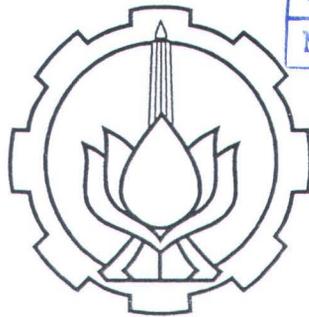


PERANCANGAN DAN PEMBUATAN PERANGKAT LUNAK
UNTUK MERENCANAKAN BALING-BALING KAPAL
DENGAN TEORI VORTEX

TUGAS AKHIR

PERPUSTAKAAN ITS	
Tgl. Terima	20-7-2000
Terima Dari	H
No. Agenda Prp.	21-1136



Disusun oleh:

BUDI SUSILO

4193100003

RSPe
623.873
Bud
P-1
1999

JURUSAN TEKNIK PERKAPALAN
FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
1999



LEMBAR PENGESAHAN

PERANCANGAN DAN PEMBUATAN PERANGKAT LUNAK UNTUK MERENCANAKAN BALING-BALING KAPAL DENGAN TEORI VORTEX

TUGAS AKHIR

Diajukan guna memenuhi sebagian persyaratan untuk memperoleh
gelar sarjana Teknik Perkapalan

pada

Jurusan Teknik Perkapalan
Fakultas Teknologi Kelautan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya

Mengetahui / menyetujui:

Dosen Pembimbing I:

29/99
7

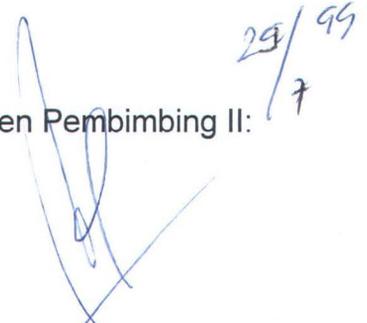


Ir. P. Eko Panunggal, Ph.D.

NIP. 130.286.963

Dosen Pembimbing II:

29/99
7



Ir. Mahardjo Wartono

NIP. 130.687.435



ABSTRAK

Teori *vortex* dalam perencanaan baling-baling kapal dapat memberikan penjelasan yang baik tentang bagaimana terjadinya dan perhitungan gaya dorong yang dihasilkan oleh baling-baling, sehingga penentuan geometri dan karakteristik baling-baling yang optimum pada kondisi kapal yang direncanakan dapat diperhitungkan dengan teliti. Prinsip perencanaan baling-baling dengan teori *vortex* adalah mencari bentuk geometri dan karakteristik yang optimum, yang dapat menghasilkan aliran sirkulasi fluida yang baik disekitar baling-baling, sehingga efisiensi baling-baling yang dihasilkan adalah optimal.

Dalam prakteknya teori *vortex* tidak mudah diterapkan, banyak perhitungan matematis yang melibatkan konsep hidrodinamik untuk menjabarkan teori tersebut. Untuk menerapkan teori *vortex* dalam perencanaan baling-baling kapal dapat digunakan metode yang diberikan oleh M. K. Eckhardt dan W. B. Morgan. Metode ini dapat diaplikasikan untuk baling-baling dengan jumlah daun antara 3 s/d 6. Hasil dari gaya angkat (*lift*) pada setiap radius penampang dievaluasi menggunakan teori sirkulasi (Γ) yang diberikan oleh Goldstein.

Penggunaan aplikasi komputer dapat memberikan perencanaan baling-baling yang lebih efisien dan efektif. Sedangkan pembacaan diagram yang digunakan dalam perhitungan perencanaan dapat diatasi dengan mendefinisikan lengkung kurva dan permukaan dengan metode Basis Spline yang sekaligus secara otomatis diperhitungkan oleh komputer. Adanya beberapa tipe penampang aerofoil yang diberikan oleh NACA dapat memberikan alternatif pemilihan terhadap bentuk dan karakteristik dari baling-baling yang direncanakan.

KATA PENGANTAR

Puji syukur kami panjatkan ke hadirat Allah SWT, atas segala berkat dan ratmat-Nya sehingga Tugas Akhir yang berjudul **“Perancangan dan Pembuatan Perangkat Lunak untuk Merencanakan Baling-baling Kapal dengan Teori Vortex”** dapat terselesaikan dengan baik.

Tugas Akhir ini disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar kesarjanaan di Jurusan Teknik Perkapalan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Dengan harapan bahwa Tugas Akhir ini dapat memberikan sumbangan yang berguna dalam dunia Teknik Perkapalan.

Dalam Penyusunan Tugas Akhir ini, penulis banyak memperoleh bantuan baik moril maupun materiil dari berbagai pihak, sehingga Tugas Akhir ini akhirnya dapat diselesaikan. Atas segala bantuan tersebut, dalam kesempatan ini penulis menyampaikan penghargaan dan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Bapak Ir. P. Eko Panunggal, Ph.D. dan Bapak Ir. Mahardjo Wartono selaku dosen pembimbing Tugas Akhir, yang telah meluangkan waktu dan tenaga untuk membimbing penulis selama pengerjaan Tugas Akhir ini.
2. Bapak Ir. Koestowo Sastro Wijono selaku Ketua Jurusan Teknik Perkapalan.
3. Bapak Ir. Andjar Soeharto selaku Sekretaris Jurusan Teknik Perkapalan.
4. Bapak Ir. Tri Achmadi, Ph.D. yang telah banyak memberikan bantuan baik moril maupun materiil dalam penyusunan Tugas Akhir ini.

