

b. Jika dari informasi statistik didapatkan periode gelombang dan significant wave height, maka

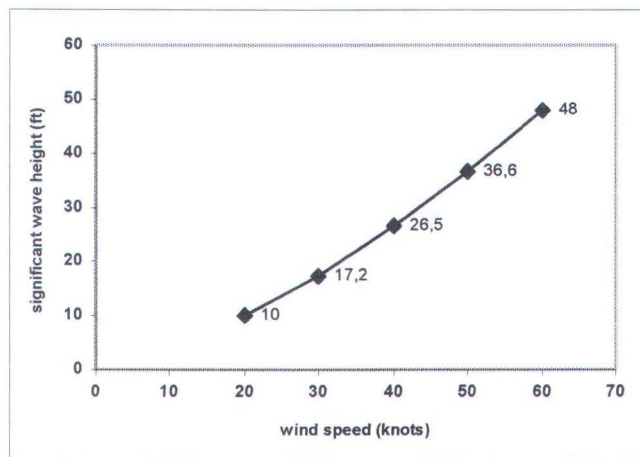
$$A = 173 (H)_{1/3}^2 / T_1^4$$

$$B = 169 / T_1^4$$

dimana significant wave period,

$$T_1 = 2\pi \sqrt{\frac{m_o}{m_1}}$$

c. Dari penelitian yang telah dilakukan, terdapat hubungan antara kecepatan angin dengan *significant wave height*, meskipun demikian pendekatan hubungan ini hanya dapat digunakan jika kecepatan angin diketahui. Hubungan antara kecepatan angin dengan significant wave height dapat diamati pada grafik yang ditunjukkan oleh gambar II.10. (Bhattacharrya, 1978) sebagai hasil observasi ITTC , dengan koordinat awal seperti ditunjukkan oleh tabel II.2.



Gambar II.10. *Significant wave height versus wind speed*

Tabel II.2. *Koordinat awal swh versus kecepatan angin*

Wind Speed	Significant Wave Height
Knots	ft
20	10
30	17.2
40	26.5
50	36.6
60	48.0

II.3.5. Gelombang dengan Amplitudo Besar

Nilai yang lebih akurat untuk gelombang yang memiliki amplitudo besar dari n data gelombang didapatkan melalui proses statistik, dengan menggunakan persamaan (2.109) (*Higgins-Longuet, 1952*), yaitu

$$\sqrt{2 \log_e n} \times \sqrt{m_o} \times CF \quad (2.61)$$

dimana n adalah total banyaknya data observasi, m_o area di bawah spektrum gelombang, dan CF adalah faktor koreksi.

Untuk perbedaan nilai n , tabel II.3 (*Bhattacharrya, 1978*) menunjukkan hasil yang telah dilakukan sebelumnya dengan menggunakan formula (2.109).

Tabel II.3. *Most Probable Largest Wave Amplitudo*

Number of Wave	Most Probable Largest Wave Amplitudo
1	$1 \times \sqrt{m_o} \times CF$
10	$2.24 \times \sqrt{m_o} \times CF$
100	$3.07 \times \sqrt{m_o} \times CF$
1000	$3.74 \times \sqrt{m_o} \times CF$
10000	$4.30 \times \sqrt{m_o} \times CF$
100000	$4.81 \times \sqrt{m_o} \times CF$



II.4. Efek Dinamis dari Gerak Kapal

Dalam mempelajari efek dinamis yang terjadi akibat pergerakan kapal di perairan bergelombang, ada beberapa hal penting yang harus diperhatikan, yaitu

- a. Frekuensi kejadian *deck wetness* dan *slamming*
- b. Nilai *impact pressure* yang disebabkan oleh adanya *slamming*.
- c. *Freeboard* dan *deck wetness*
- d. Banyaknya air yang naik ke atas geladak
- e. Timbulnya tahanan tambahan di daerah yang bergelombang

Untuk kejadian yang tersebut pada point d hanya bisa dilakukan dengan metode eksperimen mengingat belum adanya metode analitis untuk menghitung jumlah air yang masuk ke atas geladak.

II.4.1. Gerak Vertikal

Dengan mengacu pada gambar 7.1, gerak vertikal dari setiap titik sepanjang kapal di gelombang reguler adalah merupakan gerak harmonis. Ekspresi matematis gerakan vertikal CG ditunjukkan oleh

$$Z = Z_a \sin \omega_e t \quad (2.62)$$

Atau

$$Z_\xi = (Z_\xi)_a \sin \omega_e t \quad (2.63)$$

untuk setiap titik dengan jarak ξ dari CG kapal.



Jika kapal diasumsikan bergerak di gelombang reguler, *bow motion* (Z_b), ditunjukkan oleh

$$Z_b = z + \xi \sin \theta \quad (2.64)$$

$$\approx z + \xi \theta$$

(untuk sudut pitch sangat kecil)

dimana ξ adalah jarak horisontal dari titik yang ditinjau terhadap CG kapal, sudut pitching dalam derajat dan diasumsikan sangat kecil, dan z adalah displasemen gerakan heaving.

Dalam gelombang reguler, gerakan heaving dan pitching ditunjukkan dengan persamaan

$$z = z_a \cos(\omega_e t + \varepsilon_z) \quad (2.65)$$

$$\theta = \theta_a \cos(\omega_e t + \varepsilon_\theta) \quad (2.66)$$

dimana,

ε_z : sudut fase gerakan heaving relatif terhadap gerak gelombang

ε_θ : sudut fase gerakan pitching relatif terhadap gerak gelombang

sehingga gerak bow z_b diselesaikan dengan

$$z_b = z + \xi \theta$$

$$= z_a \cos(\omega_e t + \varepsilon_z) + \xi \theta_a \cos(\omega_e t + \varepsilon_\theta) \quad (2.67)$$

$$= (z_b)_a \cos(\omega_e t + \varepsilon_b)$$

dimana,

$$(z_b)_a = \sqrt{z_a^2 + (\xi \theta_a)^2 + 2z_a \xi \theta_a \cos(\varepsilon_z - \varepsilon_\theta)} \quad (2.68)$$

dan

$$\tan \varepsilon_b = \frac{z_a \sin \varepsilon_z + \xi \theta_a \sin \varepsilon_\theta}{z_a \cos \varepsilon_z + \xi \theta_a \cos \varepsilon_\theta} \quad (2.69)$$

Jika arah kecepatan kapal berlawanan arah dengan arah gelombang ($\mu=180^\circ$), dan sistem koordinat searah dengan arah kecepatan kapal, elevasi gelombang diekspresikan dengan persamaan

$$\zeta = \zeta_a \cos(k_e x - \omega_e t) \quad (2.70)$$

dimana,

k_e : angka gelombang efektif

$$k_e = \frac{2\pi}{(L_w)_e}$$

$$(L_w)_e = \frac{L_w}{\cos \mu}$$

sedangkan elevasi air pada bow pada waktu tertentu ditunjukkan oleh persamaan

$$\zeta_b = \zeta_a \cos(k_e \xi - \omega_e t) \quad (2.71)$$

II.4.2. Kecepatan Vertikal

Kecepatan vertikal di gelombang reguler juga merupakan gerakan harmonis. Jika gerak kapal di gelombang reguler ditunjukkan oleh

$$z_\xi = (z_\xi)_a \sin \omega_e t \quad (2.72)$$

maka kecepatan vertikal adalah

$$\dot{z}_\xi = \omega_e (z_\xi)_a \cos \omega_e t \quad (2.73)$$

Amplitudo kecepatan vertikal \dot{z}_ξ pada setiap titik di sepanjang kapal ditunjukkan dengan persamaan

$$\left(\dot{z}_\xi\right)_a^2 = \left(\dot{z}\right)_a^2 + \xi^2 \left(\dot{\theta}\right)_a^2 + 2\left(\dot{z}\right)_a \left(\dot{\theta}\right)_a \xi \cos \varepsilon \quad (2.74)$$

dimana,

$\left(\dot{z}\right)_a$: Amplitudo kecepatan heaving pada CG (m/dt)

$\left(\dot{\theta}\right)_a$: Amplitudo kecepatan pitching pada CG ($^\circ$ /dt)

ξ : jarak titik yang ditinjau terhadap CG (m)

ε : sudut fase heave sesudah pitch (derajat)

Untuk permasalahan yang terjadi di gelombang reguler, jika amplitudo gerak heaving atau gerak vertikal pada setiap titik diketahui, maka amplitudo untuk kecepatan yang sesuai didapatkan dengan persamaan

$$\left(\dot{z}\right)_a = \omega_e z_a$$

Atau
$$\left(\dot{z}_\xi\right)_a = \omega_e \left(\dot{z}_\xi\right)_a \quad (2.75)$$

Kecepatan vertikal bow dalam hubungannya dengan permukaan air diketahui sebagai *relative bow velocity* yang dilambangkan dengan \dot{S}_a .

II.4.3. Percepatan Vertikal

Seperti halnya kecepatan vertikal, percepatan vertikal setiap posisi titik sepanjang badan kapal ditunjukkan dengan persamaan sebagai berikut

$$\ddot{z} = \ddot{z}_a \sin \omega_e t \quad (2.76)$$

pada CG kapal, atau

$$\ddot{z}_\xi = (\ddot{z}_\xi)_a \sin \omega_e t$$

untuk setiap titik dengan jarak ξ dari CG kapal.

Amplitudo percepatan vertikal $(\ddot{z}_\xi)_a$ untuk setiap titik sepanjang kapal ditunjukkan dengan

$$(\ddot{z}_\xi)_a^2 = (\ddot{z})_a^2 + \xi^2 (\ddot{\theta})_a^2 + 2(\ddot{z})_a (\ddot{\theta})_a \xi \cos \varepsilon \quad (2.77)$$

dimana

$(\ddot{z})_a$: amplitudo percepatan gerakan heaving pada CG

$(\ddot{\theta})_a$: amplitudo percepatan gerakan pitching pada CG

Untuk kasus gerakan di gelombang reguler, jika amplitudo gerak vertikal pada setiap titik diketahui, amplitudo percepatan yang sesuai didapatkan dengan

$$(\ddot{z})_a = \omega_e^2 (z_a) \quad (2.78)$$

atau

$$(\ddot{z}_\xi)_a = \omega_e^2 (z_\xi)_a$$

Percepatan vertikal dalam pada bow dalam hubungannya dengan permukaan air selanjutnya disebut *relative bow acceleration* dan dilambangkan dengan \ddot{S}_a .

Untuk aplikasi praktis diasumsikan bahwa amplitudo gerak, kecepatan, dan percepatan (*double*) mengikuti distribusi Rayleigh, yaitu

$$P\{\theta_a \geq \theta_a^*\} = e^{-[(\theta_a^*)^2 / 2m_{\theta}]} \quad (2.79)$$

dimana $m_{o\theta}$ adalah varian sudut pitch, yaitu luasan di bawah response spektrum gerakan pitching.

II.4.4. Relative Bow Motion

Salah satu bagian penting dalam mengamati kualitas seakeeping adalah dengan mempelajari relative bow motion yang dialami kapal, karena ada dua fenomena turunan sebagai akibat adanya relative bow motion tersebut, yaitu

1. *Foredeck immersion*, penyebab naiknya air ke geladak.
2. *Forefoot emergence*, sebagai indikasi tak tentu dari kemungkinan terjadinya *slamming*.

Timbul dan tenggelamnya bow (relative bow motion) di gelombang dapat ditunjukkan dengan jarak vertikal antara permukaan gelombang di setiap posisi pada bow dengan pada saat air tenang. Relative bow motion biasanya didefinisikan sebagai gerak dari FP.

Jika dari gerak heaving dan pitching diketahui amplitudo dan beda fase dengan permukaan gelombang, gerakan relative dapat diselesaikan dengan persamaan

$$S_{\xi} = z_{\xi} - \zeta_{\xi} \quad (2.80)$$

dimana

S_{ξ} : gerak relative titik yang ditinjau dengan jarak ξ dari CG dalam arah x.

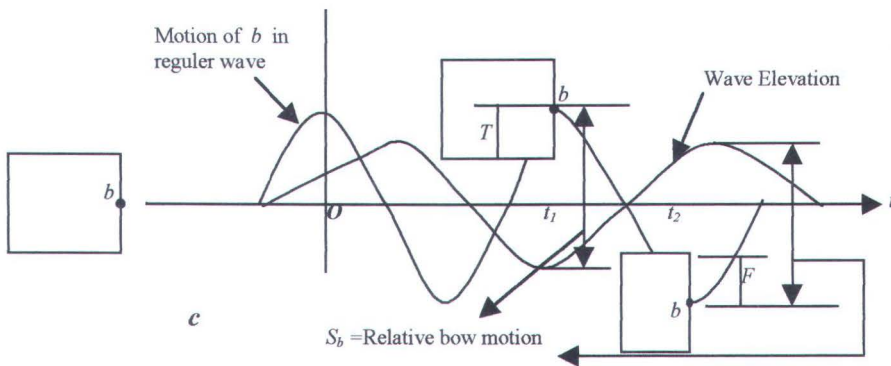
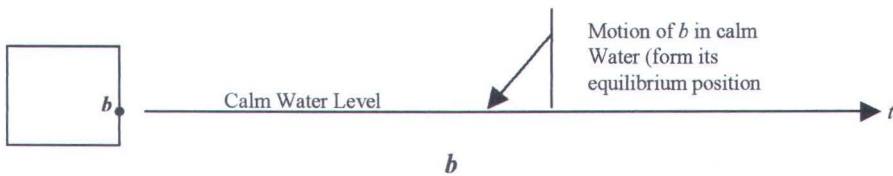
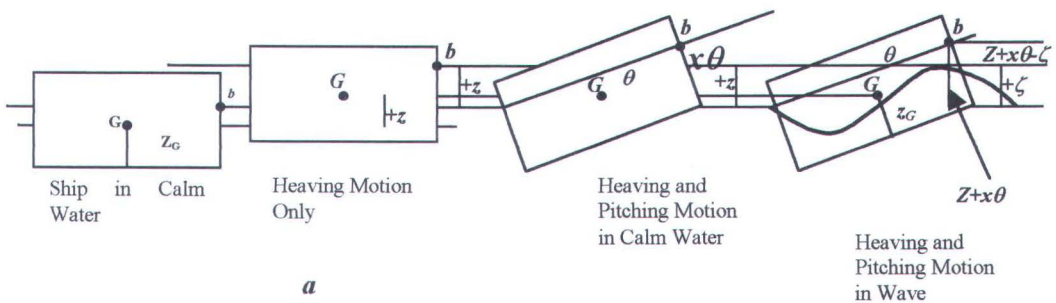
z_{ξ} : gerak vertikal titik ($z + \xi\theta$)

ζ_ξ : gerak gelombang pada titik yang ditinjau

sedangkan posisi bow terhadap gelombang diselesaikan dengan

$$S_b = z_b - \zeta_b \quad (2.81)$$

jika $z_b > \zeta_b$, maka $S_b > 0$. Jadi ketika elevasi bow lebih tinggi dari elevasi gelombang, titik b akan berada di atas air, demikian juga sebaliknya.



Keterangan :

- Pada t_1 b terangkat, jika gerak titik b relative terhadap elevasi gelombang lebih besar dari T
- Pada t_2 geladak terbenam, jika titik b relative terhadap elevasi gelombang lebih besar dari freeboard F

Gambar II.11. Relative Bow Motion

Oleh karena itu, jika terbenamnya titik b melebihi freeboard, geladak kapal akan terbenam juga ke dalam air. Dengan menggunakan persamaan untuk ζ_b dan Z_b , didapatkan

$$\begin{aligned} S_b &= z_b - \zeta_b \\ &= (z_b)_a \cos(\omega_e t + \varepsilon_b) - \zeta_a \cos(k_e \xi - \omega_e t) \\ &= (z_b)_a \cos(\omega_e t + \varepsilon_b) - \zeta_a \cos\left(\frac{2\pi\xi}{L_w} + \omega_e t\right) \end{aligned} \quad (2.82)$$

Untuk head sea condition

atau

$$S_b = (S_b)_a \cos(\omega_e t + \varepsilon_s)$$

dimana

$$(S_b)_a = \sqrt{(z_b)_a^2 + (\zeta_a)^2 - 2(z_b)_a \zeta_a \cos(k_e \xi - \varepsilon_b)} \quad (2.83)$$

dan

$$\tan \varepsilon_s = \frac{\zeta_a \sin(k_e \xi) - (z_b)_a \sin \varepsilon_b}{\zeta_a \sin(k_e \xi) - (z_b)_a \cos \varepsilon_b} \quad (2.84)$$

II.4.5. Relative Bow Velocity

Kecepatan gerak vertikal kapal merupakan permasalahan yang penting dalam mengamati efek dinamis gerakan kapal. Dari formula untuk elevasi air pada posisi bow dengan perubahan waktu sesaat

$$\zeta_b = \zeta_a \cos(k_e \xi - \omega_e t) \quad (2.85)$$

didapatkan

$$\zeta_b = \zeta_a \cos\left(\frac{2\pi\xi}{L_e} - \omega_e t\right) \quad (2.86)$$

dengan $\mu = 180^\circ$ dan kecepatan gerak vertikal gelombang untuk kondisi heading ditunjukkan oleh persamaan

$$\begin{aligned}\dot{\zeta}_b &= +\omega_e \zeta_a \sin\left(\frac{2\pi\xi}{L_e} - \omega_e t\right) \\ &= -\omega_e \zeta_a \sin\left(\omega_e t + \frac{2\pi\xi}{L_e}\right)\end{aligned}\quad (2.87)$$

dimana

$\dot{\zeta}$: kecepatan gelombang

ω_w : frekuensi gelombang

dengan mengambil asumsi bahwa $\dot{\zeta}_b$ positif ketika kapal bergerak ke atas. Jadi resultan kecepatan bow terhadap gerakan heaving dan pitching

$$\begin{aligned}\bar{z}_b &= z + \xi\dot{\theta} \\ &= -(z_b)_a \omega_e \sin(\omega_e t + \varepsilon_b)\end{aligned}\quad (2.88)$$

Pada formula (2.136) \dot{z}_b juga bernilai positif ketika kapal mengalami gerakan vertikal ke atas. Kecepatan relative bow terhadap komponen gelombang merupakan penurunan waktu terhadap persamaan (2.82)

$$\dot{S}_b = \dot{z}_b - \dot{\zeta}_b \quad (2.89)$$

dan untuk kondisi *head sea*

$$\begin{aligned}\dot{S} &= -(z_b)_a \omega_e \sin(\omega_e t + \varepsilon_b) + \omega_e \zeta_a \sin\left(\omega_e t + \frac{2\pi\xi}{L_w}\right) \\ &= (\dot{S}_b)_a \cos(\omega_e t + \varepsilon_s)\end{aligned}\quad (2.90)$$

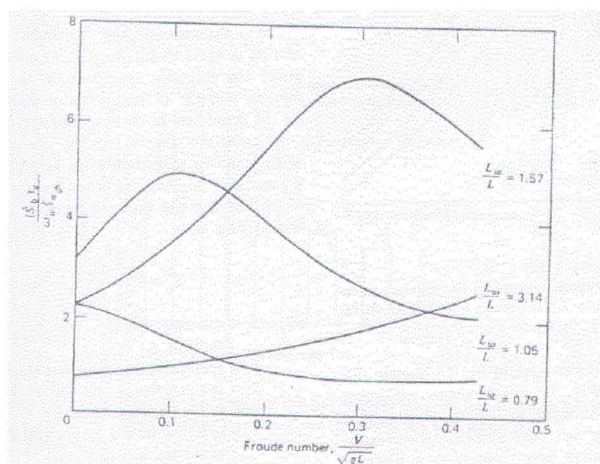
dimana

$$(\dot{S}_b)_a = \sqrt{\omega_e^2 (z_b)_a^2 + \omega_e^2 \zeta_a^2 - 2(z_b)_a \zeta_a \omega_e^2 \cos\left(\frac{2\pi\xi}{L_w} - \varepsilon_b\right)} \quad (2.91)$$

dan

$$\tan \varepsilon_s = \frac{(z_b)_a \omega_e \cos \varepsilon_b - \omega_e \zeta_a \cos[(2\pi / L_w) \xi]}{-(z_b)_a \omega_e \sin \varepsilon_b - \omega_e \zeta_a \sin[(2\pi / L_w) \xi]} \quad (2.92)$$

Dalam proses desain seringkali menjadi pertanyaan seberapa besar seharusnya relative bow velocity tersebut. Untuk menjawab pertanyaan tersebut dapat diamati gambar II.12 (*Bhattacharyya, 1978*), yang menunjukkan maksimum relative bow velocity (nondimensional), yang didasarkan pada formula yang sudah diuraikan sebelumnya. Maksimum *relative bow velocity* sebagai fungsi nondimensional speed parameter (Froude Number).



Gambar II.12. Amplitudo relative bow velocity

II.4.6. Relative Bow Motion di Gelombang Irreguler

Response spektrum untuk gerak relatif bow di gelombang irreguler dapat diselesaikan seperti dalam kasus heaving dan pitching, yaitu dengan mengalikan ordinat spektrum encounter

gelombang dengan RAO frekuensi encounter yang sama, dimana RAO bisa didapatkan dari pengujian ataupun perhitungan analitis di gelombang reguler.

Amplitudo significant relative bow motion sama dengan $2.0\sqrt{m_o}$. CF, dimana m_{os} adalah area di bawah kurva response spektrum untuk gerak relative bow dan CF adalah faktor koreksi terhadap ketelitian kurva response spektrum.