5. Bapak Dr. Ir. Wisnu Wardhana, Msc., SE. yang telah memberikan bimbingan kepada penulis dalam penyusunan Tugas Akhir ini.
6. Segenap Karyawan Tata Usaha Jurusan Teknik Perkapalan.
7. Semua rekan-rekan, atas dukungan dan bantuannya.

Sebagai manusia penulis menyadari adanya banyak kekurangan pada penyusunan Tugas Akhir ini, untuk itu penulis sangat mengharapkan adanya kritik dan saran guna perbaikan atas kekurangan-kekurangan yang ada.

Surabaya, Juli 1999

Penulis

DAFTAR ISI

LEMBAR JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	ii
ABSTRAK	iii
KATA PENGANTAR	iv
DAFTAR ISI	vi
DAFTAR NOTASI	viii
BAB I. PENDAHULUAN	1
1.1. LATAR BELAKANG	1
1.2. TUJUAN	3
1.3. MANFAAT	3
1.4. BATASAN MASALAH	4
1.5. METODOLOGI	5
1.6. SISTEMATIKA PEMBAHASAN	5
BAB II. TEORI VORTEX DALAM PERENCANAAN BALING-BALING KAPAL	6
2.1. TEORI KUTTA-JOUKOWSKI	8
2.2. KEKUATAN SIRKULASI (Γ).....	10
2.3. <i>LIFTING LINE THEORY</i>	14
2.4. TEORI SIRKULASI UNTUK BALING-BALING KAPAL.....	17
BAB III. METODE ECKHARDT-MORGAN UNTUK MERENCANAKAN BALING-BALING KAPAL	26

3.1. PERENCANAAN PADA <i>NON OPTIMUM FREE-RUNNING</i> <i>PROPELLER</i>	27
3.2. PERENCANAAN PADA <i>WAKE ADAPTED PROPELLER</i>	38
3.3. ANALISA KEKUATAN DAUN BALING-BALING	45
BAB IV. PENDEFINISIAN PERSAMAAN LENGKUNG KURVA DAN PERMUKAAN DENGAN METODE <i>BASIS SPLINE</i>	51
4.1. REPRESENTASI KURVA DENGAN <i>B-SPLINE</i>	51
4.2. REPRESENTASI PERMUKAAN DENGAN <i>B-SPLINE</i>	62
4.3. METODE PENCARIAN TITIK	67
BAB V. PERANCANGAN DAN PEMBUATAN PERANGKAT LUNAK ...	74
5.1. PERSYARATAN SISTEM	74
5.2. STRUKTUR PROGRAM	75
5.3. PENGUJIAN PROGRAM	86
BAB VI. KESIMPULAN DAN SARAN	92
6.1. KESIMPULAN	92
6.2. SARAN	93

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

DAFTAR NOTASI

A_E/A_O	: Expanded blade area ratio
a	: Koefisien luas penampang setiap daun baling-baling
b	: Koefisien momen inersia (I_{x_0})
C_l	: Koefisien untuk memperkirakan tebal daun baling-baling
C_P	: Koefisien <i>power</i>
C_{P_i}	: Koefisien <i>power</i> pada aliran tanpa kekentalan
C_{P_s}	: Koefisien <i>power</i> pada <i>wake adapted propeller design</i>
C_T	: Koefisien thrust
C_{T_i}	: Koefisien thrust pada aliran tanpa kekentalan
$C_{T_{Si}}$: Koefisien thrust pada aliran tanpa kekentalan untuk perencanaan <i>wake adapted propeller</i>
c	: Koefisien momen inersia (I_{y_0})
c_L	: Koefisien <i>lift</i> untuk setiap penampang daun baling-baling
D	: Diameter baling-baling
f	: Koefisien tebal daun baling-baling
G	: Sirkulasi setiap penampang daun baling-baling
h	: Koefisien koreksi <i>pitch</i>
k_1	: Koefisien koreksi <i>camber</i>
k_2	: Koefisien koreksi <i>camber</i>
I_{x_0}, I_{y_0}	: Momen inersia luasan setiap penampang daun baling-baling
l	: Panjang setiap daun baling-baling
M_{Q_b}, M_{T_b}	: <i>Bending moment</i> pada setiap penampang daun baling-baling
M_{x_0}, M_{y_0}	: <i>Bending moment</i> pada setiap penampang daun baling-baling
m	: Ordinat dari <i>mean line</i>
m_x	: <i>Camber</i> maksimum dari <i>mean line</i>
m_x/l	: <i>Camber ratio</i>