Dengan menggunakan metode spektral, densitas spektral gerak relatif bow di gelombang irreguler, S_s , dapat dihitung dari densitas spektral gerak heaving dan pitching di gelombang irreguler yaitu

$$S_s = S_z + \frac{\pi L}{L_w} S_\theta - S_\zeta \quad (2.93)$$

dimana

S_s : Spektral density gerak relatif bow

S_ζ : Spektral density dari spektrum gelombang

S_z : Spektral density gerak heaving

S_θ : Spektral density gerak pitching

Amplitudo kecepatan relatif vertikal ditunjukkan oleh

$$(\dot{S})_a = \omega_e S_a \quad (2.94)$$

Oleh karena itu untuk perhitungan kecepatan gerak vertikal di gelombang reguler, ordinat kurva untuk RAO gerak relatif vertikal dengan mengalikan ordinat setiap frekuensi dengan kuadrat nilai tiap bagian frekuensi yaitu

$$RAO(\text{kecepatan}) = RAO(\text{gerak})\omega_e^2 \quad (2.95)$$

dimana kedua RAO tersebut masing-masing merupakan fungsi ω_e . Akan tetapi untuk lebih mudahnya, dapat dilakukan modifikasi response spektrum secara langsung dengan membuat perkalian yang sama untuk luasan di bawah spektrum kecepatan, yaitu

$$\int S_s(\omega_e)d\omega_e = \int \omega_e^4 S_s(\omega_e)d\omega_e = m_{2s} \quad (2.96)$$

Untuk perhitungan percepatan di gelombang irreguler, ordinat RAO untuk percepatan didapatkan dengan mengalikan ordinat RAO untuk gerak dengan pangkat empat dari tiap frekuensi yaitu

$$RAO(\text{percepatan}) = \omega_e^4 RAO(\text{gerak}) \quad (2.97)$$

dimana masing-masing RAO merupakan fungsi frekuensi encounter. Seperti penyelesaian pada gerak vertikal, maka untuk percepatan vertikal

$$\int S_s(\omega_e)d\omega_e = \int \omega_e^4 S_s(\omega_e)d\omega_e = m_{4s} \quad (2.98)$$

II.4.7. Deck Wetness

Penyebab utama naiknya air ke geladak adalah adanya gerak relatif deck (*relative deck motion*). Gerak relatif tersebut akan bersifat reguler bila kapal berada di gelombang reguler, dan akan bersifat irreguler bila kapal berada di gelombang irreguler. Jika pada suatu saat gerak relatif mempunyai nilai negatif, yaitu dengan mengukur gerak deck dan gelombang dari kondisi air

tenang, maka air laut akan naik ke geladak. Kondisi ini dapat terjadi karena adanya efek statical dan dynamical swell-up, dimana kedua fenomena ini dapat mengurangi tinggi freeboard awal.

Efek statical swell-up pada bow

Efek yang timbul karena adanya statical swell-up ini adalah adanya pengurangan terhadap tinggi freeboard. Dari gambar (II.13), *effective freeboard*

$$f'(l) = f(l) - h_s(l) \quad (2.99)$$

dimana

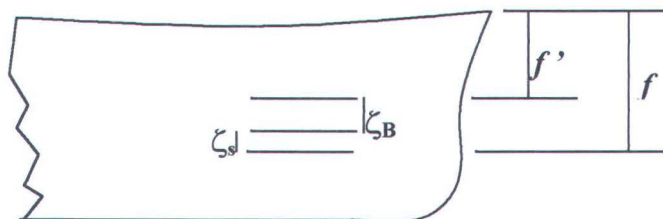
$f(l)$: actual freeboard di air tenang (m)

$h_s(l)$: statical swell-up (m)

$$= \zeta_B + \zeta_s$$

ζ_B : elevasi sebagai akibat adanya bow wave (m)

ζ_s : efek sinkage karena adanya kecepatan kapal (m)



Gambar II.13. *Statical Swell-up dan effective board*



Untuk menghitung besarnya statical swell-up digunakan formula (Tasai, 1969)

$$\frac{h_s}{L} = k_1' F_n^2 \quad (2.100)$$

dimana

$$k_1' : k_1 (B/L_E)$$

$$L : \text{panjang kapal}$$

$$k_1 : 0.75$$

$$B : \text{lebar}$$

$$L_E : \text{Length of Entrance}$$

$$F_n : \text{Froude Number}$$

Efek Dynamical Swell-up pada Bow

Fenomena ini menyebabkan relative bow motion meningkat, hal tersebut dapat terjadi karena ketika abow terbenam, air akan terdorong ke sisi samping (gambar II.14). Untuk mendapatkan harga dynamical swell-up digunakan formula (Tasai, 1969)

$$h_d(l) = k_2 s(l) \omega_e \left(\frac{L}{g} \right)^{1/2} \quad (2.101)$$

atau

$$h_d(l) = k_2 L \left[\frac{s(l)}{\sqrt{gL}} \right] \quad (2.102)$$

dimana formula tersebut berlaku dengan syarat

$$0.16 < F_n < 0.25$$

dan

$$1.6 < \omega_e^2 \frac{L}{g} < 2.6$$

dimana

$s(l)$: vertical displacement = $z - l\theta - \zeta$ (m)

l : jarak CG dari FP

z : displasemen heaving (m)

θ : displasemen pitching (rad)

ζ : elevasi gelombang (m)

$h_d(l)$: dynamical swell-up (m)

$\dot{s}(l)$: relative bow velocity (m/dt)

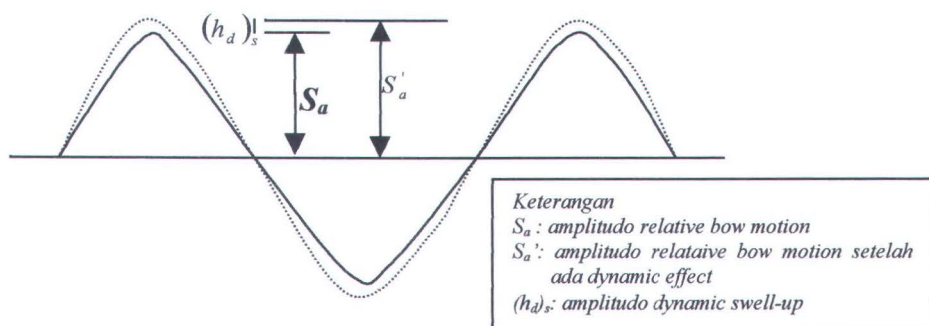
k_2 : konstanta yang tergantung pada nilai C_B

: $\frac{1}{3}(C_B - 0.45)$ untuk $0.6 < C_B < 0.8$

C_B : Koefisien Blok

Dengan mengamati adanya swell-up yang terjadi, baik statik maupun dinamik dapat disimpulkan bahwa fenomena tersebut meningkatkan kemungkinan naiknya air laut ke geladak kapal. Jika kemudian diasumsikan bahwa rata-rata $f'(l)$ di gelombang diperkirakan sesuai dengan keadaan di air tenang, maka relatif freeboard di gelombang sama dengan

$$h'(l) = f'(l) - h_d(l) + s(l) \quad (2.103)$$



Gambar II.14. Dynamical Swell-up

Probabilitas terjadinya Deck Wetness

Adalah hal yang penting sekali untuk memprediksi kemungkinan terjadinya deck wetness dalam suatu periode tertentu gerakan kapal. Dari formula (2.109), dengan histogram mengikuti distribusi Rayleigh, harga terbesar yang diharapkan ada di luar observasi adalah

$$\sqrt{2 \log_e n} \sqrt{m_o}$$

Dengan demikian jika *effective freeboard* $f'(l)$ dimasukkan ke dalam persamaan tersebut, nilai n bisa didapatkan dengan

$$n = e^{(f')^2 / 2m_o} \quad (2.104)$$

Dengan kata lain, air akan mencapai geladak sekali dalam n periode.

Probabilitas immersion akan mengurangi besarnya *effective freeboard*, $f'(l)$, ditunjukkan oleh

$$P\{s \geq f'(l)\} = e^{-[f'(l)]^2 / 2m_{os}} \quad (2.105)$$

dimana m_{os} adalah luasan di bawah response spektrum relative bow motion pada FP, yaitu

$$m_{os} = \frac{1}{4} \left[(S_a)_{1/3} \right]^2$$

dan $f'(l)$ adalah *effective freeboard* pada FP. Sehingga probabilitas deck wetness merupakan fungsi gerak bow relatif terhadap gelombang dan kuadrat tinggi freeboard.

Banyaknya kejadian masuknya geladak ke air tiap jam dapat dihitung dengan formula

$$N_T = \frac{\text{Probability of deck wetness}}{\text{average apparent period}} \times 3600 = \frac{P_F}{T} \times 3600 \quad (2.106)$$



diasumsikan T sama dengan T_θ . Dengan kata lain jika jumlah cycle besar, geladak akan kemasukan air sebanyak N_T kali per jam.

II.4.8. Slamming

Adanya *impact* dari gelombang yang membentur bow merupakan bagian penting yang harus diperhatikan dalam merancang kapal, karena benturan tersebut dapat mengakibatkan kerusakan serius pada kapal.

Kapal akan mengalami dua macam impact ketika sedang bergerak di perairan bergelombang, yaitu

- a. Impact yang dialami ketika bagian depan kapal membentur permukaan air karena gerakan pitching.
- b. Impact pada setiap bagian lambung.

Impact pada bagian pertama selanjutnya disebut *slamming*. Slamming kemudian didefinisikan sebagai fenomena benturan hidrodinamik yang berhubungan dengan adanya perubahan mendadak pada percepatan kapal. Ada tiga kondisi kinematis dalam mempelajari terjadinya slamming, yaitu

- a. *Forefoot Emergence*
- b. Beda fase antar gerak bow dan gelombang
- c. Besarnya relative bow velocity.

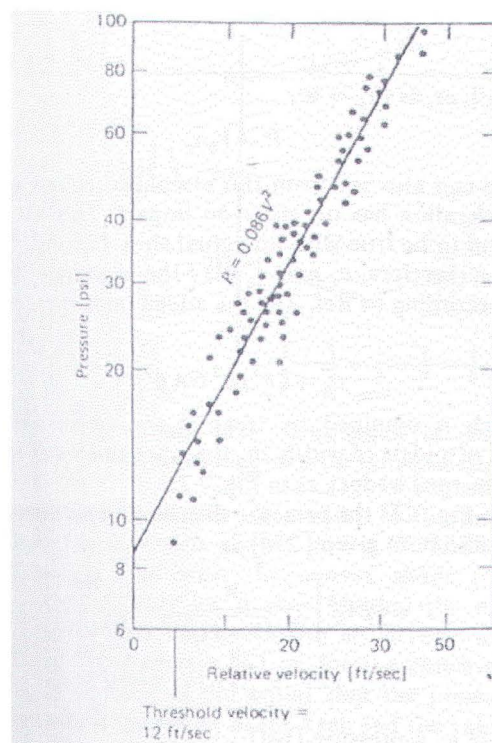
Slamming yang terjadi di gelombang irreguler juga menyebabkan adanya

- a. Benturan serius pada pelat dasar kapal.

b. Tegangan pada struktur sehubungan dengan adanya getaran.

Fenomena yang kedua biasanya disebut *whipping*, yang didefinisikan sebagai deformasi periodik flexural yang mengakibatkan perubahan struktur dalam arah vertikal maupun horisontal.

Gaya slamming secara umum tergantung pada kecepatan bow saat membentur permukaan air dan luasan benturan. Dari data eksperimen yang telah dilakukan, *slamming pressure* berbanding lurus dengan kuadrat kecepatan relatif vertikal (*Bhattacharyya, 1978*), seperti ditunjukkan oleh gambar II.15. Kecepatan minimum vertikal dari gerakan bow untuk mulai terjadinya slamming selanjutnya disebut dengan *threshold velocity*.



Gambar II.15. Hubungan kecepatan relatif dengan impact pressure

Untuk mendapatkan prediksi terhadap besarnya impact digunakan formula (Jordaan, JM, 1972)

$$\dot{s} = \sqrt{\frac{gb}{\sqrt{2\pi}} - V_s^2} \quad (2.107)$$

atau dalam bentuk nondimensional

$$\frac{\dot{s}}{\sqrt{gL}} = \sqrt{\frac{1}{\sqrt{2}} \frac{b}{\pi L} - \frac{V_s^2}{gL}} \quad (2.108)$$

dimana

\dot{s} : threshold velocity

V_s : kecepatan operasi

Dasar Teori

Ketika bagian depan kapal yang berbentuk V mengalami penetrasi ke dalam air dengan jarak z , akan menyebabkan terjadinya tekanan, yang merupakan kombinasi antara, inersia, damping, dan gaya bouyancy, sehingga persamaan gerak dapat dinyatakan dengan

$$F_i + F_d + (F_b - F_w - F_s) = 0$$

dimana,

F_i : Gaya inersia

F_d : Gaya Damping

F_b : Gaya bouyancy

F_w : Berat bagian potongan V = gM_o

F_s : Gaya lembam lambung pada potongan V

Untuk benturan awal F_d , F_b , dan F_w mempunyai nilai yang kecil, sehingga persamaan menjadi

$$F_i = F_s \quad (2.109)$$

Kemudian gaya inersia F_I , didapatkan dengan melakukan diferensiasi pada momentum, dengan mengambil permisalan bentuk untuk momentum adalah

$$\text{Momentum} = (M_o + a_z)\dot{z}$$

dimana M_o adalah massa bagian dan a_z adalah massa tambahan, maka gaya inersia

$$F_i = \frac{d}{dt}(\text{momentum}) = (M_o + a_z)\ddot{z} + \dot{a}_z\dot{z}$$

dimana \dot{a}_z mengindikasikan massa tambahan yang merupakan fungsi waktu. Selanjutnya persamaan 2.157 dapat dinyatakan dengan

$$(M_o + a_z)\ddot{z} + \dot{a}_z\dot{z} = F_s \quad (2.110)$$

atau

$$F_s - M_o\ddot{z} = a_z\ddot{z} + \dot{a}_z\dot{z} \quad (2.111)$$

Sehingga sekarang persamaan dapat digunakan untuk menguraikan benturan hidrodinamik (*hydrodynamic impact*), hasilnya

$$P = F - M_o\ddot{z} = a_z\ddot{z} + \dot{a}_z\dot{z} \quad (2.112)$$

Jika *added mass* mengalami perubahan sesuai dengan kejadian tenggelamnya bagian kapal, maka

$$\dot{a}_z = \frac{da_z}{dz} \frac{dz}{dt} = \frac{da_z}{dz} \dot{z} \quad (2.113)$$

Dengan menggabungkan persamaan (2.161) dan (2.158), maka

$$(M_o + a_z)\ddot{z} + \frac{da_z}{dz}(\dot{z})^2 = F_s \quad (2.114)$$

Persamaan tersebut menunjukkan bahwa impact dapat diuraikan sebagai mana damping yang berbanding lurus dengan kuadrat kecepatan dengan koefisien damping sama dengan perubahan massa tambahan.

Jika diasumsikan bahwa *wedge* tidak dihubungkan dengan kapal, ketika $t=0$, $z=0$, dan $\dot{z} = V_o$,

$$\dot{z} = \frac{M_o V_o}{M_o + a_z}$$

dan

$$\ddot{z} = \frac{M_o V_o \dot{a}_z}{(M_o + a_z)^2}$$

dari (2.160)

$$impact = P = \frac{M_o V_o \dot{a}_z}{(M_o + a_z)^2}$$

atau

$$\frac{P}{M_o} = \frac{V_o \dot{a}_z}{(1 + (a_z / M_o))^2} \quad (2.115)$$

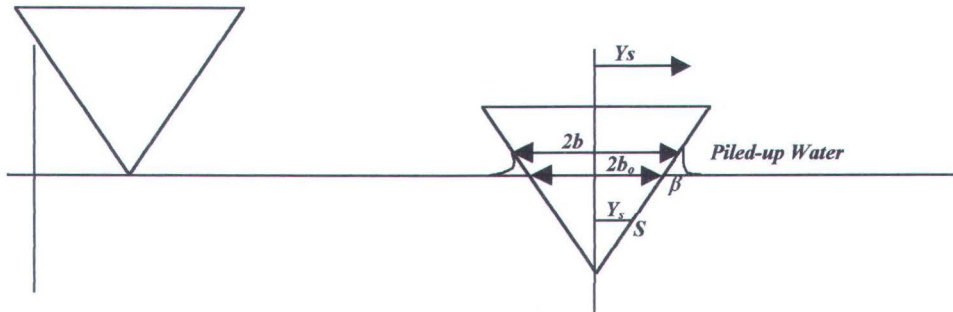
Persamaan (2.163) menunjukkan, jika massa M_o jauh lebih besar dibandingkan massa tambahan a_z , impact yang terjadi sangat kecil; atau jika $M_o \rightarrow \infty$,

$$P \rightarrow V_o \dot{a}_z \quad (2.116)$$

Dengan mengacu pada persamaan untuk massa tambahan (Wagner, H, 1932)

$$a_z = \frac{1}{8} \pi^3 \rho z^2 \cot g^2 \beta$$

yang didapatkan dari asumsi massa tambahan yang timbul pada pelat lambung berbentuk segitiga dengan lebar $2b_0$, seperti yang ditunjukkan oleh gambar II.16.



Gambar II.16. *Submerged Wedge*

Pada gambar II.19 tersebut, distribusi tekanan ditunjukkan oleh persamaan

$$P = \frac{1}{2} \rho V_o^2 \left[\frac{\pi}{\beta \sqrt{1 - (x/b)^2}} - \frac{x^2 b^2}{1(x^2/b^2)} + \frac{2\ddot{z}}{V^2} (\sqrt{b^2 - x^2}) \right] \quad (2.117)$$

dimana

P : tekanan

x : jarak horisontal dari midship

V_o : \dot{z}_x : kecepatan relatif vertikal titik dengan jarak x dari midship.

\ddot{z}_x : percepatan relatif pada jarak x .

β : *deadrise angle of the wedge*

Demikian juga diuraikan untuk b sebagai fungsi z (Wagner, H, 1932), yaitu

$$b = \frac{\pi z}{2\beta} \quad (2.118)$$

Jika \dot{z} insignificant dalam perbandingan *added massa*, maka didapatkan

$$\frac{p}{\frac{1}{2}\rho V^2} = \frac{\pi}{\beta\sqrt{1-(x^2/b^2)}} - \frac{x^2 b^2}{1-(x^2/b^2)} \quad (2.119)$$

Namun demikian persamaan tersebut ternyata tidaklah sesuai untuk pelat datar jika dilakukan eksperimen dengan model (*Bhattacharyya, 1978*), sehingga untuk pelat datar digunakan persamaan lain (*Vossers, G, 1961*), yaitu

$$\frac{p}{\frac{1}{2}\rho V^2} = \frac{2C_o}{V}$$

dimana C_o adalah kecepatan suara dalam air (≈ 15 m/dt).

Untuk tekanan maksimum yang dialami ditunjukkan oleh persamaan

$$p = p_o \left[\frac{2}{\beta\sqrt{1-(Y_s/2b)^2}} + \frac{2}{\delta} \sqrt{\left(1 - \frac{Y_s}{2b}\right)^2} - \frac{\left(\frac{Y_s}{2b}\right)^2}{1 - \left(\frac{Y_s}{2b}\right)^2} \right] \quad (2.120)$$

dimana

$$p_o = \frac{1}{2}\rho(\dot{z}_x)^2 \quad \text{dan} \quad \delta = \frac{(\dot{z}_x)^2}{2b\ddot{z}_x}$$

$2b$ adalah *modified beam*, dan β adalah modifikasi penampang melintang. Kecepatan vertikal untuk bagian ini ditunjukkan oleh persamaan

$$\dot{z}_x = \dot{\zeta} - (\dot{z} + x\dot{\theta})$$

$$= -\omega_e \zeta_e \left(\omega_e t + \frac{2\pi x}{L_w} \right) - \dot{z} - x\dot{\theta}$$

dan percepatannya

$$\begin{aligned}\ddot{z}_x &= \ddot{\zeta} - (\ddot{z} + x\ddot{\theta}) \\ &= \omega_e^2 \zeta_a \cos\left(\omega_e t + \frac{2\pi x}{L_w}\right) - \ddot{z} - x\ddot{\theta}\end{aligned}$$

Probabilitas Slamming

Probabilitas terjadinya amplitudo kecepatan relatif bow yang mempengaruhi threshold velocity ditunjukkan dengan persamaan

$$\text{Prob}\{\dot{s}_a \geq v_o\} = e^{-(v_o^2/2m_{os})} \quad (2.121)$$

dimana m_{os} adalah varian kecepatan relatif vertikal, yang sama dengan luasan response spektrum kecepatan relatif vertikal.

Jika diasumsikan *bow emergence* dan kecepatan relatif bow secara statistik adalah kejadian terpisah atau independent, maka probabilitas untuk terjadinya slamming adalah

$$\text{Prob}\{slam\} = e^{-(r^2/2m_{os} + v_o^2/2m_{2s})} \quad (2.122)$$

Frekuensi terjadinya slamming per satuan waktu, N_s , juga dapat diprediksikan dengan

$$N_s = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{m_{2s}}{m_{os}}} \text{Prob}\{slam\} \quad (2.123)$$

dimana

N_s : frekuensi terjadinya slamming

m_{os} : luas response spektrum gerak relatif antara kapal dengan permukaan air.

m_{2s} : luas spektrum kecepatan relatif, dengan ordinat spektrum gerak relatif adalah $S_s(\omega_e)$, dan spektrum kecepatan relatif $\omega_e^2 S_s(\omega_e)$.

v_o : nilai kritis kecepatan relatif untuk terjadinya slamming (*threshold velocity*).