n	: Revolution per minute (RPM)
P_e	: Effective horse power (EHP)
P_s	: Shaft horse power (SHP)
P/D	: Pitch ratio
P/D_i	: Pitch ratio awal
p	: Kedalaman air diukur dari setiap penampang daun baling-baling
p_a	: Kedalaman air diukur pada tekanan atmosfer
Q	: Torsi dari baling-baling
R	: Jari-jari baling-baling
R_s	: Tahanan kapal
r	: Jari-jari setiap penampang baling-baling yang diperhitungkan
Sc	: Tegangan maksimum yang diijinkan dari bahan yang digunakan
T	: Thrust
t	: Thrust deduction fraction
t_{Tip}	: Tebal maksimum pada ujung daun baling-baling
t_x	: Tebal maksimum daun baling-baling
u	: induced velocity
u_a	: Komponen aksial dari induced velocity
u_t	: Komponen tangensial dari induced velocity
v_c	: Kecepatan sirkulasi
v_s	: Kecepatan kapal
v_A	: Speed of advance
v_r	: Kecepatan aliran yang melewati setiap penampang baling-baling
w_o	: Effective wake fraction
w_x	: Lokal wake fraction (setiap daun baling-baling)
x	: Radius fraction (r/R)
x_l	: Jarak sepanjang penampang aerofoil
z	: Jumlah daun baling-baling
α	: Angle of attack
α_l	: Angle of attack from friction and ideal angle of attack

α_2	: <i>Angle of attack</i> akibat efek gaya angkat permukaan
α_b	: <i>Angle of attack</i> akibat efek dari <i>bound vertices</i>
α_f	: <i>Angle of attack</i> akibat efek dari <i>free vertices</i>
β	: <i>Advance angle</i>
β_i	: <i>Hydrodynamic pitch angle</i>
γ	: <i>Specific weight</i>
ε	: <i>Drag lift ratio</i>
η	: Efisiensi baling-baling
η_i	: Ideal efisiensi baling-baling
κ	: <i>Goldstein factor</i>
λ	: <i>Advance coefficient</i>
λ_s	: <i>Advance coefficient</i> pada <i>wake adapted propeller design</i>
ρ	: massa jenis air
σ	: kavitas
ϕ	: <i>Final Pitch angle</i>
φ	: <i>shaft angle</i>

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. LATAR BELAKANG

Baling-baling (*screw propeller*) merupakan alat penggerak utama kapal yang umum digunakan dewasa ini. Gaya dorong yang diberikan kepada kapal pada hakekatnya dihasilkan oleh gaya angkat (*lifting force*) yang bekerja pada daun baling-baling yang berputar di dalam air. Besarnya gaya dorong (*thrust*) yang dihasilkan oleh baling-baling kapal utamanya dipengaruhi oleh bentuk geometri dari penampang daun baling-baling kapal tersebut. Jadi pada prinsipnya perencanaan baling-baling kapal adalah mencari bentuk geometri dan karakteristik baling-baling yang baik untuk suatu kondisi aliran fluida tertentu disekitar baling-baling, sehingga dapat menghasilkan gaya dorong dan efisiensi yang optimal.

Salah satu metode perencanaan baling-baling yang umum digunakan dewasa ini adalah *systematic screw series*. *Systematic screw series* merupakan diagram hasil percobaan dari bermacam-macam model baling-baling yang diberikan oleh beberapa tangki percobaan di negara maju, misalnya Taylor di Amerika, Gawn di Inggris, Troost di Belanda, dll. Perencanaan dengan metode ini sangat praktis, karena baling-baling dipilih dari data *screw series* yang sekiranya cocok dengan kapal yang direncanakan. Walaupun demikian, metode ini terbatas pada baling-baling dengan karakteristik dari famili tertentu. Sehingga geometri dan karakteristik baling-baling yang direncanakan, tidak dapat diperhitungkan lebih teliti dan rasional sesuai dengan kondisi kapal yang direncanakan.

Pada tugas akhir ini akan disusun perencanaan baling-baling kapal yang berbasis pada dasar-dasar teori *vortex*. Dalam teori perencanaan baling-baling,

teori *vortex* lebih dapat menjelaskan bagaimana terjadinya dan perhitungan gaya dorong yang dihasilkan oleh baling-baling, sehingga dibandingkan dengan perencanaan baling-baling menggunakan diagram hasil percobaan (*systematic screw series*), penentuan geometri dan karakteristik baling-baling dapat diperhitungkan secara rasional (*rational based-design*).

Walaupun teori *vortex* dapat memberikan perencanaan baling-baling yang lebih baik, akan tetapi dalam prakteknya teori tersebut tidak mudah diterapkan, banyak perhitungan-perhitungan matematis yang melibatkan konsep hidrodinamik untuk menjabarkan teori tersebut. Dalam perencanaan baling-baling pada Tugas Akhir ini akan digunakan metode yang diberikan oleh M.K. Eckhardt dan W.B. Morgan (metode Eckhardt-Morgan), di mana melengkapi perhitungan dalam penentuan geometri, karakteristik dan bentuk dari profil baling-baling digunakan beberapa diagram atau data pendukung, antara lain: Troost's *series*, NACA, David Taylor Model Basin, dll.

Masalah yang dihadapi dalam perencanaan dengan metode Eckhardt-Morgan adalah adanya pembacaan diagram yang harus dilakukan dalam perhitungan serta banyaknya tahap-tahap perhitungan yang harus dikerjakan, jika hal ini dilakukan secara manual maka proses perencanaan akan membutuhkan waktu yang lama. Untuk meningkatkan efisien dan efektifitas proses perencanaan, maka dengan bantuan komputer akan dibuat program untuk menentukan geometri dan karakteristik baling-baling, serta untuk mempermudah pembacaan diagram yang dipakai dalam perhitungan, dengan menggunakan metode *Basis Spline* akan dicari persamaan lengkung kurva/ permukaan dari diagram-diagram tersebut.