Dalam referensi lain (*Ochi and Motter, 1973*) disebutkan bahwa terjadinya slamming bertambah sesuai dengan kecepatan kapal. Secara eksperiment ditemukan pula bahwa terjadinya slamming berkurang seiring dengan bertambahnya angka Froude.

Interval antara Kejadian Slam Impact

Probabilitas waktu t_o untuk terjadinya slam berikutnya ditunjukkan dengan persamaan

$$P\{\text{time interval between successive impact} > t_o\} = e^{-N_s(t-t_o)} \quad (2.124)$$

dimana N_s adalah frekuensi slam dan t^* adalah periode natural gerakan pitching.

II.5. Added Resistance

II.5.1. Added Resistance di Gelombang Reguler

Ekspresi teoritis untuk *added resistance* (tahanan tambahan) di gelombang reguler sebagai fungsi heaving dan pitching ditunjukkan dengan persamaan (*Havelock, 1958*)

$$R_{AW} = -\frac{k}{2}(F_a z_a \sin \varepsilon_{zF} + M_a \theta_a \sin \varepsilon_{\theta M}) \quad (2.125)$$

dimana

R_{AW} : Tahanan tambahan di gelombang reguler (N)

k : angka gelombang

F_a : amplitudo gaya eksitasi gerak heaving (N)

M_a : amplitudo momen eksitasi gerak pitching (Nm)

z_a : amplitudo gerak heaving (m)

θ_a : amplitudo gerak pitching (rad)

ε_{zF} : beda fase gaya eksitasi dengan gerak heaving (deg)

$\varepsilon_{\theta M}$: beda fase momen eksitasi dengan gerak pitching (deg)

Namun demikian persamaan ini hanya merupakan perkiraan pertama dengan asumsi bahwa tidak ada kopel antara heaving dengan pitching.

Alternatif lain untuk menemukan ekspresi tahanan tambahan adalah dengan menyamakan usaha yang dilakukan gaya eksitasi dan gaya-gaya yang bekerja pada lingkungan gelombang tempat kapal beroperasi. Joosen(1966) menguraikan tahanan tambahan berdasarkan parameter slenderness B/L , didapatkan

$$\frac{R_{AW}}{\rho g \zeta_a^2 (B^2/L)} = \frac{L^2}{32 B^2} \left[\left(\frac{z_a}{\zeta_a} \right)^2 P_1 + \frac{\pi^2 L^2}{L_w^2} \left(\frac{\theta_a L_w}{2\pi \zeta_a} \right) P_3 - \frac{2\pi L}{L_w} \left(\frac{L_w \theta_a}{2\pi \zeta_a} \right) \left(\frac{z_a}{\zeta_a} \right) P_2 \cos \varepsilon \right]$$

dimana

$$P_1 = \frac{\omega_e^3}{\rho g^2} \frac{2}{L} \rho V \sqrt{\frac{g}{L}} B_{33}$$

$$P_2 = \frac{\omega_e^3}{\rho g^2} \frac{2}{L} \rho V \sqrt{\frac{g}{L}} (B_{35} + B_{53})$$

$$P_3 = \frac{\omega_e^3}{\rho g^2} \frac{2}{L} \rho V \sqrt{\frac{g}{L}} B_{55}$$



Koefisien damping yang digunakan dalam persamaan tersebut adalah

$$B_{33} = \frac{1}{\omega_e \nabla} \sqrt{\frac{g}{L}} \int b_n d\xi$$

$$B_{35} + B_{53} = \frac{2}{\omega_e \nabla} \sqrt{\frac{g}{L}} \int b_n \xi d\xi$$

$$B_{55} = \frac{1}{\omega_e \nabla} \sqrt{\frac{g}{L}} \int b_n \xi^2 d\xi$$

dimana

ω_e : frekuensi encounter

∇ : volume displasemen

b_n : sectional damping coefficient

ξ : nondimensional longitudinal coordinat.

II.5.2. Added resistance di Gelombang Irreguler

Tahanan tambahan yang dialami kapal di gelombang irreguler bisa didapatkan dengan cara yang sama untuk menguraikan gerak kapal, yaitu dengan teknik superposisi linier. Berikut ini langkah langkah untuk menghitung *added resistance* di gelombang irreguler

- a. Spektrum gelombang yang didapatkan dari data kondisi laut suatu wilayah perairan atau jika kesulitan dengan data tersebut dapat digunakan standar dari ITTC.
- b. RAO bisa didapatkan secara analitis ataupun dari pengetesan model yang dilakukan di gelombang reguler.



Dengan menggunakan teknik superposisi linier ini tahanan tambahan di gelombang proporsional dengan kuadrat amplitudo gelombang, yaitu

$$R_{AW} \propto \zeta_a^2$$

- c. Kemudian untuk setiap frekuensi encounter, ordinat response spektrum diuraikan sebagai hasil ordinat spektrum encounter laut dan RAO sama dengan frekuensi encounter. Hasilnya rata-rata tahanan tambahan adalah

$$R_{AW} = 2 \int_0^{\infty} S_{\zeta}(\omega_e) \frac{R_{AWR}(\omega_e)}{\zeta_a^2} d\omega_e$$

Sekarang rata-rata statistik (rms) tahanan tambahan adalah dua luasan yang sama dari response spektrum yaitu

$$R_{AW} = 2 m_o$$

Dimana m_o adalah luasan dibawah response spektrum tahanan tambahan.

إِن أَحْسَنْتُمْ أَحْسَنْتُمْ لِنَفْسِكُمْ وَإِن أَسَأْتُمْ فَلَهَا
(الاسراء: ٧)

Jika kamu berbuat baik berarti kamu berbuat baik untuk dirimu sendiri, demikian juga jika kamu berbuat jahat maka sebenarnya kejahatan itu untuk dirimu sendiri
(QS. Al-Isro' : 7)



Bab III

Pemrograman dan Validasi Hasil



BAB III

PEMROGRAMAN DAN VALIDASI HASIL

III.1. Umum

Pemrograman yang dilakukan dalam tugas akhir ini meliputi beberapa bagian proses maupun sub-proses yang saling berkaitan antara satu dengan yang lain. Sesuai dengan yang telah tercantum pada Bab I, bahwa untuk menyelesaikan permasalahan akan digunakan bahasa pemrograman Visual Basic yang terintegrasi di dalam Microsoft Excel. Selanjutnya untuk proses optimisasi akan digunakan solver yang terdapat dalam fasilitas *Add-Ins* yang ada pada Excel.

Beberapa bagian proses yang dilakukan dalam penyusunan program antara lain adalah penyusunan kerangka kerja bagian proses dengan Microsoft Excel, pengujian proses optimisasi secara manual dengan solver, dan penyusunan routine program untuk mengintegrasikan seluruh kerangka proses dengan menggunakan



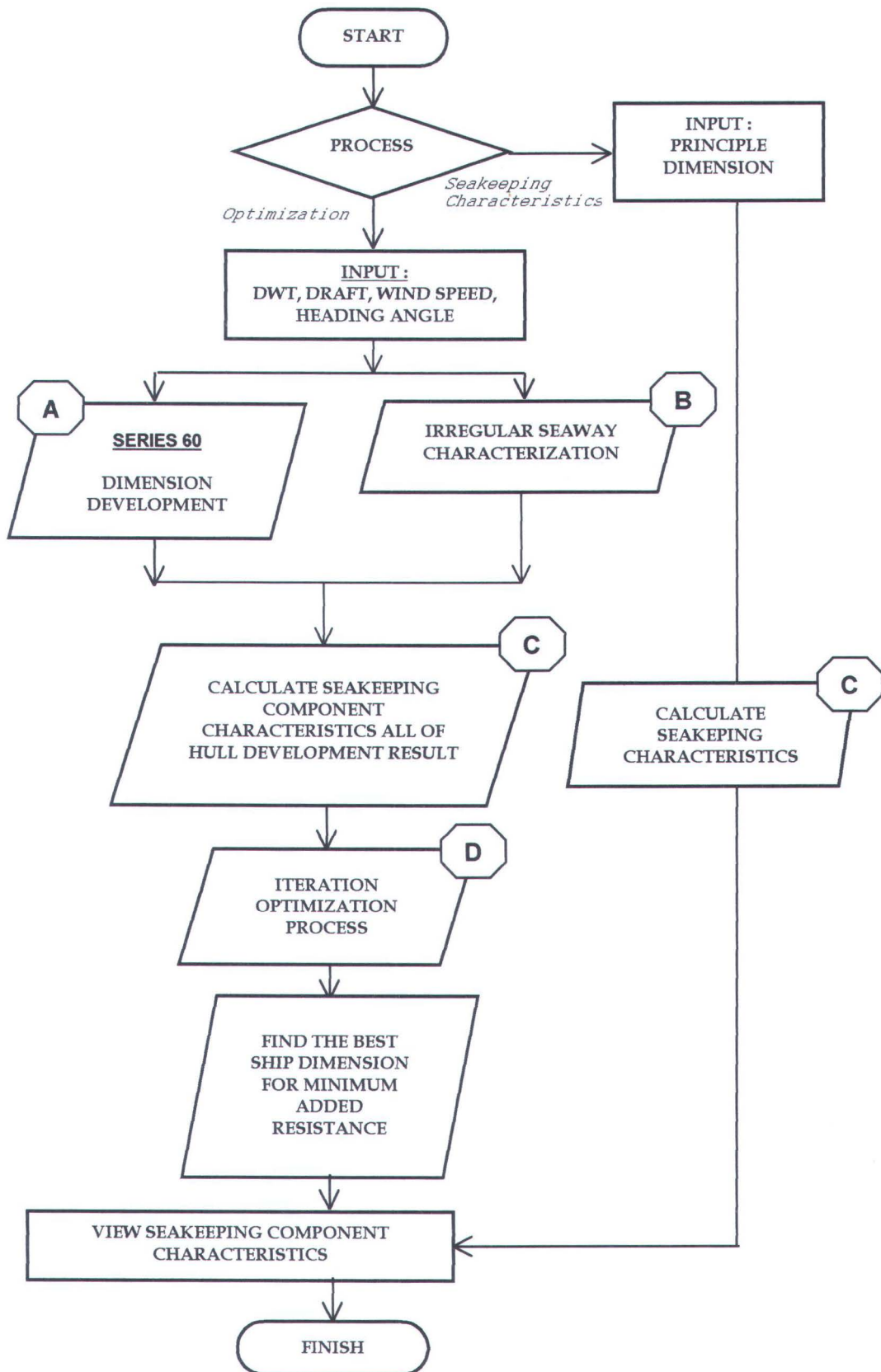
utilitas *Visual Basic for Application* yang berupa *Visual Basic Editor* pada Microsoft Excel.

Untuk proses validasi terhadap perhitungan, akan digunakan data yang diambil dari literatur *Dynamics of Marine Vehicles* (Bhattacharrya, 1978). Validasi akan dilakukan terhadap perhitungan untuk perhitungan komponen karakteristik seakeeping yang terlibat dalam proses, antara lain *deck wetness*, *slamming*, dan *added resistance*.

III.2. Penyusunan Program Komputer

Kerangka kerja proses yang disusun pada penyelesaian permasalahan terdiri dari perhitungan untuk pengembangan model ukuran kapal, karakteristik gelombang, kopel gerakan heaving dan pitching, dan karakteristik seakeeping yang dialami kapal. Untuk selanjutnya setelah didapatkan seluruh parameter dan variabel, serta batasan yang dibutuhkan, maka dilakukan proses optimisasi dengan menggunakan Microsoft Solver Excel dengan fungsi tujuan adalah minimum *added resistance*. Untuk lebih jelasnya dapat diamati pada flowchart diagram pada gambar III.1.

Seluruh data kerangka proses disimpan dalam file excel dengan ekstensi *xls*. Untuk selanjutnya nanti data maupun hasil perhitungan akan diangkat melalui *main form* Visual Basic *stand alone*.



Gambar III.1. General Flowchart Solution Process



III.2.1 Pengembangan Ukuran Utama Kapal

Pengembangan ukuran utama kapal dilakukan dengan melakukan penentuan variasi ukuran kapal dengan batasan yang telah ditentukan oleh series 60. Batasan-batasan teknis yang dipakai tersebut adalah

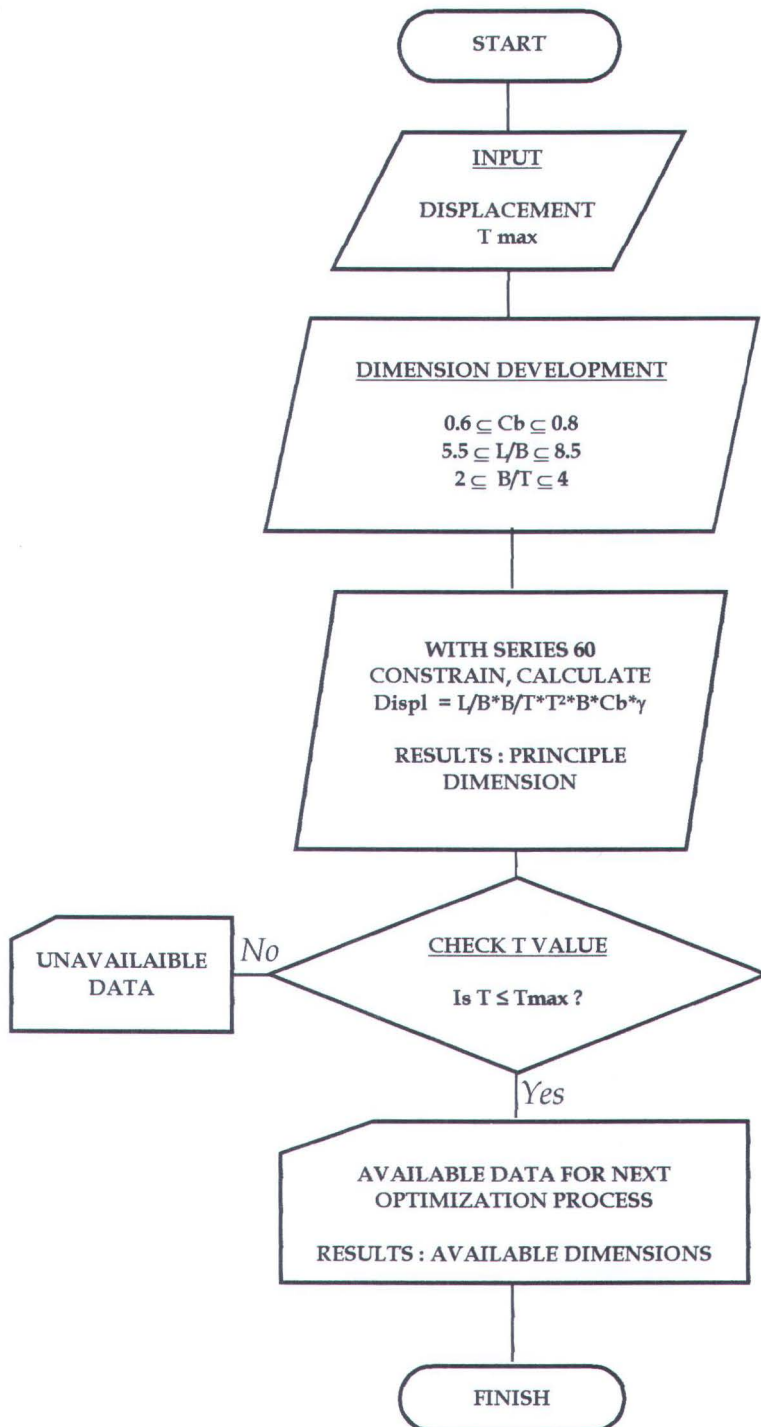
1. $0.6 \leq C_b \leq 0.8$
2. $5.5 \leq L/B \leq 8.5$
3. $2 \leq B/T \leq 4$

Dari input displacement kapal sebagai permintaan, dan dengan batasan teknis tersebut, akan didapatkan seluruhnya 45 model ukuran utama kapal yang akan dikenai proses optimisasi, contoh pengembangan ukuran utama kapal dapat diamati pada lampiran.

Proses komputasi yang berlangsung untuk perhitungan karakteristik seakeeping terhadap model ukuran yang ada tersebut (pada pembacaan CSA), dilakukan dengan jalan pembacaan data grafik dari coefficient CSA untuk tiap model yang datanya didapatkan dari hasil eksperimen yang terdapat di literature (*Todd, F.H, Sa*). Sehingga kelengkapan data untuk pemrosesan masing-masing karakteristik seakeeping masing masing model sudah dapat terpenuhi. Grafik koefisien luasan CSA yang dimaksud dapat dilihat pada lampiran dibagian akhir tugas akhir ini. Untuk lebih jelasnya mengenai proses pengembangan dimensi ukuran kapal tersebut dapat diamati pada flowchart diagram pada gambar III.2



A



Gambar III.2. Dimension Development Process

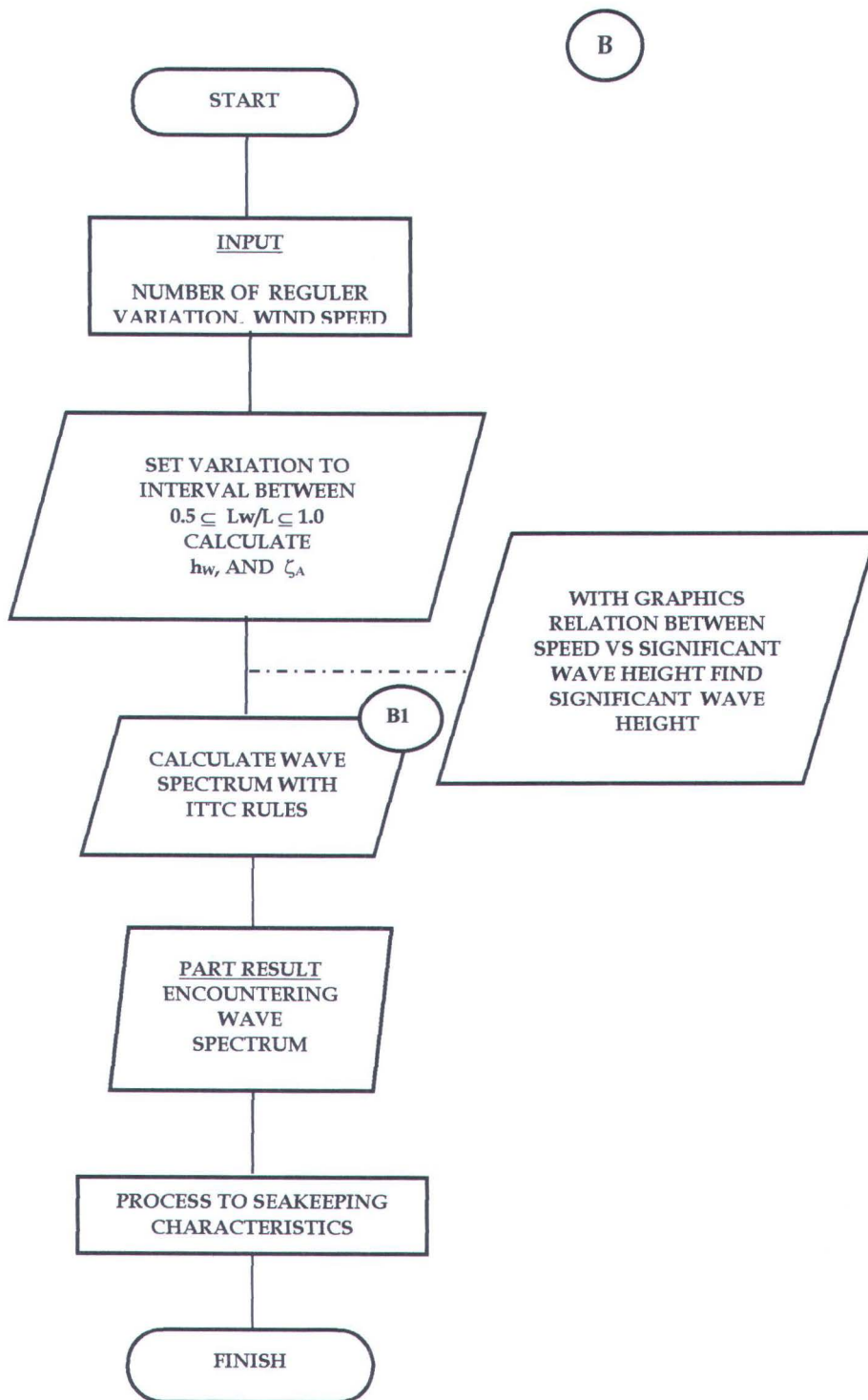


Sebagai contoh hasil detail bentuk pengembangan ukuran utama dapat diamati pada lampiran A, terdapat secara keseluruhan 45 model. Ukuran utama model model tersebut dikembangkan dari input displacement 6000 ton. Dan sebagai cross check untuk nilai displacement dapat diamati pada lampiran berikutnya.