Perangkat lunak untuk merencanakan baling-baling kapal dengan metode Eckhardt-Morgan dibuat dengan editor dan kompiler Borland Delphi 4.0. Delphi adalah suatu kompiler dengan kemampuan *visual programming* yang berorientasi obyek (*object oriented programming*), sehingga dengan kemampuan tersebut membuat kita dapat lebih berkonsentrasi pada sistem perangkat lunak perencanaan baling-baling kapal daripada bagaimana membuat sistem menu, dialog, atau penampilan grafis yang baik.

1.2. TUJUAN

Tujuan dari Tugas Akhir ini antara lain:

- Penggunaan metode Eckhardt-Morgan dalam perencanaan baling-baling kapal dengan teori sirkulasi (*vortex*).
- Perancangan dan pembuatan perangkat lunak komputer untuk menentukan geometri dan karakteristik baling-baling kapal.
- Mendefinisikan persamaan lengkung kurva/ permukaan dari grafik/ diagram yang dipakai dalam perhitungan, dengan metode *Basis Spline*.
- Penggunaan profil aerofoil untuk menentukan bentuk penampang daun baling-baling kapal.

1.3. MANFAAT

Manfaat dari penyusunan Tugas Akhir ini adalah:

- Penggunaan teori *vortex* dengan metode Eckhardt-Morgan dalam perencanaan baling-baling kapal, bentuk geometri dan karakteristik baling-baling dapat diperhitungkan lebih teliti dan lebih baik sesuai dengan kondisi kapal yang direncanakan.

- Penggunaan program komputer dapat mempermudah dan mempercepat proses perencanaan.
- Dengan metode *Basis Spline*, model matematis lengkung kurva/ permukaan dari grafik/ diagram dapat didefinisikan, sehingga pembacaan diagram yang digunakan dalam perhitungan perencanaan dapat dilakukan secara otomatis oleh komputer.
- Dengan tersedianya pilihan beberapa tipe profil penampang baling-baling, maka akan memberikan alternatif pilihan terhadap bentuk dari penampang daun baling-baling yang direncanakan.

1.4. BATASAN MASALAH

Batasan-batasan yang diambil antara lain:

- Perencanaan baling-baling disusun berdasarkan teori sirkulasi (*vortex*) dengan metode yang diberikan oleh M.K. Eckhardt & W.B. Morgan.
- Perencanaan baling-baling hanya menentukan geometri dan karakteristik utama, yaitu panjang (*chord*), tebal maksimum (*maximum thickness*), dan *camber* dari setiap penampang daun baling-baling.
- Baling-baling yang direncanakan hanya memiliki 3 s/d 6 daun.
- Metode yang digunakan untuk mendefinisikan persamaan lengkung kurva/ permukaan adalah *Basis Spline*, tanpa membandingkannya dengan yang lain.
- Karena keterbatasan data mengenai profil penampang daun baling-baling, maka dalam perencanaan ini digunakan dua tipe aerofoil, yaitu NACA seri 16 dan 66.

1.5. METODOLOGI

Metodologi yang digunakan dalam pembuatan Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Studi Literatur
2. Pendefinisian persamaan lengkung kurva/ permukaan dari diagram yang digunakan dalam perhitungan.
3. Pembuatan dan perancangan perangkat lunak.
4. Pengujian dan analisa program.
5. Pembuatan laporan.

1.6. SISTEMATIKA PEMBAHASAN

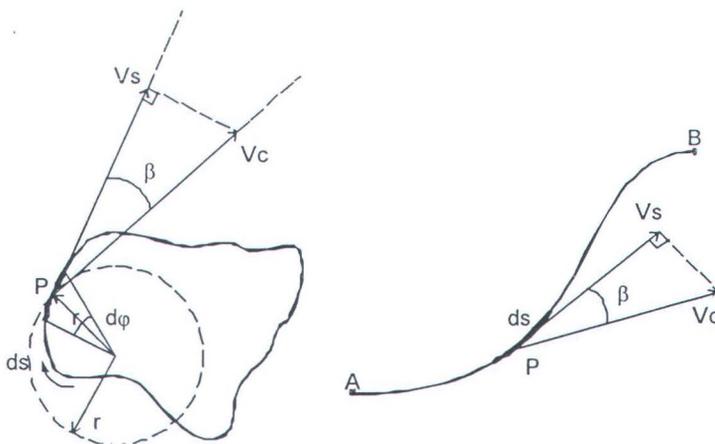
Sistematika pembahasan Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Bab I, membahas tentang latar belakang, tujuan, manfaat, batasan masalah, metodologi, dan sistematika pembahasan.
2. Bab II, membahas tentang teori *vortex* dalam perencanaan baling-baling kapal.
3. Bab III, membahas tentang metode Eckhardt-Morgan untuk merencanakan baling-baling kapal.
4. Bab IV, membahas tentang pendefinisian persamaan lengkung kurva/ permukaan dari diagram yang digunakan dalam perhitungan.
5. Bab V, membahas tentang perancangan dan pembuatan perangkat lunak serta pengujian program.
6. Bab VI, membahas tentang kesimpulan dan saran untuk pengembangan lebih lanjut.