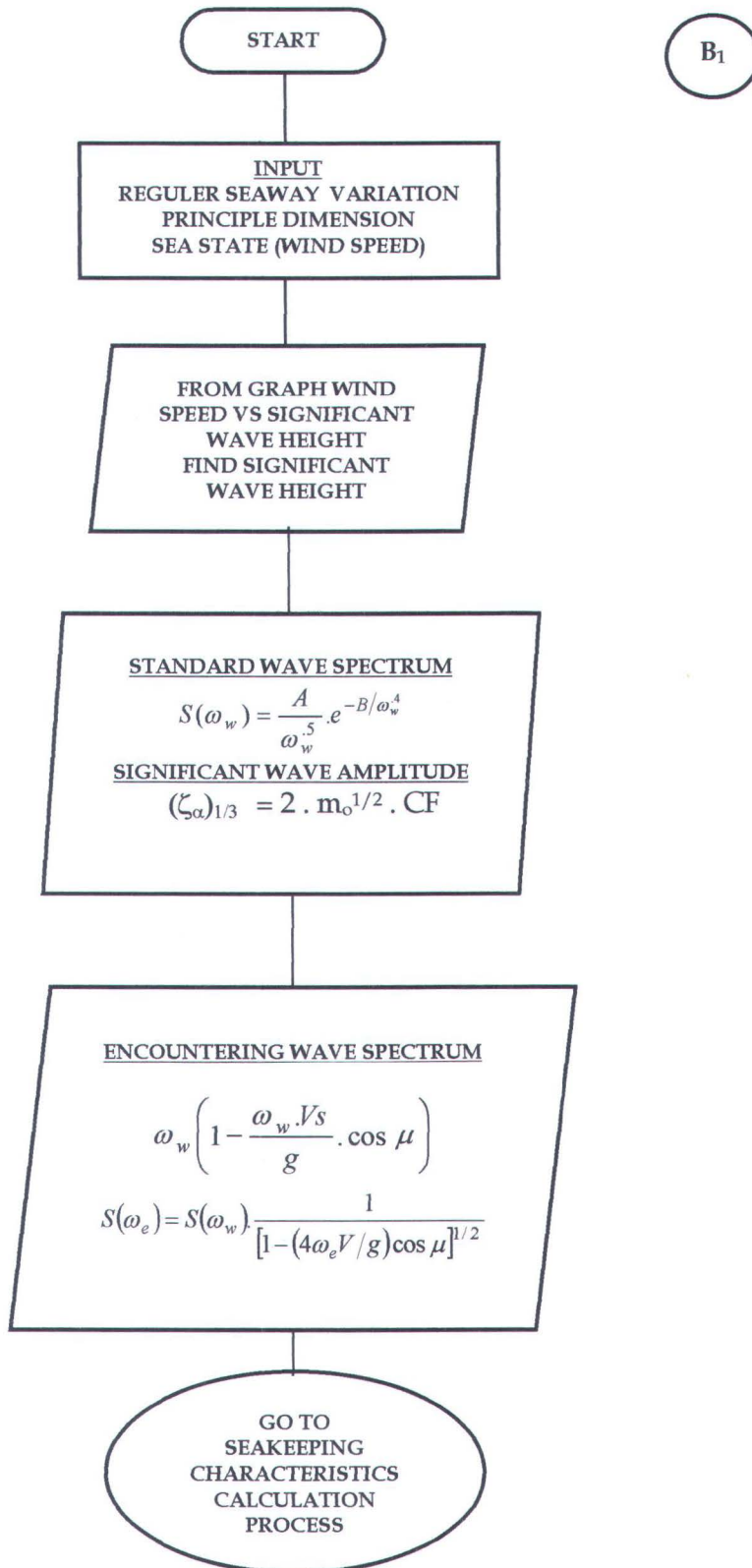
III.2.2 KARAKTERISTIK GELOMBANG

Karakterisasi gelombang irreguler dilakukan pada interval gelombang $0.5 \leq L_w/L \leq 1.0$, dimana L_w adalah panjang gelombang dan L adalah panjang kapal. Hal ini dilakukan untuk mengambil kondisi yang paling kritis yaitu ketika panjang gelombang dibanding panjang kapal sama dengan 0.5 dan 1.0. Selain alasan tersebut jika dilakukan pengambilan interval terlalu lebar akan berakibat munculnya interpretasi nilai deck wetness yang tidak logis.

Untuk proses selanjutnya dari input data variasi gelombang, misalnya ada enam gelombang reguler yang saling berinterferensi memntuk gelombang irreguler, maka empat gelombang reguler yang lain terletak di antara 0.5 dan 1.0. Interval tersebut dibagi dengan banyaknya variasi yang dikehendaki. Sebagai contoh misalnya yang berinterferensi adalah enam gelombang reguler maka L_w / L yang digunakan 0.5; 0.6;0.7; 0.8; 0.9; dan 1.0. Detail proses dapat diamati pada gambar III.3



Gambar III.3. Karakterisasi Gelombang

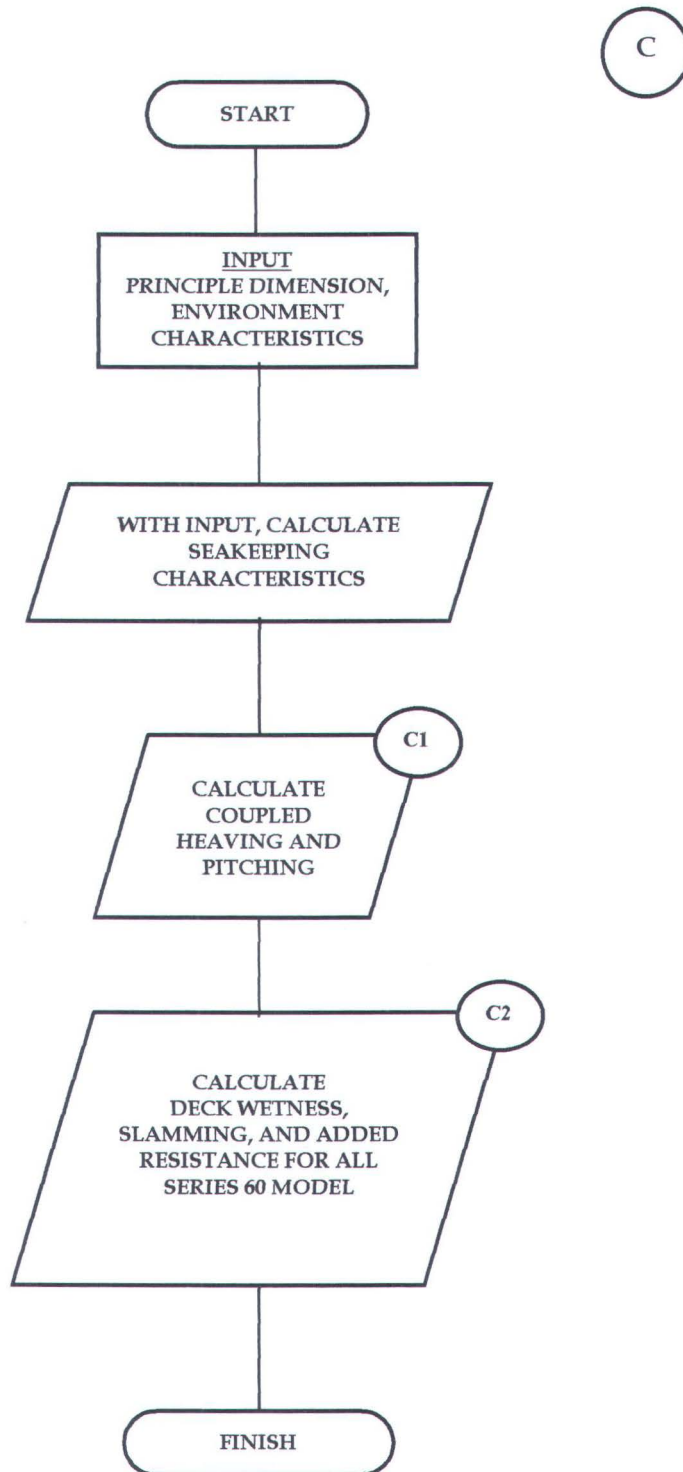


Gambar III.4. Spektrum Gelombang standar ITTC



III.2.3. KARAKTERISTIK SEAKEEPING

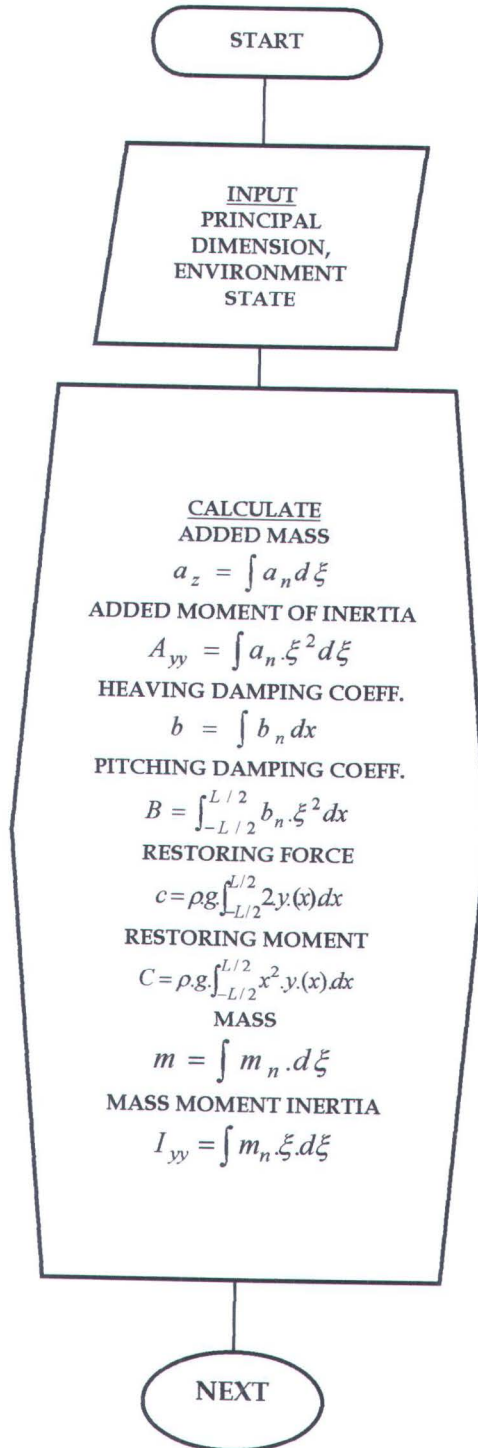
Pada bagain ini akan dilakukan proses perhitungan karakteristik seakeeping untuk masing-masing model ukuran utama yang telah ada. Bagian bagain yang menjadi fokus pembahasan adalah kopel gerakan heaving dan pitching, karakteristik deck wetness (frekuensi terjadinya deck wetness), karakteristik slamming, serta added resistance yang dialami kapal. Flowchart diagram untuk karakteristik seakeeping dapat diamati pada gambar III.5. Untuk detail masing-masing proses dapat pula diamati pada gambar III.6 dan III.7.