BAB II TEORI VORTEX DALAM PERENCANAAN BALING-BALING KAPAL

Teori *vortex* (sirkulasi) untuk baling-baling kapal didasarkan pada konsep bahwa gaya angkat yang ditimbulkan oleh daun baling-baling disebabkan adanya aliran sirkulasi di sekeliling daun. Aliran sirkulasi tersebut menyebabkan timbulnya kenaikan kecepatan setempat serta penurunan tekanan pada punggung daun, dan penurunan kecepatan setempat serta kenaikan tekanan pada sisi muka daun. Sirkulasi/ kekuatan sirkulasi (Γ) didefinisikan sebagai integral garis sepanjang kurva tertutup dari hasil kali kecepatan (v_s) dan elemen lintasan (ds), dapat dirumuskan dengan persamaan:

$$\Gamma = \oint v_s \cdot ds \quad (2.1)$$



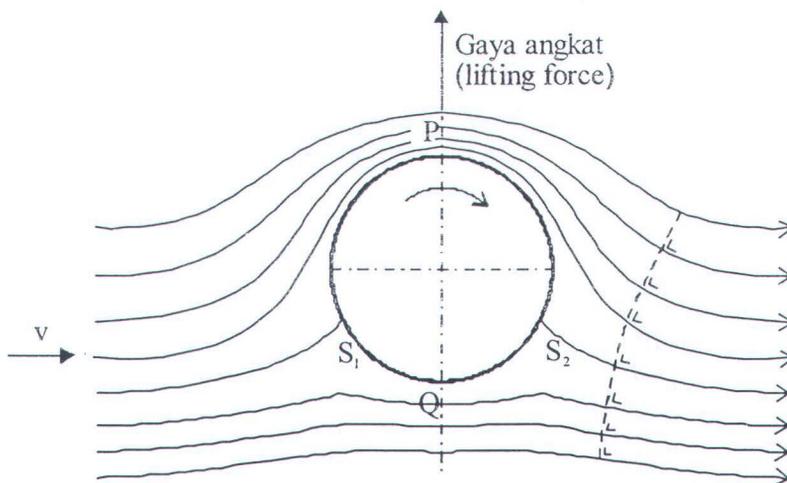
Gambar 2.1 : Integral garis sepanjang AB

Perhatikan gambar 2.1, pada elemen dengan panjang ds , di titik P bekerja sebuah vektor kecepatan sirkulasi (v_c) dengan integral garis sepanjang AB adalah:

$$\int_A^B \mathbf{v}_s \cdot d\mathbf{s} = \int_A^B v_c \cdot \cos \beta \cdot ds, \text{ sehingga untuk sebuah daerah sepanjang garis tertutup:}$$

$$\oint v_c \cdot \cos \beta \cdot ds = \oint v_s \cdot ds = \Gamma$$

Untuk menjelaskan aliran sirkulasi pada penampang aerofoil, dapat digunakan silinder yang diletakkan pada suatu aliran fluida ideal (gambar 2.2). Dalam keadaan diam, pada silinder tidak terjadi gaya angkat (*lifting force*). Bilamana silinder diputar dengan kecepatan tertentu, maka akan terjadi suatu sirkulasi aliran fluida (*vortex*) disekitar silinder. Aliran tersebut akan bergabung dengan aliran fluida yang bergerak melewati silinder dan menghasilkan gaya angkat yang menyebabkan silinder bergeser dari kedudukan semula.



Gambar 2.2 : Silinder berputar pada aliran *streamline*

Bergerakannya silinder dari kedudukan semula akibat pengaruh sirkulasi dapat dijelaskan bahwa superposisi antara aliran *streamline* dari fluida ideal dan aliran sirkulasi fluida akibat berputarnya silinder (*eddy flow*) akan menghasilkan suatu bentuk/ pola aliran baru (perhatikan gambar 2.2). Dengan persamaan Bernoulli dijelaskan bahwa tekanan di P akan lebih rendah daripada di Q , sehingga akan menghasilkan gaya angkat yang arahnya tegak lurus terhadap

aliran *streamline* tersebut. Pola aliran fluida dan letak titik stagnasi S_1 dan S_2 (titik di mana kecepatan partikel = 0) bergantung dari kekuatan sirkulasi (Γ).