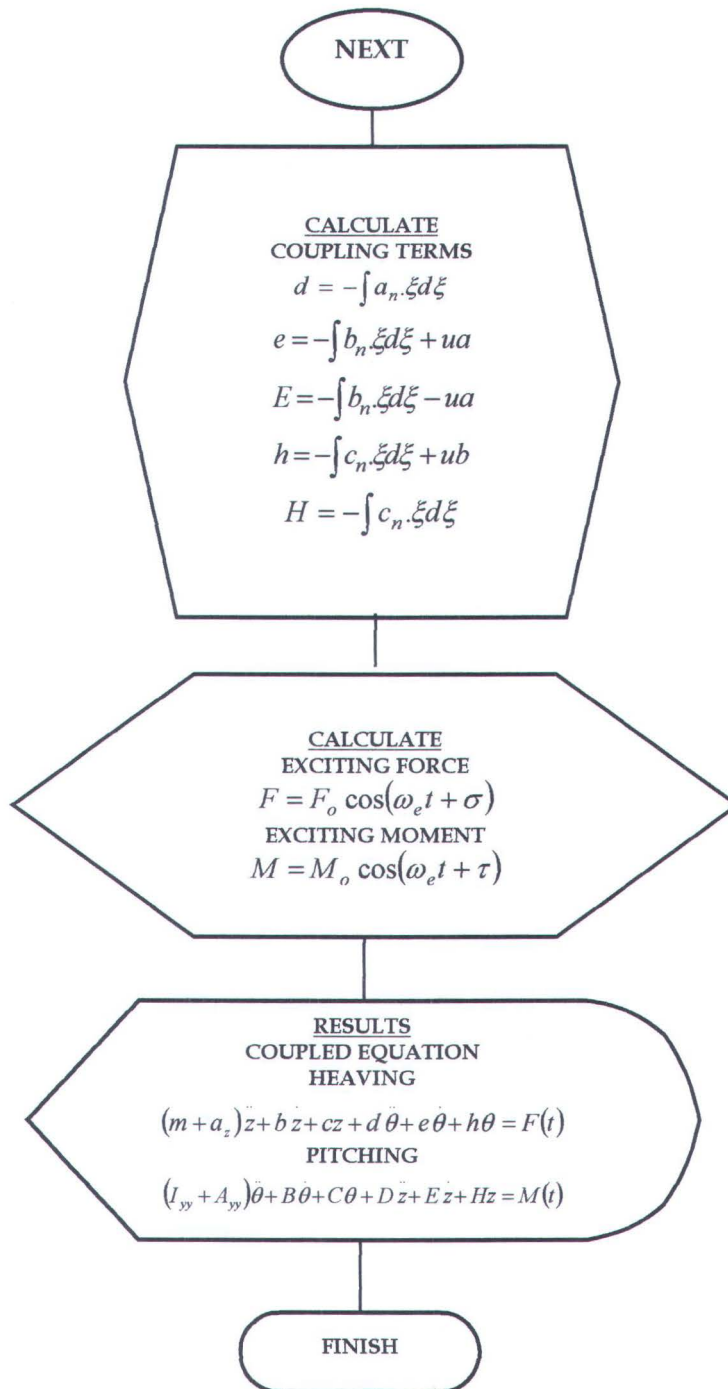


Gambar III.5. Karakteristik seakeeping



C₁

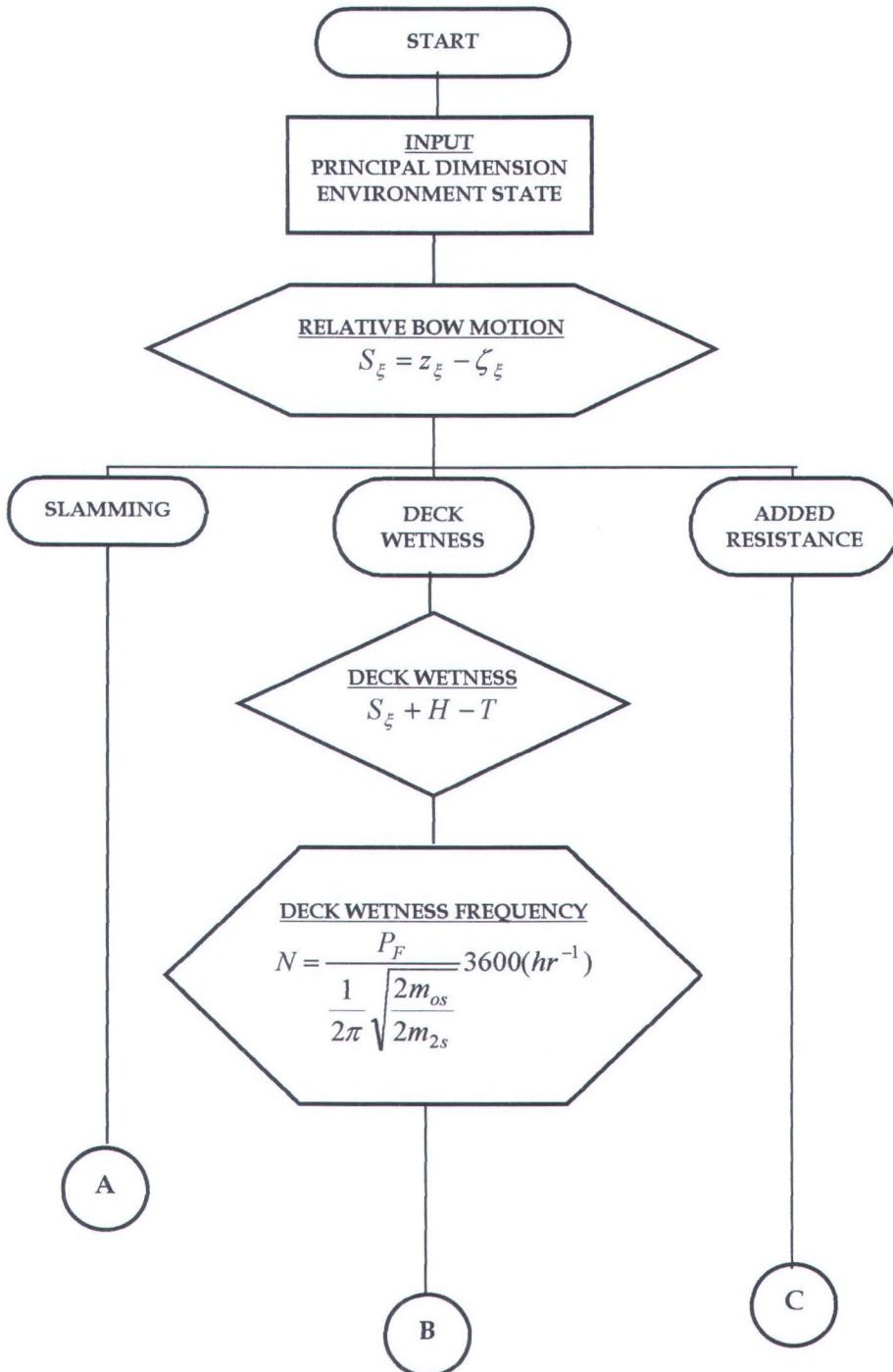


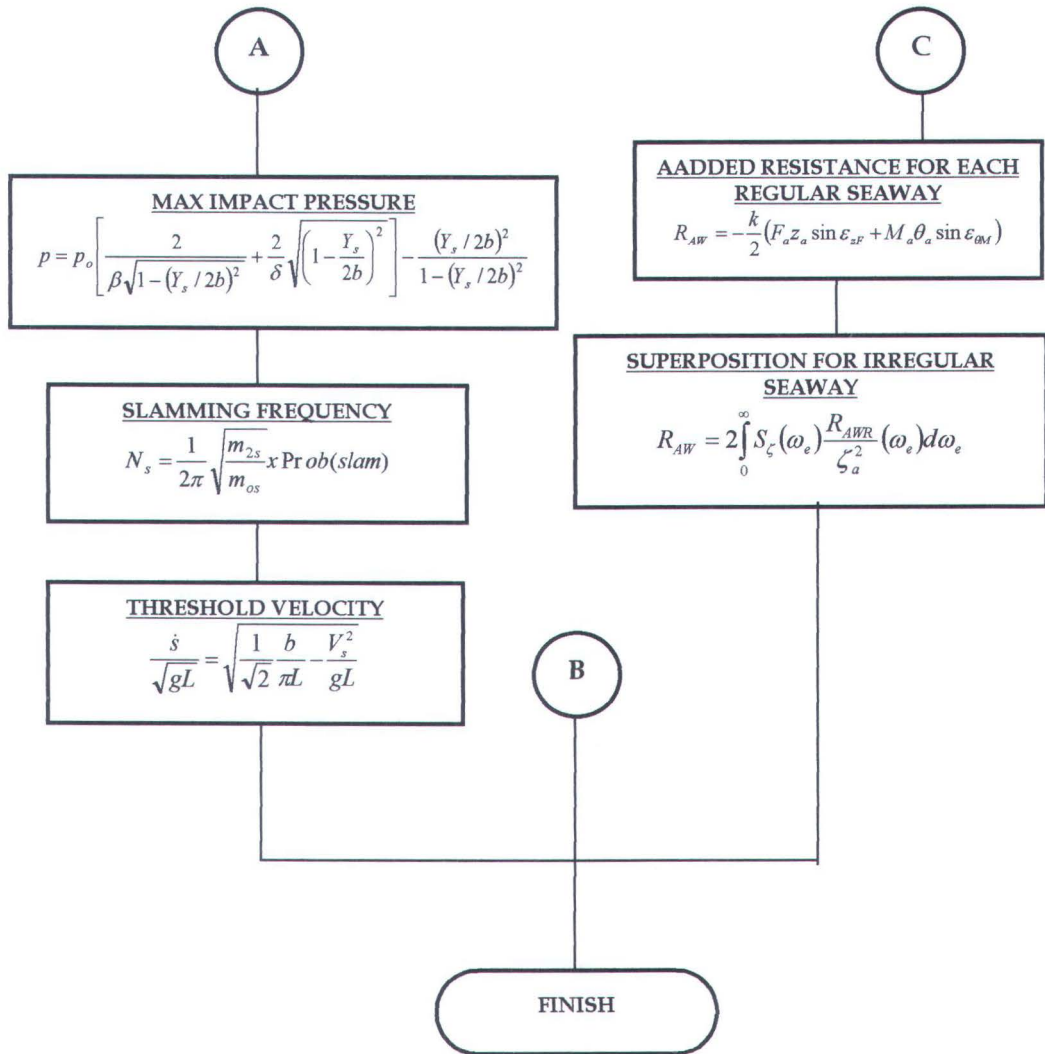


Gambar III.6. Kopel Heaving dan Pitching



C_{2a}





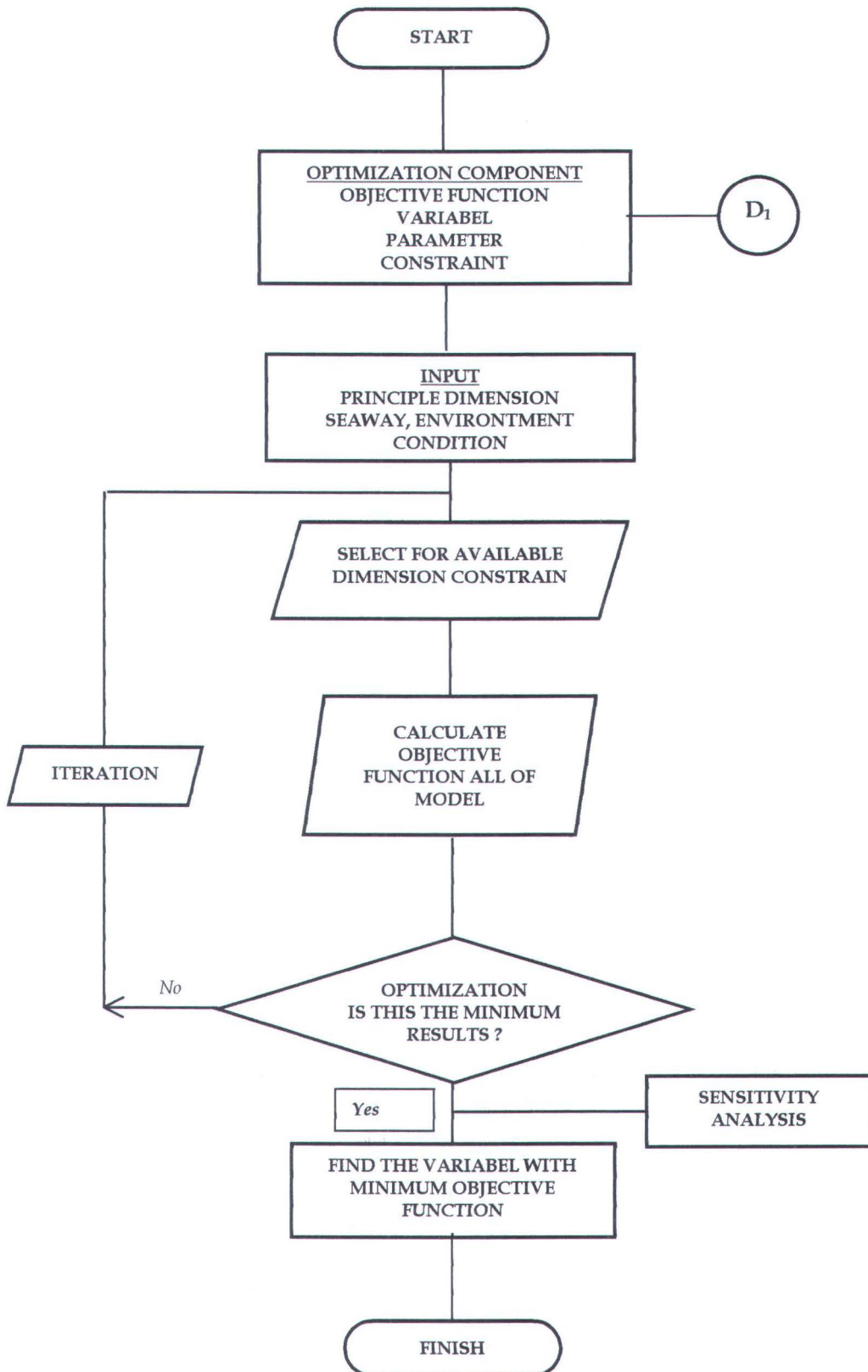
Gambar III.7. Karakteristik Seakeeping

III.2.4. PROSES OPTIMISASI

Proses optimisasi dilakukan dengan memanfaatkan keandalan dari fasilitas *Add-Ins* yang dimiliki oleh Microsoft Excel, yaitu *Microsoft Solver*. Microsoft Solver berdiri sebagai sub toolbars dibawah toolbar *tools*. Untuk proses *installing* solver ini, tidak secara otomatis menyatu dengan excel, tetapi harus dilakukan *installing* tersendiri dari menu *add-ins* yang sudah tersedia dalam *library office*.

Untuk bisa dilakukan proses optimisasi dengan solver ini maka seluruh komponen fungsi objective, parameter, variabel, dan batasan yang ada harus diletakkan dalam format *worksheet cell*. Sehingga hasil perhitungan dengan program visual basic secara temporer dipindahkan ke *sheet excel* yang kemudian setelah didapatkan hasil optimalnya ditarik kembali dalam posisi *text*. Gambaran untuk proses optimisasi dapat diamati pada flowchart diagram yang ada pada gambar III.8.

Hasil optimisasi nantinya berupa variabel ukuran utama kapal yang memiliki minimum fungsi obyektif, dengan memenuhi batasan-batasan yang ditetapkan. Fungsi obyektif yang menjadi target adalah persamaan *added resistance* di gelombang irreguler.

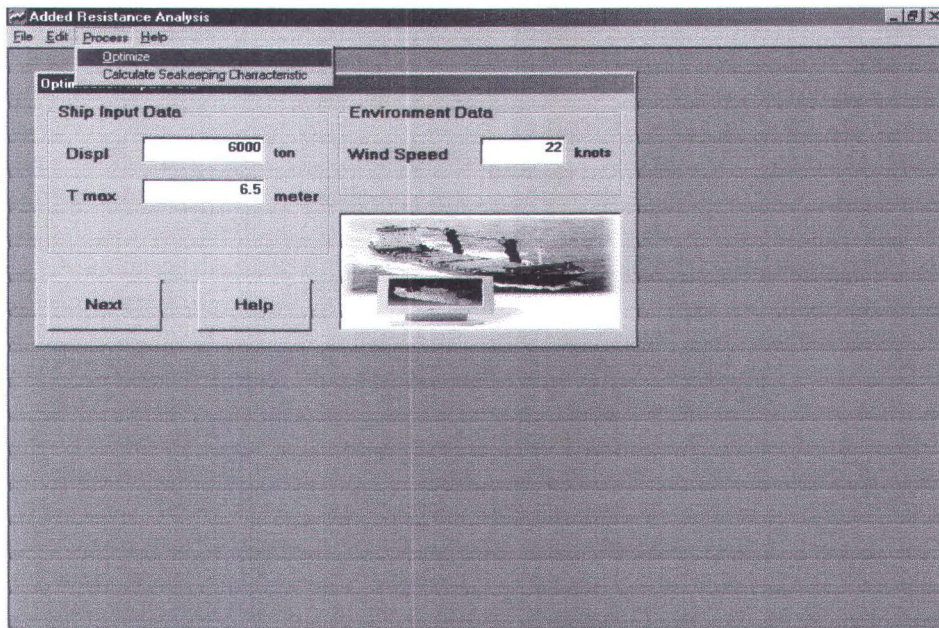


Gambar III.8. Proses optimisasi

III.3. GAMBARAN UMUM PEMANFAATAN PROGRAM

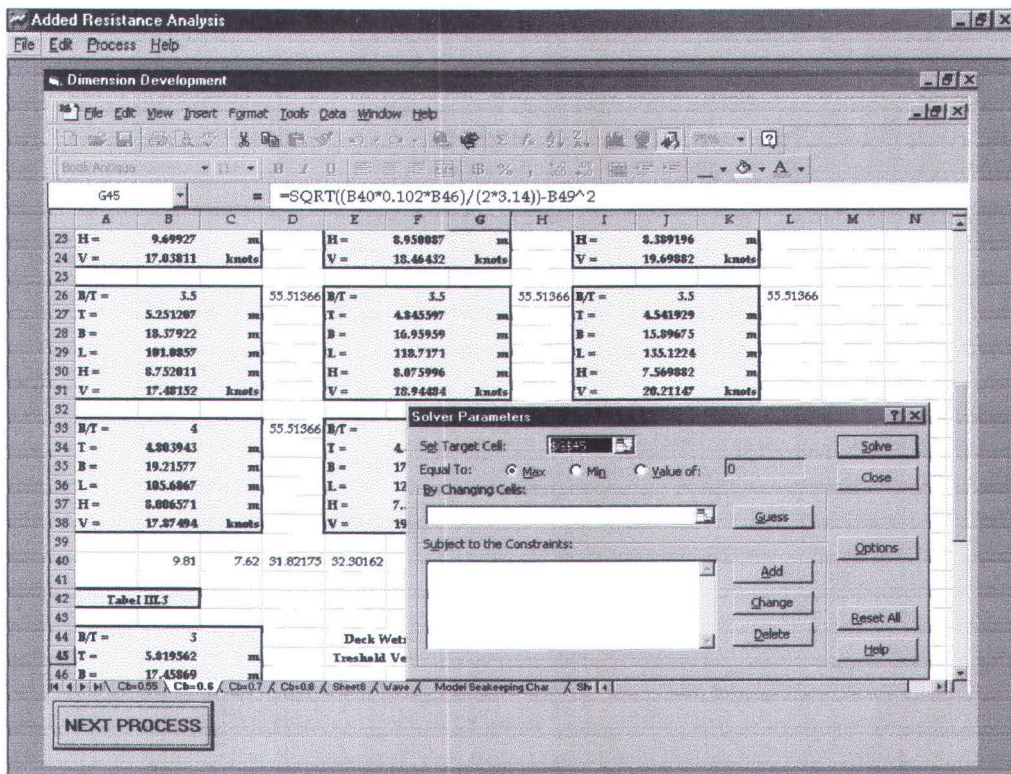
Seperti tujuan yang tercantum pada bagian pendahuluan, maka hasil akhir dari tugas akhir ini adalah sebuah kerangka kerja perangkat lunak yang ditulis dalam bahasa visual basic. Setelah proses yang ada dalam flowchart diterjemahkan menjadi bahasa pemrograman maka program dapat dimanfaatkan untuk menyelesaikan permasalahan pengambilan keputusan untuk menentukan ukuran utama kapal dengan berdasarkan pada prediksi karakteristik yang akan dialami kapal ketika berlayar di gelombang irregular.

Tampilan pertama setelah dijalankan adalah berupa main Form yang memiliki beberapa menu, serta di dalamnya ada *child form* yang merupakan interface untuk memasukkan data awal. Lebih jelasnya dapat diamati gambar berikut ini.



Gambar III.9. Main Form Program

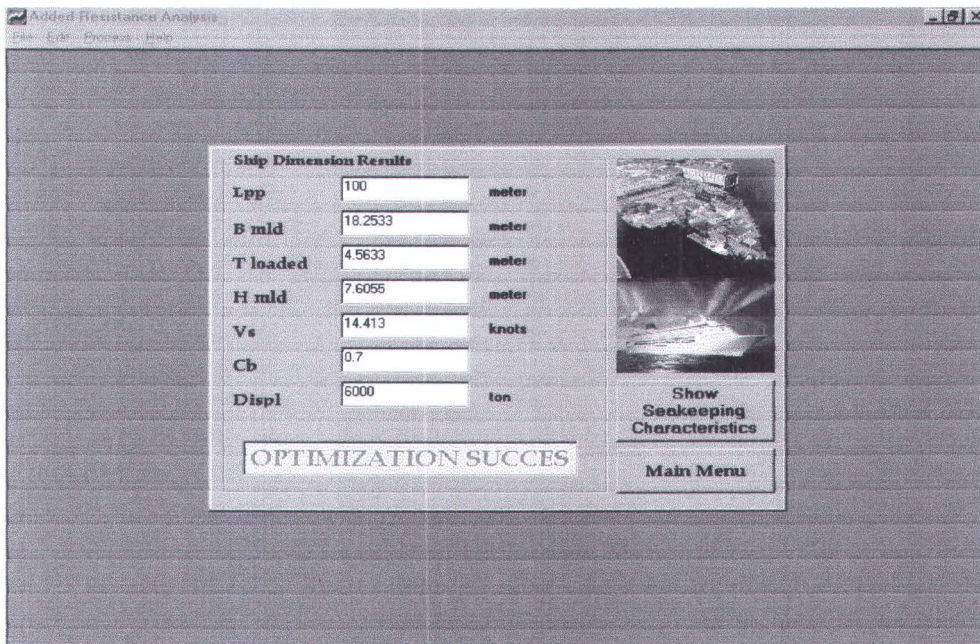
Jika yang hendak dilakukan adalah proses optimisasi maka dari form tersebut setelah dilengkapi datanya maka dapat dilanjutkan ke proses berikutnya dengan melakukan klik pada *commandbutton* Next, maka akan terbuka interface berikutnya yang menunjukkan pengembangan ukuran utama kapal dari suatu input data tertentu.



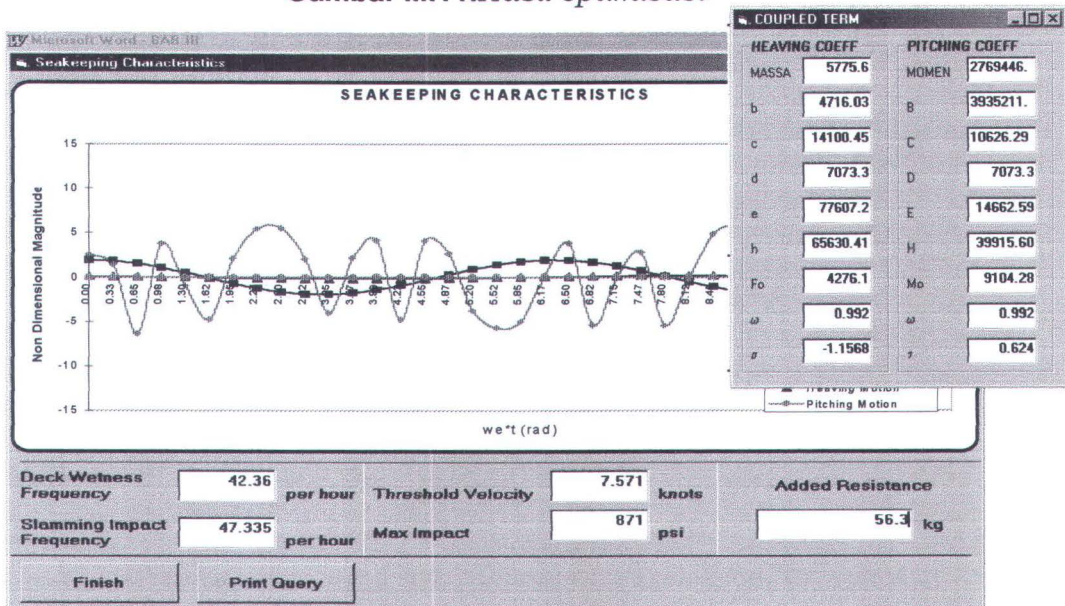
Gambar III.10. Form Dimension Development dan Solver Process

Dari form itu pula tampak adanya interaksi antara visual basic dengan microsoft excel, interaksi dilakukan untuk mengaktifkan fasilitas solver yang akan digunakan untuk menyelesaikan masalah optimisasi.

Berikutnya setelah proses tersebut selesai dilakukan maka akan ditampilkan variabel ukuran utama sebagai hasil optimisasi, dimana variabel tersebut memiliki nilai fungsi obyektif minimum dengan memenuhi batasan yang telah ditetapkan.



Gambar III.11. Hasil optimisasi



Gambar III.12. Tampilan Akhir Karakteristik Seakeeping



III.4 Validasi Hasil Pemrograman

Validasi hasil pemrograman perlu dilakukan supaya dapat diketahui tingkat kesalahan dan keabsahan dari hasil pemrograman. Validasi dilakukan dengan jalan membandingkan hasil perhitungan pemrograman dengan hasil perhitungan yang telah dilakukan sebelumnya yang hasilnya sudah pernah diuji keabsahannya.

Pada hasil pemrograman ini akan dilakukan validasi dengan mengambil pembanding data dan hasil perhitungan yang ada pada referensi yaitu buku karangan Bhattacharyya. Validasi hanya akan dilakukan untuk perhitungan karakteristik seakeeping saja, sedangkan pada perhitungan optimasi tidak dilakukan karena pada pengerjaan tugas akhir ini penulis sudah menggunakan program yang ada dan banyak digunakan secara umum yaitu Microsoft Solver Excel.

Validasi akan dilakukan untuk perhitungan-perhitungan

a. Coupled Heaving dan Pitching

Untuk validasi coupled heaving dan pitching digunakan data sebagai berikut

Lpp	:	19.2 ft
B	:	2.592 ft
Draft	:	1.144 ft
Displacement	:	2837.76 lb
Cb	:	0.8



$$\text{LCG} \quad : \quad +0.48 \text{ ft}$$

$$\text{LCB} \quad : \quad +0.48 \text{ ft}$$

$$V \quad : \quad 4.788 \text{ knots}$$

Dari perhitungan di buku Bhattacharyya didapatkan hasil persamaan heaving sebagai berikut

$$z = 0.03935 \cos(\omega_e t - 89.95^\circ) \text{ ft}$$

dan persamaan pitching

$$\theta = 0.01819 \cos(\omega_e t + 178.42^\circ)$$

Sedangkan dari hasil perhitungan program dihasilkan

$$\theta = 0.01557 \cos(\omega_e t + 167.4442^\circ)$$

Dan

$$z = 0.03765 \cos(\omega_e t - 86.75^\circ) \text{ ft ft}$$

Dari hasil perbandingan terdapat selisih awal harga

$$\Delta z_z = 0.03956 - 0.0375 = 0.00206$$

$$\Delta \theta_\alpha = 0.001819 - 0.001557 = 0.000262$$

b. Frekuensi Deck Wetness

Digunakan data

$$L \quad : \quad 400 \text{ ft}$$

$$\text{Freeboard} \quad : \quad 24 \text{ ft}$$

$$\text{Luasan spektrum gerak} : 73 \text{ ft}^2$$

Hasil perhitungan buku

$$\text{Frekuensi Deck Wetness} = N_w = 0.0026 \text{ per detik}$$

$$= 9.26 \text{ kejadian per jam}$$



Hasil perhitungan program

$$\begin{aligned}\text{Frekuensi Deck Wetness} = N_w &= 0.0029 \text{ per detik} \\ &= 9.36 \text{ kejadian per jam}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{selisih perhitungan} &= 9.360 - 9.26 = 4.06 \text{ kemungkinan} \\ &\text{kejadian}\end{aligned}$$

c. Slamming Pressure

Digunakan data sebagai berikut

$$L \quad : \quad 400 \text{ ft}$$

$$\beta \quad : \quad 10^\circ$$

$$B \quad : \quad 65 \text{ ft}$$

$$T \quad : \quad 0.5 \text{ ft}$$

$$z \quad : \quad 40 \text{ ft / dt}$$

Didapatkan hasil perhitungan buku

$$p_{\max} = 125.456 \text{ psi}$$

dari hasil perhitungan komputer

$$p_{\max} = 129.36 \text{ psi}$$

$$\begin{aligned}\text{selisih perhitungan} &= 125.456 - 117.36 \\ &= 8.096 \text{ psi}\end{aligned}$$

d. Slamming Frequency

Digunakan data

$$L \quad : \quad 550 \text{ ft}$$

$$T \text{ at stat 2} \quad : \quad 17.1 \text{ ft}$$

$$V \quad : \quad 10 \text{ knots}$$



$$2m_{os} \quad : \quad 605 \text{ ft}^2$$

$$2m_{os}' \quad : \quad 305 \text{ ft}^2/\text{det}$$

dari perhitungan referensi didapatkan

$$N_s = 0.041 \text{ per detik}$$

$$= 150 \text{ kejadian per jam}$$

dari perhitungan komputer didapatkan

$$N_s = 0.0419 \text{ per detik}$$

$$= 151 \text{ kali perjam}$$

e. Added Resistance

Digunakan data

$$L \quad = \quad 4.8 \text{ ft}$$

$$B \quad = \quad 0.648 \text{ ft}$$

$$V \quad = \quad 1415 \text{ knots}$$

$$\text{Displ} \quad = \quad 0.7106 \text{ ft}^3$$

$$L_w \quad = \quad L$$

$$Z_a \quad = \quad 0.0307 \text{ ft}$$

$$\theta_a \quad = \quad 0.0404 \text{ rad}$$

didapatkan hasil perhitungan referensi

$$R_{AW} \quad = \quad 0.802 \text{ lb}$$

Dari perhitungan komputer

$$R_{AW} \quad = \quad 0.821 \text{ lb}$$

Tabulasi untuk proses validasi dapat diamati pada tabel III.1. dimana prosentase beda nilai juga ditampilkan.



Tabel III.1. Tabel Validasi

Karakteristik	Hasil perhitungan	Dari Literature	Selisih (%)
Kopel Heave dan Pitch	0.03956	0.0375	5.493333333
Deck Wetness freq.	9.36	9.26	1.079913607
Slamming Pressure	129.36	125.456	3.111847979
Slamming Frequency	151	150	0.666666667
Added Resistance	0.821	0.801	2.496878901

Untuk penyelesaian optimisasi digunakan perangkat lunak yang sudah terintegrasi pada Microsoft Office, yaitu Microsoft Solver Excel. Solver ini menggunakan *Generalized Reduced Gradient* (GRG2) optimisasi non-linier yang dikembangkan oleh Leon Lasdon, University of Texas at Austin, dan Allan Warren, Cleveland State University. Permasalahan-permasalahan linier dan integer diselesaikan dengan metode simplex yang diimplementasikan oleh John Watson dan Dan Fylstra, *Frontline system Inc.*

Penjelasan untuk metode optimisasi non-linier akan dijelaskan pada bagian ini. Proses optimisasi didefinisikan sebagai proses untuk mendapatkan suatu hasil yang relatif lebih baik dari beberapa kemungkinan hasil yang memenuhi syarat-syarat berdasarkan batasan batasan yang ditentukan (*Prajudo, _____*).

Secara umum proses optimisasi dinyatakan sebagai berikut

$$\begin{array}{ll} \text{Fungsi Obyektif} & \min/\max \quad f(x) \\ \text{Variabel} & X = \begin{array}{c} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{array} \end{array}$$



Dengan batasan $g_i(x) \leq 0, \quad i = 1,2,3,\dots,m$

$l_j(x)=0, \quad j = 1,2,3,\dots,p$

Proses optimisasi akan melibatkan

- a. Variabel : Harga yang akan dicari dalam proses optimisasi
- b. Parameter : Harga yang tidak berubah besarnya selama satu kali proses optimisasi karena adanya syarat syarat tertentu
- c. Konstanta : Harga yang tidak berubah besarnya selama proses optimisasi berlangsung
- d. Batasan : Harga batas yang telah ditentukan oleh pihak perencana
- e. Fungsi Obyektif : Fungsi hubungan dari semua atau beberapa variabel yang harganya dioptimumkan.

Metode GRG yang digunakan pada solver didasarkan pada ide eliminasi variabel dengan batasan berupa suatu persamaan (Rao, 1996). Secara teoritis suatu variabel bisa didapat dari pengurangan satu set variabel x_i ($i = n+1, n+2, n+3, \dots, n+m$) untuk tiap $m+1$ batasan yang berasal dari persamaan:

$$h_j(x) + x_{n+j} = 0, \quad j = 1,2,\dots,m$$

$$h_k = 0, \quad k = 1,2,\dots,i$$

Selanjutnya $n+m$ desain variabel dibagi menjadi dua set, sebagai berikut

$$X = \begin{matrix} Y \\ Z \end{matrix}$$



$$Y = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_{n-1} \end{pmatrix} = \text{desain atau independent variabel}$$

$$Y = \begin{pmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \vdots \\ z_{m+1} \end{pmatrix} = \text{state atau dependent variabel}$$

Desain variabel adalah variabel bebas dan state variabel adalah variabel yang tergantung dari desain variabel dan digunakan untuk memenuhi batasan $g_j(x)=0$, $j = 1,2,\dots,m+1$.
Persamaan GRG didefinisikan oleh persamaan

$$G_R = \nabla_y f - ([D]^{-1}[C])^T \nabla_z f$$

Secara geometris, GRG dapat diterangkan sebagai proyeksi dari orisinal n-dimensi gradien ke n-m dimensi daerah feasible yang dijelaskan oleh desain variabel. Fungsi dengan batasan diasumsikan memiliki nilai minimum pada saat komponen yang sesuai dari reduced gradien bernilai nol. G_R dapat digunakan untuk membangkitkan arah pencarian S untuk mengurangi nilai batasan fungsi obyektif, yang sama halnya dengan gradien ∇f dan digunakan untuk membangkitkan arah pencarian S pada fungsi obyektif tanpa batasan. Langkah yang sesuai λ dipilih untuk meminimasi nilai dari f sepanjang arah pencarian S. Untuk suatu



harga λ variabel dependent vektor z disesuaikan dengan menggunakan persamaan

$$DZ = -[D]^{-1}[C]dY$$

Batasan yang didapatkan mungkin tidak tepat nol pada λ , $dg \neq 0$.

Y kemudian dibuat tetap untuk mendapatkan

$$g_i(x) + dg_i(x) = 0, \quad i = 1, 2, \dots, m+1$$

sehingga akhirnya didapatkan

$$dZ = -[D]^{-1} (-g(x) - [C]dY)$$

dengan menyelesaikan persamaan tersebut, selanjutnya digunakan untuk menyesuaikan nilai Z

$$Z_{update} = Z_{current} + dZ$$

Persamaan yang dikembangkan oleh Frontline system Inc diverifikasi dengan menggunakan persoalan optimisasi matematis murni sebagai berikut

Uji 1. [Rao,1990]

$$\text{Min } Z = x_1^3 - 6x_1^2 + 11x_1 + x_3$$

s.t

$$x_1^2 + x_2^2 - x_3^2 \leq 0$$

$$4 - x_1^2 - x_2^2 - x_3^2 \leq 0$$

$$x_3 - 5 \leq 0$$

$$x_1, x_2, x_3 \geq 0$$

Dengan menggunakan titik awal

$$X_0 = [x_1 \ x_2 \ x_3]^T = [0.1 \ 0.1 \ 3.0]^T$$



Penyelesaian optimal didapatkan sebagai berikut

$$X^* = [x_1 \ x_2 \ x_3]^T = [0.0 \ 1.41421 \ 1.41421]$$

Dan nilai fungsi tujuan

$$f(x) = 1.41422$$

Uji 2. [Bunday,1987]

$$\text{Min} \quad Z = x_1^2 + x_2^2$$

s.t

$$x_1 + x_2 = 4$$

$$x_1, x_2 \geq 0$$

Dengan menggunakan titik awal

$$X_0 = [x_1 \ x_2]^T = [1.89 \ 1.89]^T$$

Penyelesaian optimal

$$X^* = [x_1 \ x_2]^T = [2.000 \ 2.000]^T$$

Dengan nilai fungsi obyektif

$$f^*(x) = 8.000$$

III.4. Analisis Hasil Validasi

Dari hasil pengamatan perbandingan hasil yang telah dilakukan maka dapat hal yang perlu mendapat perhatian adalah

- a. Hasil menunjukkan perbedaan yang tidak terlalu mencolok. Hal ini disebabkan karena metode perhitungan yang dipergunakan sama, sampai pada tingkat penggunaan formula.



- b. Perbedaan hasil yang timbul lebih banyak disebabkan karena
1. Pembulatan yang dilakukan oleh komputer selama berproses.
 2. Pengambilan data pengembangan ukuran kapal yang diambil dari series 60 telah mengalami regresi sebelumnya.
 3. Kemungkinan selisih data pada added mass dan added damping. Hal ini terjadi karena perhitungan yang dilakukan Bhattacharyya menggunakan data primer, dan program menggunakan data sekunder.

إنما أمره: إذا أراد شيئاً أن يقول له كن فيكون ○
(يس: ٨٢)

Sesungguhnya perintah-Nya apabila Dia menghendaki sesuatu hanyalah berfirman kepadanya "Jadilah", maka terjadilah ia (QS. Yasiin : 82)



Bab IV

Pemodelan Optimisasi dan Analisis Sensitivitas



BAB IV

PEMODELAN OPTIMISASI DAN ANALISIS SENSITIVITAS

IV.1. Umum

Bab ini berisikan tahapan penyusunan model optimisasi dari sistem perencanaan ukuran utama kapal yang diintegrasikan dengan karakteristik *added resistance* yang dialami kapal di gelombang irreguler. Konsep pemodelan yang dilakukan pada sistem diusahakan serealistis mungkin dengan melakukan pendekatan-pendekatan dan asumsi-asumsi secara matematis.

IV.2 Konsep Pemodelan

Model secara umum diklasifikasikan menjadi dua, yaitu model fisik dan model matematis. Perencanaan kapal dengan membuat kapal dengan ukuran yang diperkecil, dengan bantuan skala, yang kemudian diujikan di tangki pengujian disebut pemodelan fisik. Sedangkan pemodelan yang lebih berorientasi pada bentuk abstrak suatu obyek dengan menggunakan bentuk



simbol aljabar atau matematik disebut model matematik. Pada saat ini model matematis secara luas lebih banyak digunakan dalam proses riset operasi.

Model matematis lebih banyak digunakan karena memiliki banyak kelebihan, antara lain:

- a. Pada saat penyusunan proses model, peneliti akan mendapatkan banyak informasi tentang obyek yang dijadikan model, sehingga akan menambah pemahaman tentang model.
- b. Setelah model disusun, dapat dilakukan analisis secara matematis yang lebih berguna dan bermanfaat dalam pengambilan keputusan. Hal ini dimungkinkan karena seluruh variabel dan/atau parameter yang digunakan dapat diidentifikasi sejauh mungkin.
- c. Dengan sifatnya yang abstrak, dapat dengan mudah dilakukan eksperimen. Hal ini disebabkan eksperimen yang bersifat operasional (kondisi nyata) tidak mungkin dapat dilaksanakan karena suatu alasan, misalnya keselamatan.

Filosofi penting yang harus diperhatikan dalam penyusunan model adalah model yang dikembangkan harus mencerminkan suatu realita obyek pengamatan, artinya seluruh perilaku model harus dapat diterjemahkan sesempurna mungkin dalam model



matematis. Hal ini dimaksudkan untuk mencegah kesalahan dalam interpretasi keluaran model [Achmadi, Prajudo, 1993].

IV.3 Pemodelan untuk Karakteristik *Added Resistance*

Tujuan utama dari tugas akhir ini adalah penyusunan suatu kerangka kerja perangkat lunak yang dapat digunakan untuk pengambilan keputusan dalam penentuan ukuran utama kapal yang memiliki minimum *added resistance* dengan karakteristik seakeeping yang tetap optimal. Fungsi obyektif proses optimisasi ini adalah mencari nilai minimum *added resistance* dengan menyertakan kriteria teknis pada analisis seakeeping. Dengan menggunakan proses optimisasi diharapkan akan didapatkan ukuran utama kapal yang memiliki tingkah laku dinamis yang baik di perairan irreguler dengan meminimalkan terjadinya *added resistance*.

IV.3.1 Komponen Penyusun Fungsi Obyektif

Komponen penyusun fungsi obyektif untuk perhitungan *Added Resistance* dapat dilihat dalam persamaan dasar Havelock (Bhattacharyya, 1978)

$$R_{AW} = \frac{\omega_e^3}{2g} (b_z z_a^2 + b_\theta \theta_a^2) \quad (3.1)$$

dimana didalamnya terdapat komponen damping untuk heaving maupun pitching. Dalam perkembangan selanjutnya Joosen (Joosen, WPA, 1966) menguraikan komponen persamaan tersebut

menjadi persamaan detail untuk prediksi besarnya *added resistance* yang terjadi di gelombang reguler dengan persamaan

$$R_{AW} = 2 \sum_{\omega_e} S_{\zeta}(\omega_e) \frac{\rho g \zeta_a^2 (B^2 / L) \left(\frac{L^2}{32 B^2} \right) \left[\left(\frac{z_a}{\zeta_a} \right)^2 P_1 + \frac{\pi^2 L^2}{L_w^2} \left(\frac{\theta_a L_w}{2\pi \zeta_a} \right)^2 P_3 - \frac{2\pi L}{L_w} \left(\frac{L_w \theta_a}{2\pi \zeta_a} \right) \left(\frac{z_a}{\zeta_a} \right) P_2 \cos \varepsilon \right]}{\zeta_a^2} (\omega_e) \quad (4.2)$$

dimana

$$P_1 = \frac{\omega_e^3}{\rho g^2} \frac{2}{L} \rho \nabla \sqrt{\frac{g}{L}} B_{33}$$

$$P_2 = \frac{\omega_e^3}{\rho g^2} \frac{2}{L} \rho \nabla \sqrt{\frac{g}{L}} (B_{35} + B_{53})$$

$$P_3 = \frac{\omega_e^3}{\rho g^2} \frac{2}{L} \rho \nabla \sqrt{\frac{g}{L}} B_{55}$$

dengan komponen koefisien damping B_{33} , B_{35} , B_{53} , dan B_{55} adalah

$$B_{33} = \frac{1}{\omega_e \nabla} \sqrt{\frac{g}{L}} \int b_n d\xi$$

$$B_{35} + B_{53} = \frac{2}{\omega_e \nabla} \sqrt{\frac{g}{L}} \int \xi b_n d\xi$$

$$B_{55} = \frac{1}{\omega_e \nabla} \sqrt{\frac{g}{L}} \int \xi^2 b_n d\xi$$

Sehingga fungsi obyektif yang dicari adalah

Minimumkan z

dimana z

$$2 \sum_{\omega_e} S_{\zeta}(\omega_e) \frac{\rho g \zeta_a^2 (B^2 / L) \left(\frac{L^2}{32 B^2} \right) \left[\left(\frac{z_a}{\zeta_a} \right)^2 P_1 + \frac{\pi^2 L^2}{L_w^2} \left(\frac{\theta_a L_w}{2\pi \zeta_a} \right)^2 P_3 - \frac{2\pi L}{L_w} \left(\frac{L_w \theta_a}{2\pi \zeta_a} \right) \left(\frac{z_a}{\zeta_a} \right) P_2 \cos \varepsilon \right]}{\zeta_a^2} (\omega_e)$$

dengan banyaknya frekuensi encounter tergantung irregularitas gelombang.



IV.3.2 Komponen Variabel

Pada tahap perencanaan kapal, proses desain konsep dilakukan sebelum tahapan desain lain yang lebih detail. Keadaan ini berpengaruh terhadap batasan variabel yang disertakan dalam proses optimisasi. Secara umum variabel yang terlibat adalah ukuran utama kapal yaitu

- Lpp** : panjang kapal
- B** : lebar kapal
- T** : sarat kapal
- H** : tinggi kapal
- Cb** : koefisien blok

IV.3.3 Komponen Parameter

Komponen parameter yang dilibatkan disini terdiri dari dua bagian, yaitu

a. Parameter kondisi lingkungan laut

- Vw** : kecepatan angin
- w_e** : frekuensi encounter (gelombang irreguler)
- n** : jumlah variasi gelombang reguler pembentuk gelombang irreguler

b. Parameter interaktif kapal dengan gelombang

- μ** : heading angle

IV.3.4 Komponen Batasan

Batasan yang digunakan dalam proses optimisasi ada dua bagian yaitu :

a. Batasan teknis kapal

Batasan ini merupakan karakteristik fisik dari model kapal, sehingga desain yang dihasilkan lebih rasional. Karakteristik fisik yang digunakan disini mengacu pada pengujian model lambung yang telah dilakukan sesuai dengan *Series 60* (Todd, F, H, 1960)

Adapun batasan teknis tersebut adalah

$$\text{Rasio } \frac{B}{T} \quad : \quad 2 \leq B/T \leq 4$$

$$\text{Rasio } \frac{L}{B} \quad : \quad 5.5 \leq L/B \leq 8.5$$

$$C_b \quad : \quad 0.6 \leq C_b \leq 0.8$$

b. Batasan Operasional

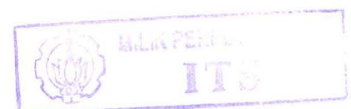
Batasan operasional disini adalah batasan untuk perilaku dinamis yang terjadi ketika kapal beroperasi di perairan bebas. Adapun kondisi tersebut adalah

$$\text{Deck Wetness} \quad : \quad S_{\xi} + H - T > 0$$

$$\text{Treshold Velocity} \quad : \quad v_s < \sqrt{\frac{gb}{2\pi}} - v_s$$

$$\text{Deck Wetness Period} \quad : \quad 30 / \text{hour}$$

$$\text{Slamming} \quad : \quad 20 / \text{hour}$$





IV.4 Alternatif Pemodelan Proses Optimisasi

Untuk proses optimisasi yang dilakukan, ditentukan beberapa alternatif untuk pembentukan lambung kapal. Pembentukan lambung kapal sendiri menggunakan metode dari series 60 dengan memanfaatkan data entrance bentuk lambung untuk 20 station kapal.

Adapun macam variasi pembentukan lambung dapat diamati pada tabel berikut ini:

Cb = 0.6								
B/T = 2			B/T = 3			B/T = 4		
5.5	7.5	8.5	5.5	7.5	8.5	5.5	7.5	8.5
Cb = 0.7								
B/T = 2			B/T = 3			B/T = 4		
5.5	7.5	8.5	5.5	7.5	8.5	5.5	7.5	8.5
Cb = 0.8								
B/T = 2			B/T = 3			B/T = 4		
5.5	7.5	8.5	5.5	7.5	8.5	5.5	7.5	8.5

Tabel IV.1. Variasi Model Lambung interval series 60

IV.5 Analisis Sensitivitas Pola Optimisasi

Sub bab ini berisikan tentang proses pemilihan alternatif terbaik dari beberapa model yang telah disusun sebelumnya. Model yang disusun berupa model linier, dimana model ini akan memiliki nilai optimum pada daerah tertentu. Untuk mendapatkan nilai optimum model, digunakan alat bantu perangkat lunak "SOLVER" yang terdapat dalam fasilitas *Add-Ins* pada Microsoft



Excel, yang kemudian dilanjutkan dengan analisis sensitivitas untuk mencari kemungkinan perubahan nilai fungsi obyektif sebagai akibat adanya perubahan komponen penyusun model. Untuk analisis ini akan diujikan sebuah dimensi model kapal dengan input displasemen kapal. Sebagai catatan perlu ditambahkan bahwa contoh model ini bukan diambil dari suatu acuan desain kapal yang sudah ada, demi mempermudah pengujian optimisasi.

IV.5.1 Penentuan Dimensi Awal

Penentuan dimensi awal berawal dari input untuk displasemen yang diminta. Untuk contoh kasus diambil data input sebagai berikut:

Displacement : 6000 ton
Wind speed : 22 knots
 T_{max} : 6 meter

Variasi 5 gelombang reguler sebagai berikut:

Tabel IV.2 Tabel Variasi Gelombang reguler

L_w/L [-] (1)	L_w [m] (2)	Regular Wave		k [-] (5)
		h_w [m] (3)	ζ_a [m] (4)	
0.75	60.96	3.05	1.52	0.1031
0.875	85.34	4.27	2.13	0.0736
1.00	97.54	4.88	2.44	0.0644
1.125	109.73	5.49	2.74	0.0573
1.25	121.92	6.10	3.05	0.0515



Dari data awal tersebut, dengan menggunakan batasan dari series 60 dilakukan penentuan ukuran utama awal yang akan dioptimisasi nantinya. Adapun perhitungan untuk penyelesaian ukuran utama adalah sebagai berikut:

$$Displ = L * B * T * Cb * \gamma \quad (4.3)$$

dimana:

L : *Length between perpendiculars*

B : *Breadth*

T : *Draft*

Cb : *Block Coefficient*

γ : *berat jenis air laut*

γ : 1.025 ton/m³

Selanjutnya sesuai dengan tabel variasi pembentukan lambung pada tabel (III.1), dilakukan perhitungan pembentukan lambung, dengan memasukkan karakteristik perbandingan ukuran utama kapal kedalam persamaan (3.3), didapatkan

$$Displ = L/B * B/T * T^2 * B * Cb * \gamma \quad (4.4)$$

sehingga untuk $Displ$, L/B , B/T , Cb , dan γ yang sudah diketahui maka dari persamaan tersebut dapat ditentukan nilai

$$BT^2 = \frac{Displ}{L/B * B/T * Cb * \gamma} \quad (4.5)$$



dengan nilai B/T yang sudah diketahui dapat ditentukan nilai T dan/atau B. Sehingga selanjutnya didapatkan seluruh dimensi utama untuk satu kapal. Demikian proses berulang sampai batas batas yang diberikan oleh series 60 terpenuhi semua. Dengan mengacu pada tabel (III.1), maka untuk keseluruhan proses penentuan ukuran utama awal akan terbentuk 45 buah ukuran utama kapal.

Dari 45 data tersebut diambil data yang memiliki nilai T dibawah nilai maksimum yang telah ditetapkan. Ini dilakukan mengingat sarat berhubungan dengan kedalaman perairan tempat beroperasinya kapal.

IV.5.1 Perhitungan Fungsi Obyektif dan Batasan

Sesuai dengan perhitungan dari dasar teori, maka dilakukan perhitungan fungsi obyektif dan batasan batasan untuk masing masing nilai awal ukuran utama. Jadi setelah dilakukan sortir untuk T_{max} , didapatkan nilai fungsi obyektif untuk *added resistance* sebanyak 34 nilai.

Demikian juga untuk batasan batasan yang digunakan, yaitu *threshhold velocity*, *Slamming period*, dan *deck wetness period*, dilakukan perhitungan secara individu terhadap masing-masing *initial value* untuk tiap ukuran utama kapal.

Proses perhitungan tersebut dilakukan dengan jalan mengaktifkan Solver Parameters dari Add-Ins facility yang dimiliki



oleh Excel. Hasil dari running Solver ini berupa fungsi obyektif dan nilai akhir dari masing-masing variabel ukuran utama kapal.

Pengamatan terhadap sensitivitas perubahan variabel ukuran utama kapal dapat diamati pada analisis sensitivitas setelah proses optimisasi selesai. Dari proses ini pula dapat diamati nilai variabel ukuran utama kapal yang memiliki minimum *added resistance* dengan tetap memenuhi batasan-batasan teknis operasional. Detail hasil optimisasi dapat diamati pada bagian akhir dari Bab IV.