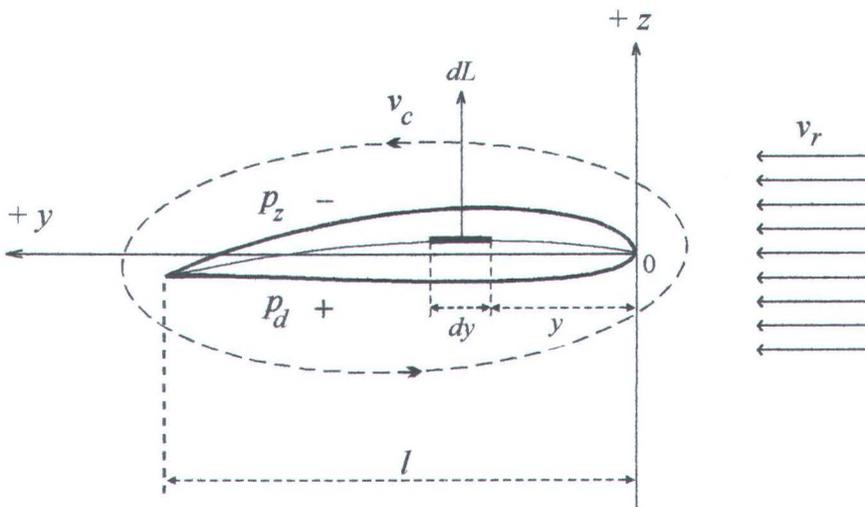
2.1. TEORI KUTTA-JOUKOWSKI

Teori Kutta-Joukowski dapat menjelaskan terjadinya gaya angkat pada penampang aerofoil yang berada di aliran fluida ideal. Teori tersebut menjelaskan bahwa, jika suatu benda bergerak dengan kecepatan teratur (*uniform velocity*) di dalam suatu fluida ideal maka disekitar benda tersebut akan timbul aliran sirkulasi yang menyebabkan terjadinya perbedaan tekanan. Adanya perbedaan tekanan disekitar benda, menyebabkan timbulnya gaya angkat (*lift*) pada benda tersebut.

Besarnya gaya angkat dapat dinyatakan dalam persamaan:

$$dL = \rho \cdot v_r \cdot \Gamma \cdot dr \quad (\text{persamaan Kutta-Joukowski}) \quad (2.2)$$

- di mana : dL : gaya angkat (*lift*)
- ρ : density dari fluida
- v_r : kecepatan aliran fluida
- dr : lebar elemen



Gambar 2.3 : Aliran sirkulasi pada penampang aerofoil

Persamaan Kutta-Joukowski tersebut dapat dibuktikan dengan mengadakan peninjauan pada elemen daun berbentuk aerofoil (perhatikan gambar 2.3). Aerofoil mempunyai bentuk yang sedemikian hingga dapat menimbulkan aliran sirkulasi disekelilingnya. Pada bagian bawah permukaan aerofoil akan bertekanan tinggi, sehingga menurut dalil Bernoulli kecepatannya berkurang. Sedangkan pada bagian atas permukaan aerofoil akan bertekanan rendah dan kecepatannya bertambah besar. Aliran relatif sepanjang aerofoil terdiri dari:

1. Aliran *streamline* (*streamline flow*) dengan kecepatan v_r .
2. Aliran *vortex* (*vortex flow*) yang menyelubungi aerofoil dengan kecepatan v_c .

Menurut Bernoulli:

$$p_d + \frac{1}{2} \rho (v_r - v_c)^2 = p_z + \frac{1}{2} \rho (v_r + v_c)^2$$

$$\Delta p = p_d - p_z$$

$$\Delta p = 2 \cdot \rho \cdot v_r \cdot v_c \quad \rightarrow \quad \Delta v = v_c - (-v_c) = 2v_c$$

$$\Delta p = \rho \cdot v_r \cdot \Delta v$$

di mana:

Δp : perbedaan tekanan di atas dan dibawah aerofoil

Δv : perbedaan kecepatan di atas dan dibawah aerofoil

Gaya angkat dL dari aerofoil dengan panjang l dan lebar dr adalah:

$$dL = dr \cdot \int_0^l \Delta p \cdot dy = \rho \cdot v_r \cdot dr \cdot \int_0^l \Delta v \cdot dy$$

$$\Rightarrow \Gamma = \int_0^l v_c \cdot dy - \int_0^l -v_c \cdot dy = \int_0^l 2v_c \cdot dy = \int_0^l \Delta v \cdot dy$$

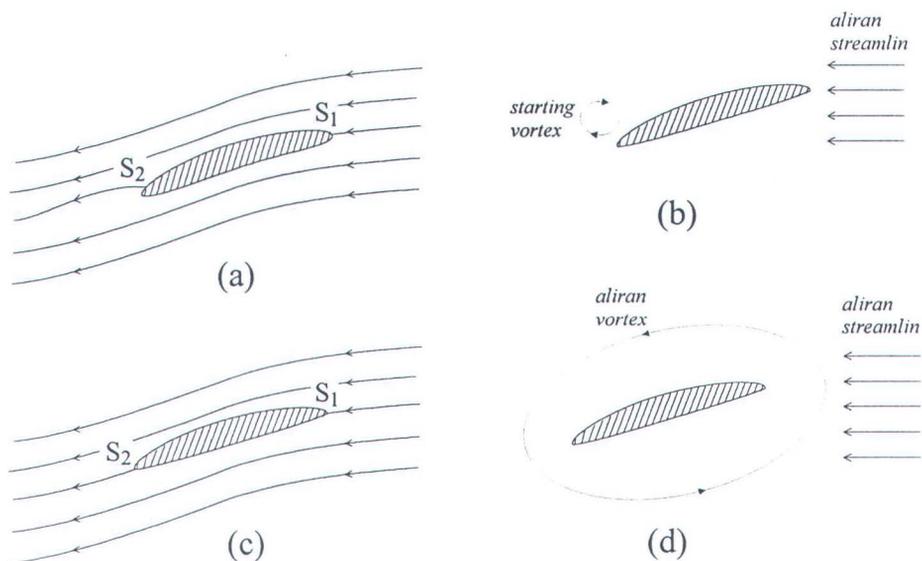
jadi:

$$dL = \rho \cdot \Gamma \cdot v_r \cdot dr \quad \rightarrow \quad \text{persamaan Kutta-Joukowski}$$

Dengan memakai persamaan Kutta-Joukowski tersebut dapatlah dicari besarnya gaya angkat sebuah aerofoil yang diketahui ukuran dan kecepatannya di fluida yang ditentukan, serta besarnya kekuatan sirkulasi dari aliran *vortex*-nya. Besarnya kekuatan sirkulasi (Γ) tergantung dari bentuk/ penampang dari suatu aerofoil. Karena sulitnya menentukan besarnya kekuatan sirkulasi dari suatu penampang aerofoil, dalam Tugas Akhir ini tidak dibahas perhitungan mengenai harga dari kekuatan sirkulasi dari penampang aerofoil. Disini hanya disajikan beberapa hal yang perlu diketahui untuk memprediksi besarnya kekuatan sirkulasi dari suatu penampang aerofoil.