IV.6. ANALISIS DAN PEMBAHASAN

Dari hasil proses optimisasi yang dilakukan dengan fungsi obyektif *added resistance* dan *target value*-nya adalah minimum, dapat diamati pada IV.1, IV.2, maupun IV.3 bahwa masing masing komponen ratio ukuran kapal mempunyai pengaruh yang signifikan terhadap perubahan karakteristik *added resistance* yang dialami kapal.

Jika kemudian dari masing-masing grafik hubungan karakteristik *added resistance* maka akan didapatkan fungsi yang memberikan pengaruh perubahan nilai *added resistance* yang cukup signifikan. Dari contoh untuk pengambilan trendline regresi linear dari grafik pada gambar IV.1 untuk C_b konstan dan perubahan B/T untuk masing-masing L/B didapatkan fungsi hubungan untuk *added resistance*



$$y = 22.683x + 238.77$$

$$y = 17.035x + 172.52$$

$$y = 11.07x + 116.5$$

Gradien dari fungsi fungsi tersebut menunjukkan gradien yang sangat tajam. Interpretasi dari keadaan tersebut adalah bahwa ketika perancang kapal melakukan perubahan ukuran kapal dan terjadi perubahan nilai B/T maka perlu ditinjau kembali prediksi terhadap kemungkinan perubahan added resistance yang akan terjadi.

Kondisi-kondisi tersebut juga berlaku pada perubahan rasio L/B dan perubahan Cb. Hal itu dapat diamati pada trendline dari regresi linier untuk kondisi-kondisi sebagai berikut

- a. Cb tetap B/T berubah untuk masing-masing L/B
- b. B/T tetap L/B berubah untuk masing-masing Cb
- c. B/T tetap dan Cb berubah untuk masing-masing L/B

Dari hasil pengamatan terhadap analisis sensitivitas masing-masing kondisi maka dapat ditarik kesimpulan bahwa

- a. Setiap komponen parameter kapal baik Cb, B/T, maupun, L/B akan memberikan pengaruh yang signifikan terhadap perubahan karakteristik added resistance yang ditimbulkan.



- b. Dari kesimpulan pada poin a, maka pada proses perencanaan kapal hendaknya perancang perlu memperhitungkan kembali kemungkinan perubahan karakteristik seakeeping yang terjadi, jika perancang melakukan perubahan parameter kapal dengan asumsi displacement konstan.
- c. Bila dilakukan perubahan terhadap parameter kapal dengan tanpa melakukan perhitungan ulang terhadap karakteristik seakeeping yang mungkin terjadi maka kemungkinan besar kapal akan mempunyai tingkah laku dinamis yang kurang optimal di perairan yang direncanakan, lebih jauh lagi kerugian yang ditimbulkan antara lain kapal akan mengalami kesulitan untuk mempertahankan kecepatannya, naiknya air ke geladak yang terlalu sering dapat merusak muatan, dan frekuensi slamming yang melebihi batasan operasional dapat mengakibatkan ketahanan material lambung menurun.

DWT = 7807 ton
 Cb = 0.6
 L/B = 5.5

$\gamma = 1.025 \text{ ton/m}^3$
 L/B = 7.00

L/B = 8.5

B/T =	2	55.51366
T =	8.325215 m	
B =	16.65043 m	
L =	91.57737 m	
H =	13.87536 m	
V =	16.63905 knots	

B/T =	2	55.51366
T =	7.682166 m	
B =	15.36433 m	
L =	107.5503 m	
H =	12.80361 m	
V =	18.03185 knots	

B/T =	2	55.51366
T =	7.200733 m	
B =	14.40147 m	
L =	122.4125 m	
H =	12.00122 m	
V =	19.23743 knots	

B/T =	2.5	55.51366
T =	7.174453 m	
B =	17.93613 m	
L =	98.64873 m	
H =	11.95742 m	
V =	17.26951 knots	

B/T =	2.5	55.51366
T =	6.62029 m	
B =	16.55072 m	
L =	115.8551 m	
H =	11.03382 m	
V =	18.71509 knots	

B/T =	2.5	55.51366
T =	6.205404 m	
B =	15.51351 m	
L =	131.8648 m	
H =	10.34234 m	
V =	19.96636 knots	

B/T =	3	55.51366
T =	6.353328 m	
B =	19.05998 m	
L =	104.8299 m	
H =	10.58888 m	
V =	17.80233 knots	

B/T =	3	55.51366
T =	5.86259 m	
B =	17.58777 m	
L =	123.1144 m	
H =	9.770983 m	
V =	19.29251 knots	

B/T =	3	55.51366
T =	5.495188 m	
B =	16.48556 m	
L =	140.1273 m	
H =	9.158646 m	
V =	20.58238 knots	

B/T =	3.5	55.51366
T =	5.732844 m	
B =	20.06495 m	
L =	110.3572 m	
H =	9.554739 m	
V =	18.26563 knots	

B/T =	3.5	55.51366
T =	5.290032 m	
B =	18.51511 m	
L =	129.6058 m	
H =	8.81672 m	
V =	19.79459 knots	

B/T =	3.5	55.51366
T =	4.958512 m	
B =	17.35479 m	
L =	147.5157 m	
H =	8.264186 m	
V =	21.11803 knots	

B/T =	4	55.51366
T =	5.244557 m	
B =	20.97823 m	
L =	115.3803 m	
H =	8.740928 m	
V =	18.6767 knots	

B/T =	4	55.51366
T =	4.839461 m	
B =	19.35784 m	
L =	135.5049 m	
H =	8.065769 m	
V =	20.24006 knots	

B/T =	4	55.51366
T =	4.536178 m	
B =	18.14471 m	
L =	154.23 m	
H =	7.560296 m	
V =	21.59329 knots	

Contoh Pengembangan Ukuran Utama Cb = 0.6

DWT = 7807 ton
 Cb = 0.7
 L/B = 5.5

$\gamma = 1.025 \text{ ton/m}^3$
 L/B = 7.00

L/B = 8.5

B/T = 2
 T = 7.90824 m
 B = 15.81648 m
 L = 86.99064 m
 H = 13.1804 m
 V = 13.41614 knots

45.9258

B/T = 2
 T = 7.297399 m
 B = 14.5948 m
 L = 102.1636 m
 H = 12.16233 m
 V = 14.53916 knots

45.9258

B/T = 2
 T = 6.840079 m
 B = 13.68016 m
 L = 116.2813 m
 H = 11.40013 m
 V = 15.51123 knots

45.9258

B/T = 2.5
 T = 6.815115 m
 B = 17.03779 m
 L = 93.70783 m
 H = 11.35853 m
 V = 13.92449 knots

45.9258

B/T = 2.5
 T = 6.288708 m
 B = 15.72177 m
 L = 110.0524 m
 H = 10.48118 m
 V = 15.09006 knots

45.9258

B/T = 2.5
 T = 5.894601 m
 B = 14.7365 m
 L = 125.2603 m
 H = 9.824336 m
 V = 16.09897 knots

45.9258

B/T = 3
 T = 6.035117 m
 B = 18.10535 m
 L = 99.57943 m
 H = 10.05853 m
 V = 14.3541 knots

45.9258

B/T = 3
 T = 5.568958 m
 B = 16.70687 m
 L = 116.9481 m
 H = 9.281596 m
 V = 15.55564 knots

45.9258

B/T = 3
 T = 5.219957 m
 B = 15.65987 m
 L = 133.1089 m
 H = 8.699929 m
 V = 16.59567 knots

45.9258

B/T = 3.5
 T = 5.44571 m
 B = 19.05998 m
 L = 104.8299 m
 H = 9.076183 m
 V = 14.72766 knots

45.9258

B/T = 3.5
 T = 5.025077 m
 B = 17.58777 m
 L = 123.1144 m
 H = 8.375128 m
 V = 15.96047 knots

45.9258

B/T = 3.5
 T = 4.710161 m
 B = 16.48556 m
 L = 140.1273 m
 H = 7.850268 m
 V = 17.02757 knots

45.9258

B/T = 4
 T = 4.981879 m
 B = 19.92752 m
 L = 109.6013 m
 H = 8.303132 m
 V = 15.05911 knots

45.9258

B/T = 4
 T = 4.597073 m
 B = 18.38829 m
 L = 128.718 m
 H = 7.661789 m
 V = 16.31966 knots

45.9258

B/T = 4
 T = 4.30898 m
 B = 17.23592 m
 L = 146.5053 m
 H = 7.181633 m
 V = 17.41077 knots

45.9258

Contoh Pengembangan Ukuran Utama Cb = 0.7

DWT = 7807 ton
 Cb = 0.8
 L/B = 5.5

$\gamma = 1.025 \text{ ton/m}^3$
 L/B = 7.00

L/B = 8.5

B/T =	2
T =	7.56396 m
B =	15.12792 m
L =	83.20356 m
H =	12.6066 m
V =	10.38164 knots

36.33795

B/T =	2
T =	6.979711 m
B =	13.95942 m
L =	97.71595 m
H =	11.63285 m
V =	11.25065 knots

36.33795

B/T =	2
T =	6.5423 m
B =	13.0846 m
L =	111.2191 m
H =	10.90383 m
V =	12.00286 knots

36.33795

B/T =	2.5
T =	6.518423 m
B =	16.29606 m
L =	89.62832 m
H =	10.86404 m
V =	10.77501 knots

36.33795

B/T =	2.5
T =	6.014932 m
B =	15.03733 m
L =	105.2613 m
H =	10.02489 m
V =	11.67695 knots

36.33795

B/T =	2.5
T =	5.637983 m
B =	14.09496 m
L =	119.8071 m
H =	9.396639 m
V =	12.45766 knots

36.33795

B/T =	3
T =	5.772382 m
B =	17.31715 m
L =	95.2443 m
H =	9.620636 m
V =	11.10745 knots

36.33795

B/T =	3
T =	5.326516 m
B =	15.97955 m
L =	111.8568 m
H =	8.877527 m
V =	12.03722 knots

36.33795

B/T =	3
T =	4.992709 m
B =	14.97813 m
L =	127.3141 m
H =	8.321182 m
V =	12.84202 knots

36.33795

B/T =	3.5
T =	5.208634 m
B =	18.23022 m
L =	100.2662 m
H =	8.681057 m
V =	11.39652 knots

36.33795

B/T =	3.5
T =	4.806313 m
B =	16.8221 m
L =	117.7547 m
H =	8.010522 m
V =	12.35049 knots

36.33795

B/T =	3.5
T =	4.505107 m
B =	15.76787 m
L =	134.0269 m
H =	7.508512 m
V =	13.17623 knots

36.33795

B/T =	4
T =	4.764996 m
B =	19.05998 m
L =	104.8299 m
H =	7.94166 m
V =	11.653 knots

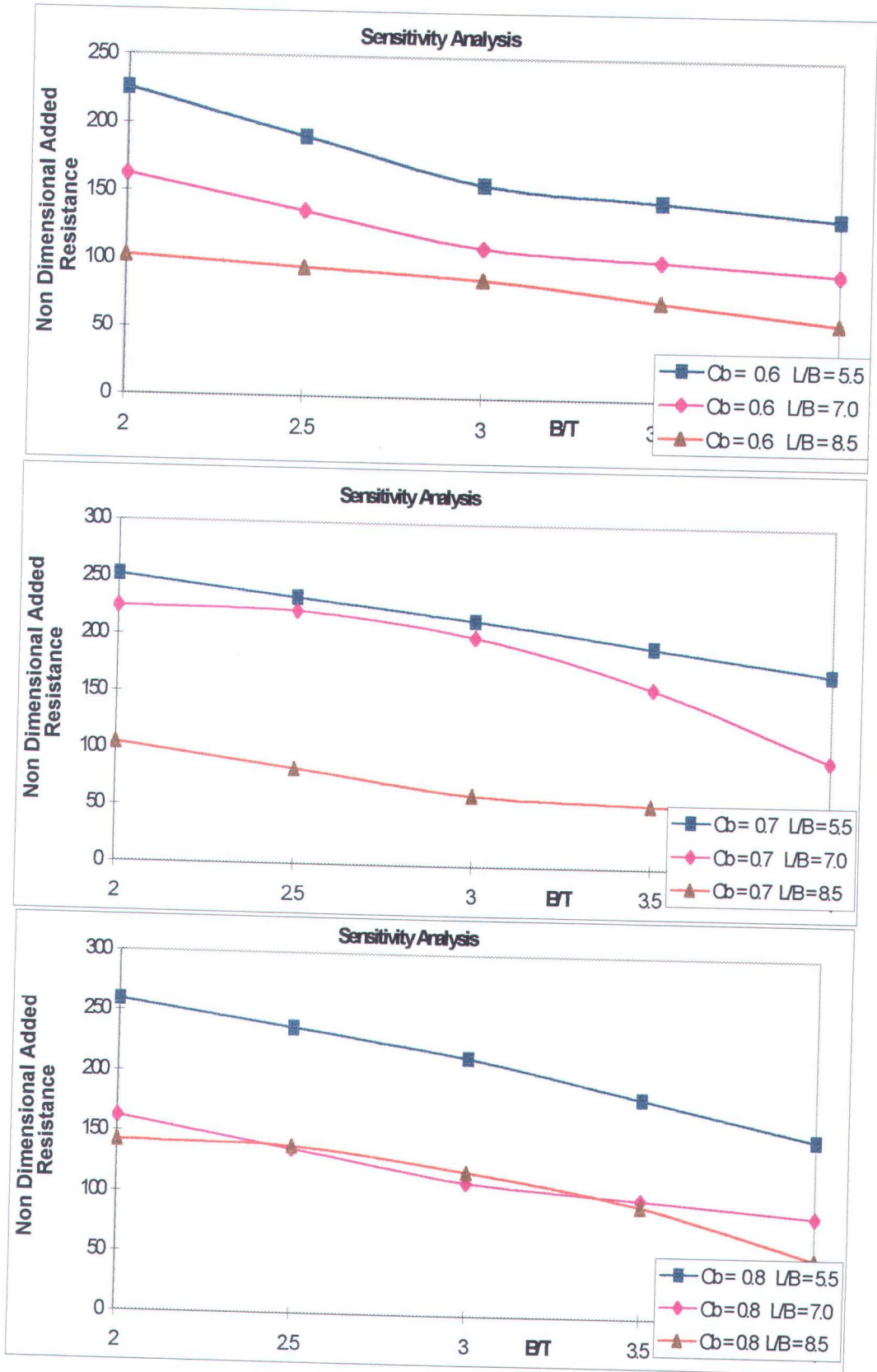
36.33795

B/T =	4
T =	4.396942 m
B =	17.58777 m
L =	123.1144 m
H =	7.328237 m
V =	12.62843 knots

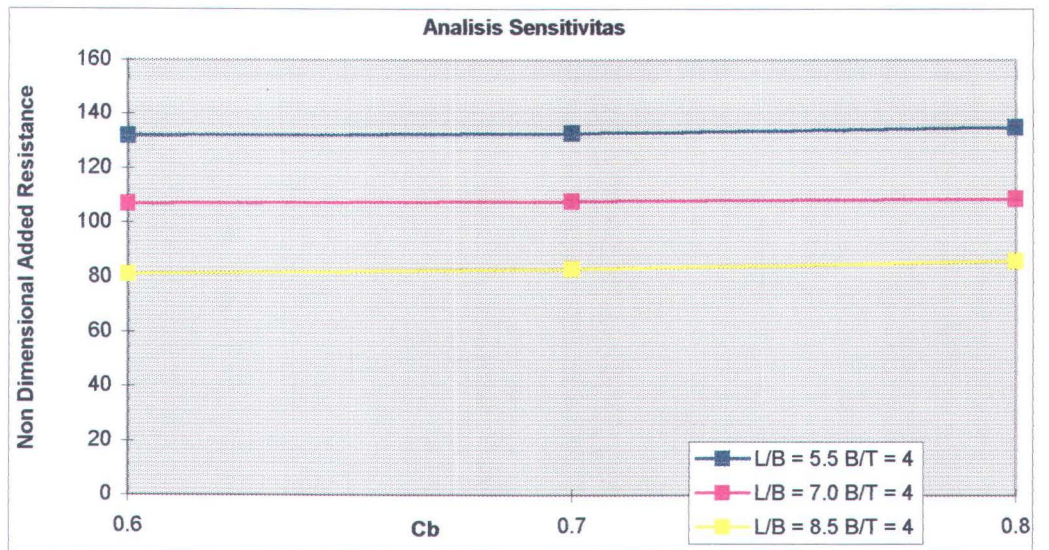
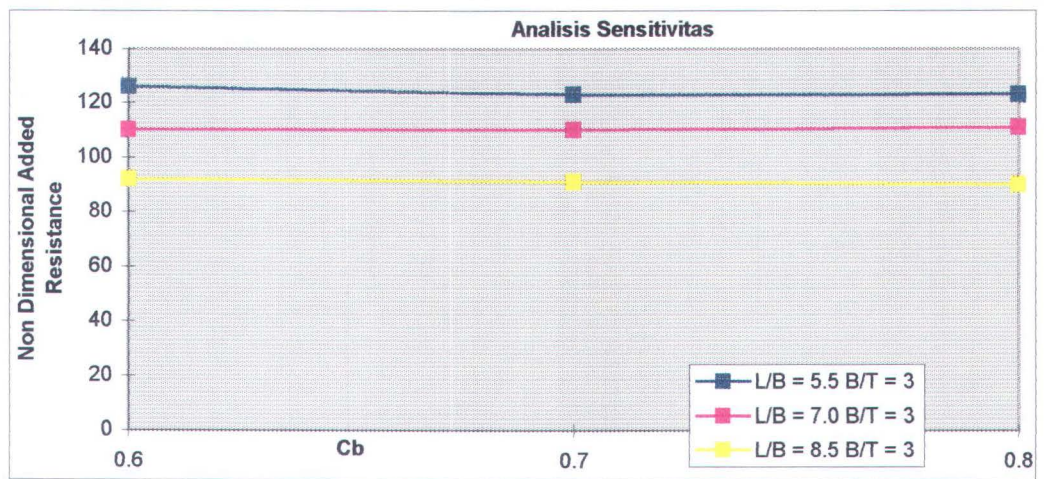
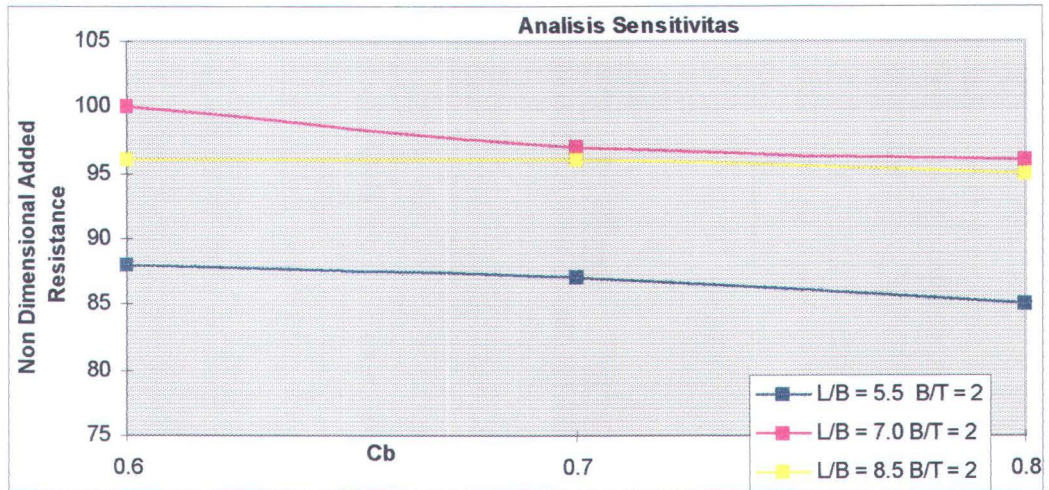
36.33795

B/T =	4
T =	4.121391 m
B =	16.48556 m
L =	140.1273 m
H =	6.868985 m
V =	13.47275 knots