2.2. KEKUATAN SIRKULASI (Γ)

Untuk memprediksi besarnya kekuatan sirkulasi dari suatu penampang aerofoil, pertama-tama perlu diketahui proses terjadinya aliran sirkulasi (*vortex*) dari penampang aerofoil tersebut.



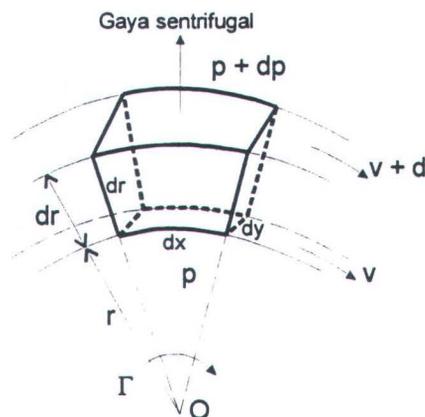
Gambar 2.4 : Terjadinya aliran sirkulasi pada penampang aerofoil

Ditinjau sebuah aerofoil dengan lebar tidak terhingga di suatu media fluida yang diam. Karena lebar dari aerofoil tidak terhingga, maka tinjauan di sini dapat disederhanakan dalam daerah aliran 2 dimensi. Penampang aerofoil tersebut digerakkan dari posisi diam dengan suatu percepatan sampai mencapai kecepatan v , dan dipertahankan konstan. Proses dari saat belum ada sirkulasi sampai terjadinya sirkulasi dapat dijelaskan sebagai berikut (perhatikan gambar 2.4).

- Pertama-tama aliran fluida akan mempunyai pola seperti gambar 2.4.a, di mana titik stagnasi S_2 tidak berhimpit dengan ujung belakang (*trailing edge*) dari penampang aerofoil.
- Begitu penampang mulai bergerak, saat itu juga timbul aliran sepanjang *trailing edge*. Karena adanya tekanan yang tinggi di daerah belakang titik stagnasi S_2 , maka akan menyebabkan partikel-partikel fluida yang mengalir menyusuri sepanjang *trailing edge* akan terlempar dijauhkan dari permukaan *trailing edge* tersebut (gambar 2.4.b). Gerakan-gerakan dari partikel fluida tersebut akan merupakan sirkulasi (*vortex*) kecil-kecil yang merupakan suatu *free vortex* yang terlepas dari *boundary layer* yang menyelubungi penampang aerofoil. *Vortex* tersebut disebut sebagai *starting vortex* atau *initial vortex*. *Vortex* semacam ini terjadi pada sayap pesawat pada saat tinggal landas.
- *Starting vortex* ini yang menyebabkan terjadinya rangkaian tertutup yang akan merubah bentuk atau pola aliran *streamline* yang menyelubungi penampang aerofoil tersebut. Sesaat kemudian, titik stagnasi S_2 akan bergerak dan bergeser kebelakang mendekati *trailing edge* (gambar 2.4.c).

- Kekuatan dari *starting vortex* dan sirkulasi bertambah besar sampai suatu harga di mana pada saat itu titik stagnasi S_2 telah sampai dan berhenti di titik ujung belakang *trailing edge*, dan kemudian *starting vortex* tersebut akan hanyut menjadi satu dengan aliran fluidanya. Keadaan demikian akan terus berulang-ulang selama aliran *streamline* melewati penampang aerofoil, sehingga akan memberi kesan adanya aliran sirkulasi disekitar penampang aerofoil (gambar 2.4.d).

Dari uraian di atas dapatlah dinyatakan bahwa penampang yang berbentuk aerofoil adalah merupakan pembuat (*generator*) sirkulasi (*vortex*) dan ia juga merupakan pusat (*nucleus*) dari sirkulasi tersebut.



Gambar 2.5 : Partikel fluida dalam aliran vortex

Perhatikan gambar 2.5, aliran *vortex* dipengaruhi oleh hubungan tertentu antara kecepatan v dan jarak r dari lingkaran *streamline* ke titik pusat. Kecepatan sepanjang *streamline* besarnya tetap/ konstan dan berbanding terbalik terhadap jarak r . Dapat dinyatakan dalam persamaan berikut ini:

$$r \cdot v = c \text{ (konstan)} \quad (2.3)$$

di mana:

r : jari-jari vektor yang diukur dari titik pusat O sebagai titik kerja dari vektor kecepatan.

v : kecepatan disetiap titik, arahnya tegak lurus terhadap jari-jari vektor.