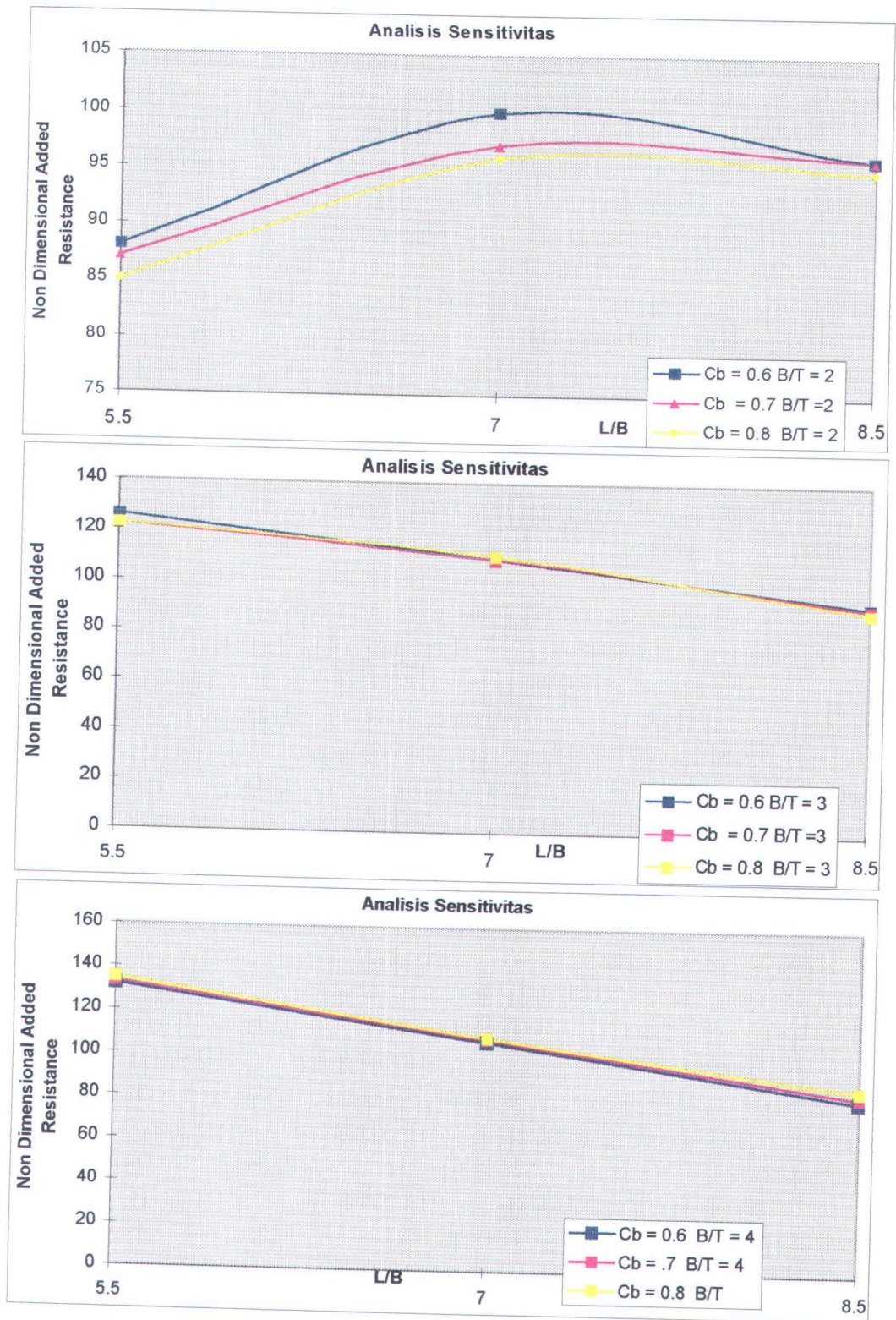
36.33795



Gambar IV.4. Sensitivity Analysis



Gambar IV.4. Analisis Sensitivitas C_b berubah



Gambar IV.5 Sensitivity Analysis L/B berubah

لا تدركه الأبصر وهو يدرك الأبصر وهو اللطيف الخبير
(الأنعام: ١٠٣)

*Dia tidak dapat dicapai oleh penglihatan mata, sedang Dia dapat
mencapai segala penglihatan itu, Dialah Yang Maha Halus lagi Maha
Mengetahui
(QS. Al-An'am : 103)*



Bab V

Kesimpulan dan Saran



BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

V.1. KESIMPULAN

1. Kerangka kerja (*frame work*) integrasi karakteristik *added resistance* pada proses penentuan ukuran utama kapal menghasilkan alternatif dimensi kapal seperti yang dijabarkan pada BAB IV. Pemilihan dimensi terbaik dilakukan berdasarkan kriteria total *added resistance* yang paling minimum serta memenuhi seluruh batasan teknis maupun batasan operasional yang telah ditentukan.
2. Berdasarkan tabel perbandingan pada BAB IV, maka tujuan kerangka kerja ini sudah tercapai yaitu *minimum added resistance* dengan pemenuhan pada batasan *draft*, *deck wetness*, *slamming*, dan *threshold velocity*.
3. Berdasarkan pada analisis sensitivitas yang dilakukan, maka pada kerangka kerja yang telah disusun dapat diamati bahwa terdapat tiga buah faktor sensitif terhadap perubahan fungsi obyektif, yaitu L/B , B/T , dan C_b .



Sehingga sedikit perubahan pada faktor tersebut akan menimbulkan perubahan yang signifikan pada nilai fungsi obyektif, dengan kata lain fungsi obyektif sensitif terhadap perubahan L/B , B/T , dan C_b .

4. Pemodelan ini memberikan pedoman pada proses perencanaan kapal selanjutnya bahwa jika terjadi perubahan perbandingan ukuran utama kapal maka harus diperiksa kembali apakah faktor hasil perubahan masih memenuhi kriteria operasional kapal ketika berlayar di gelombang irreguler.
5. Dari hasil validasi program didapatkan kenyataan bahwa terdapat selisih nilai yang disebabkan adanya perbedaan dalam pengembangan ukuran utama, *human error* dan *machine error* dalam pembacaan data grafik dan tabel. Namun demikian hal tersebut tidak lepas dari tujuan bahwa secara *frame work software* (kerangka kerja perangkat lunak) masih dalam kerangka kerja yang sesuai dengan metode yang digunakan.

V.2 SARAN

1. Untuk mendapatkan analisis yang lebih realistis, perlu dilakukan penelitian untuk kondisi gelombang irreguler tiga dimensi dengan menggunakan *frame work process* yang sama dengan yang telah dilakukan pada tugas akhir ini.



2. Dengan digunakannya metode pengembangan ukuran kapal pada proses iterasi optimisasi, maka perlu dilakukan pengamatan bentuk lambung pada ukuran-ukuran utama yang digunakan sebagai nilai awal.
3. Perlu dilakukan integrasi kondisi operasional seakeeping pada proses perencanaan kapal, dengan jalan mengintegrasikan karakteristik *added resistance* dengan batasan teknis dan operasionalnya, pada fungsi obyektif perencanaan kapal berdasarkan analisis teknis dan ekonomis.



BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

V.1. KESIMPULAN

1. Kerangka kerja (*frame work*) integrasi karakteristik *added resistance* pada proses penentuan ukuran utama kapal menghasilkan alternatif dimensi kapal seperti yang dijabarkan pada BAB IV. Pemilihan dimensi terbaik dilakukan berdasarkan kriteria total *added resistance* yang paling minimum serta memenuhi seluruh batasan teknis maupun batasan operasional yang telah ditentukan.
2. Berdasarkan tabel perbandingan pada BAB IV, maka tujuan kerangka kerja ini sudah tercapai yaitu *minimum added resistance* dengan pemenuhan pada batasan *draft*, *deck wetness*, *slamming*, dan *threshold velocity*.
3. Berdasarkan pada analisis sensitivitas yang dilakukan, maka pada kerangka kerja yang telah disusun dapat diamati bahwa terdapat tiga buah faktor sensitif terhadap perubahan fungsi obyektif, yaitu L/B , B/T , dan C_b .



Sehingga sedikit perubahan pada faktor tersebut akan menimbulkan perubahan yang signifikan pada nilai fungsi obyektif, dengan kata lain fungsi obyektif sensitif terhadap perubahan L/B , B/T , dan C_b .

4. Pemodelan ini memberikan pedoman pada proses perencanaan kapal selanjutnya bahwa jika terjadi perubahan perbandingan ukuran utama kapal maka harus diperiksa kembali apakah faktor hasil perubahan masih memenuhi kriteria operasional kapal ketika berlayar di gelombang irreguler.
5. Dari hasil validasi program didapatkan kenyataan bahwa terdapat selisih nilai yang disebabkan adanya perbedaan dalam pengembangan ukuran utama, *human error* dan *machine error* dalam pembacaan data grafik dan tabel. Namun demikian hal tersebut tidak lepas dari tujuan bahwa secara *frame work software* (kerangka kerja perangkat lunak) masih dalam kerangka kerja yang sesuai dengan metode yang digunakan.

V.2 SARAN

1. Untuk mendapatkan analisis yang lebih realistis, perlu dilakukan penelitian untuk kondisi gelombang irreguler tiga dimensi dengan menggunakan *frame work process* yang sama dengan yang telah dilakukan pada tugas akhir ini.



2. Dengan digunakannya metode pengembangan ukuran kapal pada proses iterasi optimisasi, maka perlu dilakukan pengamatan bentuk lambung pada ukuran-ukuran utama yang digunakan sebagai nilai awal.
3. Perlu dilakukan integrasi kondisi operasional seakeeping pada proses perencanaan kapal, dengan jalan mengintegrasikan karakteristik *added resistance* dengan batasan teknis dan operasionalnya, pada fungsi obyektif perencanaan kapal berdasarkan analisis teknis dan ekonomis.

DAFTAR PUSTAKA

Bhattacharyya, R., *Dynamics of Marine Vehicles*, John Wiley and Sons Inc., New York, 1978.

Halvorson, M., *Step by step Microsoft Visual Basic 6.0*, PT. Elex Media Komputindo, Gramedia Group, Jakarta, Indonesia, 1999.

Lasdon, L., Waren, A., *Microsoft Excel Solver*, Front Line System, www.frontsys.com, 1995

Lloyd, A. R. J. M., *Seakeeping : Ship Behaviour in Rough Water*, John Wiley and Sons Inc., New York, 1988.

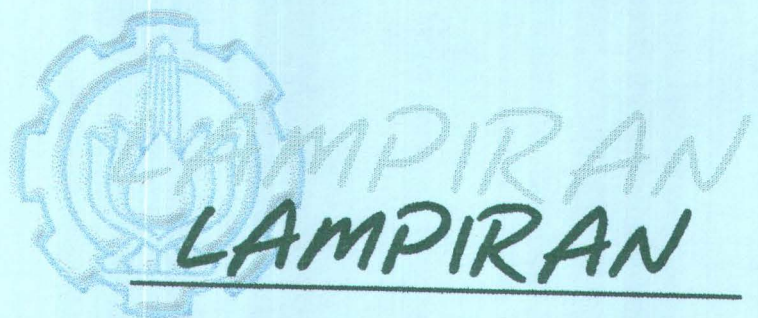
Phoels, Herald, *Ship Design and Ship Theory*, University of Hannover, Deutch, 1982.

Rao, S. S., *Optimization Theory and Application*, Wiley Eastern Ltd., India, 1984.

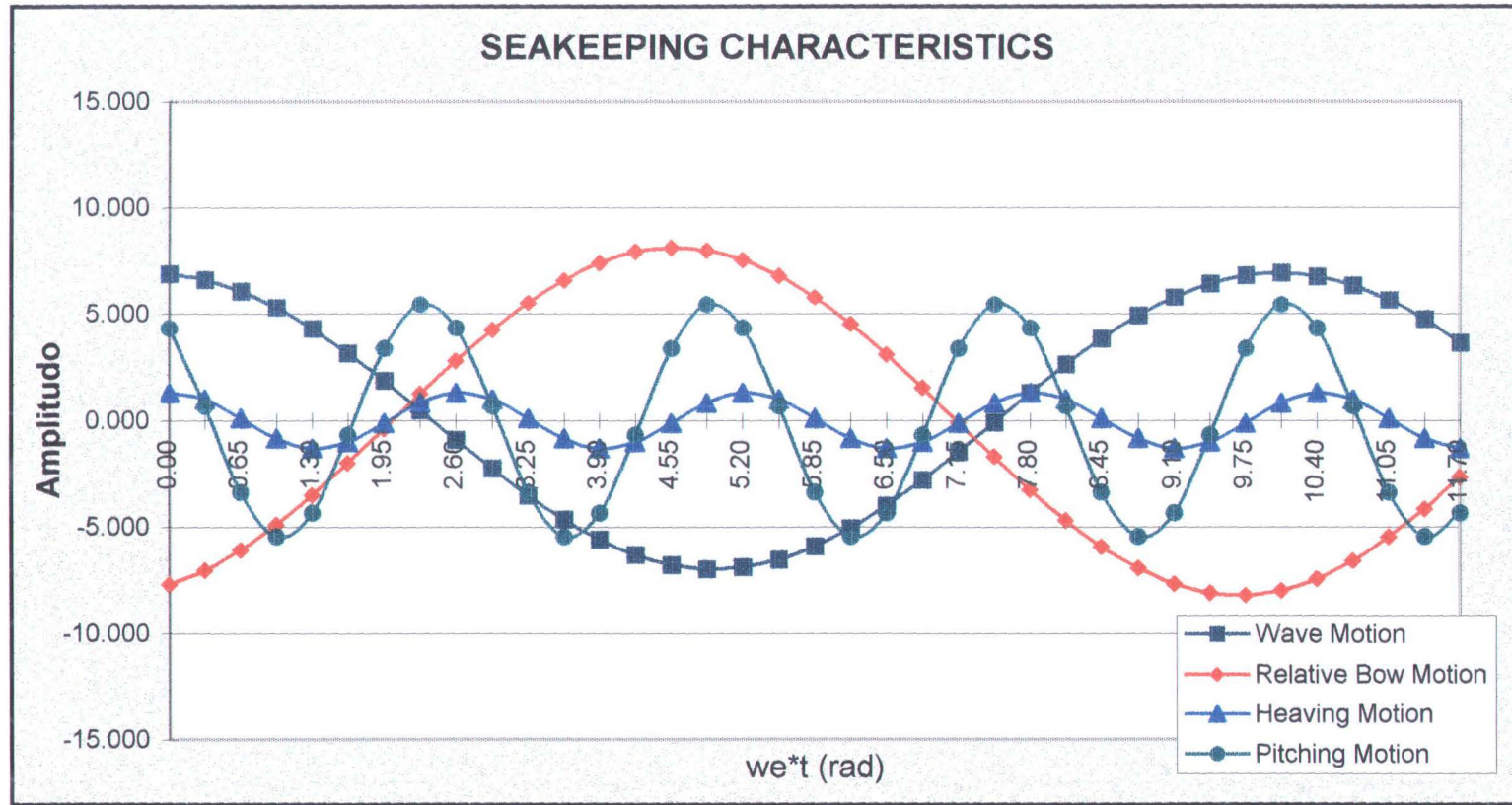
Tan, S. G., Ir, *Seakeeping Consideration in Ship Design*, HATMI, Jakarta, Indonesia, 1995.

Todd, F. H., *Series 60 : Methodical Experiments with Models of Single Screw Merchants Ship*, UK (Sa)

Winston , W. L., Albright, S, C., Broadie, M., *Practical Management Science : Spreadsheet Modelling and Application*, Duxbury Press, Wadsworth Publishing Company, USA, 1997.



LAMPIRAN
LAMPIRAN



Contoh graph output running program

Sea State	Sea Description	Wind				Sea							
		Beaufort (Wind Force)	Description	Range (knots)	Wind Velocity (knots)	Wave Height		Significant range period (second)	Periods of maximum energy of Spectra	Average Periods	Average Wave Length	Minimum Fetch	Minimum Duration
						Average	Significant						
	Sea like a mirror	0	Calm	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	Ripples with the appearance of scales are formed, but without foam crests	1	Light Air	1-3	2	0.04	0.07	1.2	0.75	0.6	10 ft	5	16 mi
1	Small wavelets; crest begins to break; foam of white horses, but no streaks	2	Light Breeze	4-6	5	0.3	0.5	0.4-0.8	1.9	1.3	0.7 ft	8	39 mi
	Large white caps; crest begins to break; foam of glossy appearance, perhaps scurried with horses	3	Gentle Breeze	7-10	8.5	0.8	1.3	0.8-1.0	3.2	2.3	20	9.8	1.7
					10	1.1	1.8	1.0-1.0	3.2	2.7	27	10	2.4
2	Small wave, becoming larger. Fairly frequent white horses	4	Moderate Breeze	11-16	12	1.6	2.5	1.0-1.0	4.5	3.2	40	18	3.8
3					13.5	2.1	3.3	1.4-1.8	6.1	3.8	62	24	4.8
					16	2.9	3.8	1.6-1.8	6.8	3.8	69	28	5.2
					18	3.7	4.7	2.0-2.8	9	4.3	71	30	5.6
4	Moderate wave taking a more pronounced long form; many white horses are formed (foilage of some spray)	5	Fresh Breeze	17-21	19	4.1	6.5	2.6-10.0	7.2	5.1	80	35	6.2
					20	4.5	7.2	3.2-11.1	7.5	5.4	111	75	10
5	Large wave begins to form with crest more white with some crests (probably some spray)	6	Strong Breeze	22-27	22	5.5	9.2	3.4-12.2	9.3	6.9	134	102	12
					24	6.5	10.5	3.7-13.5	9	6.4	150	130	14
					24.5	6.9	10.9	3.8-13.6	9.2	6.6	164	140	15
					26	7.7	12.3	4.0-14.5	9.8	7	189	190	17
6	Sea begins to roll with foam from breaking wave being to be blown in streak along the direction of the wind (spray begins to be seen)	7	Moderate Gale	28-33	28	8.9	14.7	4.5-15.5	10.8	7.6	212	230	20
					30	10.3	16.4	4.7-16.7	11.3	8	250	280	23
					30.5	10.6	16.9	4.8-17.0	11.5	8.2	268	290	24
					32	11.6	18.6	5.0-17.5	12.1	8.8	285	340	27
7	Moderate high wave of greater height; edge of crest breaks into spindrift. The foam is blown in well-marked streaks along the direction of the wind. Spray affects visibility.	8	Fresh Gale	34-40	34	13.1	21	5.5-18.5	12.8	9.1	322	420	30
					36	14.9	23.6	5.9-19.7	13.6	9.6	363	600	34
					37	15.8	24.9	6-20.5	13.9	9.9	376	630	37
					38	16.4	26.3	6.2-20.8	14.3	10.2	392	600	38
					40	18.2	29.1	6.5-21.7	15.1	10.7	444	710	42
8	High waves, dense streaks of foam along the direction of the wind. Sea begins to roll. Visibility affected. Very high waves with long overhanging crests. The heaving form is great patches and a blow is dense with spindrift along the direction of the wind. On the whole, the surface of the sea takes on a white appearance. The rolling of the sea becomes heavy and stock like. Visibility affected.	9	Strong Gale	41-50	42	20.1	32.1	7-23	16.8	11.3	492	830	47
					44	22	35.2	7-24.2	16.6	11.8	534	960	52
					46	24.1	36.5	7-25	17.3	12.3	560	1140	57
					48	26.2	41.9	7-26.5	18.1	12.9	650	1250	63
					49	28.1	45.5	7-27	18.8	13.4	700	1420	69
					51.5	30.2	49.9	8-28.2	19.4	13.8	756	1590	75
					52	30.8	49.2	8-28.5	19.6	13.9	780	1610	75
					54	33.2	53.1	8-29.5	20.4	14.5	810	1900	81
9	Exceptionally high waves. Sea completely covered with long white patches of foam lying in direction of wind. The white edges of wave crest are blown into froth. Visibility affected.	11	Storm	60-63	60	35.7	57.1	8.5-31	21.1	15	910	2100	88
					60.5	40.3	64.4	Oct-32	22.4	16.9	985	2500	101
	Sea filled with foam and spray. Sea white with driving spray. Visibility seriously affected.	12	Hurricane	64-71	64	>36.5	74.5	24.1	17.2				

* For hurricane wind (and other storm gale and storm wind) required durations and reports are barely affected. Sea not fully arisen.

** Rebased December 1964 by L. Blotkowski and W. Parsons. Used courtesy of the Oceanographic Office.

Table III : Criteria for survivability and operability in rough weather

Author	Slam	Wetness	Roll RMS	Vertical acceleration RMS
<i>Survivability</i>				
Bales and Cieslowski (1981) (USN combatant)	50 / hr	50 / hr	15.0 degrees	0.40 g on bridge
<i>Operability</i>				
Hutchison and Laible (1987) (research vessel)	20 / hr	30 / hr	5.0 degrees	0.20 g on bridge
McCreight (1987) (UNS combatant mobility)	20 / hr	30 / hr	4.0 degrees	0.20 g on bridge
Nordforsk (1987) (merchant)	[25], [26]	5 / 100	6.0 degrees	0.15 g on bridge
Nordforsk (1987) (naval)	3 / 100	5 / 100	4.0 degrees	0.20 g on bridge
Pingree (1988) (warship personnel)	-	-	4.5 degrees	0.18 g

Table IV : Limiting criteria for vertical acceleration

Vertical acceleration RMS	Description
0.275 g	Simple light work. Most of the attention must be devoted to keeping balance. Tolerable only for short periods on high speed craft.
0.2 g	Light manual work by people adapted to ship motions. Not tolerable for longer periods. Quickly causes fatigue.
0.15 g	Heavy manual work by people adapted to ship motions : for instance on fishing vessels and supply ships.
0.1 g	Intellectual work by people reasonably well adapted to ship motions (i.e. scientific personnel on ocean research vessels). Cognitive/manual work of a more demanding nature. Long-term tolerable for the crew. The International Standard ISO 2631/3 (1985) for half an hour exposure period for people unused to ship motions.
0.05 g	Passengers on a ferry. The International Standard for two hours exposure period for people unused to ship motions. Causes symptoms of motion sickness (vomiting) in approximately 10% of unacclimatized adults.

Biografi



Nama : Wahyu Widiarto
Tempat, Tgl. Lahir : Jogjakarta, 4 Februari 1976
Agama : Islam
Contact Person : fourthfloor_4@yahoo.com

Riwayat Pendidikan

- ✓ 1982 - 1988 : SD Taranita, Bumijo, Jogjakarta
- ✓ 1988 - 1991 : SMP N 5, Kotabaru, Jogjakarta
- ✓ 1991 - 1994 : SMA N 2, Bener, Tegalrejo, Jogjakarta
- ✓ 1994 - 2001 : Teknik Perkapalan
Fakultas Teknologi Kelautan
ITS Surabaya