Untuk membuktikan persamaan aliran *vortex* dapat dijelaskan berikut ini:

1. Besarnya gaya sentrifugal: $K = m \cdot a = (\rho \cdot dx \cdot dy \cdot dr) \frac{v^2}{r}$ (2.4)

2. Menurut persamaan Bernoulli:

$$\begin{aligned} p + \frac{1}{2} \rho v^2 &= (p + dp) + \frac{1}{2} \rho (v + dv)^2 \\ p + \frac{1}{2} \rho v^2 &= p + dp + \frac{1}{2} \rho v^2 + \frac{1}{2} \rho \cdot 2v \cdot dv + \frac{1}{2} \rho \cdot dv^2 \\ 0 &= dp + \frac{1}{2} \rho \cdot 2v \cdot dv + \frac{1}{2} \rho v^2 - \frac{1}{2} \rho v^2 + \frac{1}{2} \rho \cdot dv^2 \end{aligned} \quad (2.5)$$

harga dv^2 dapat diabaikan, $dv^2 \approx 0$, jadi: $dp = -\rho \cdot v \cdot dv$ (2.6)

3. Harga perbedaan tekanan dapat ditentukan juga dengan:

$$dp = \frac{K}{dx \cdot dy} \quad (2.7)$$

4. Sehingga dari persamaan 2.4 dan 2.7 dapat diurai sebagai berikut:

$$\begin{aligned} -\rho \cdot v \cdot dv &= \frac{(\rho \cdot dx \cdot dy \cdot dr) \frac{v^2}{r}}{dx \cdot dy} \\ -\rho \cdot v \cdot dv &= \frac{\rho v^2 \cdot dr}{r} \\ -dv &= \frac{v \cdot dr}{r} \\ \frac{dv}{v} + \frac{dr}{r} &= 0 \end{aligned} \quad (2.8)$$

Dari persamaan di atas dapat disimpulkan bahwa: $v \cdot r = \text{konstan}$, ini dapat diartikan untuk harga r yang sama, besarnya kecepatan v konstan, dan untuk harga r yang berbeda, besarnya v berbanding terbalik terhadap r . Perhatikan kembali gambar 2.1, di mana:

$$v_c = v = \frac{c}{r}$$

$$v_s = v_c \cos \beta = \frac{c}{r} \cos \beta \quad (2.9)$$

$$ds = \frac{r \cdot d\varphi}{\cos \beta} \quad (2.10)$$

jadi persamaan 2.1 menjadi:

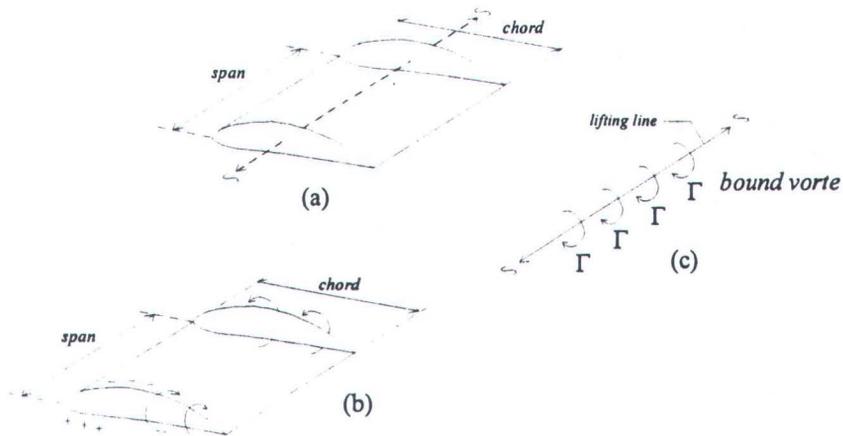
$$\begin{aligned} \Gamma &= \oint v_s \cdot ds \\ &= \int_0^{2\pi} \frac{c}{r} \cdot \cos \beta \cdot \frac{r \cdot d\varphi}{\cos \beta} \\ &= \int_0^{2\pi} c \cdot d\varphi \\ &= 2\pi \cdot c \\ &= v_c \cdot 2\pi \cdot r \end{aligned} \quad (2.11)$$

2.3. LIFTING LINE

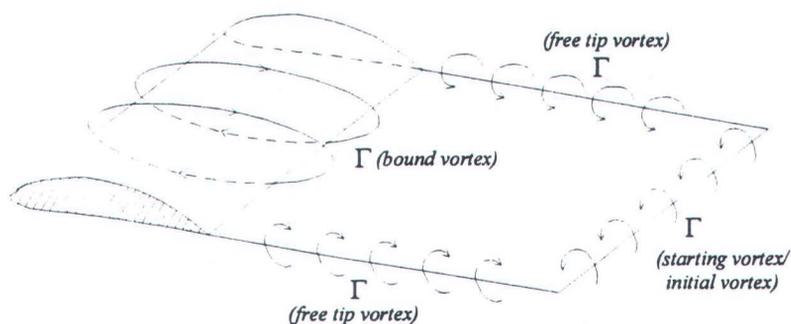
Bila panjang dari aerofoil (*chord*) diperpendek mendekati nol, seolah-olah menjadi suatu garis, maka garis tersebut dinamakan *lifting line* (gambar 2.6). *Lifting line* ini merupakan sumbu dari sirkulasi (*vortex*) yang menghasilkan gaya angkat dari aerofoilnya. *Vortex* yang bersumbu *lifting line* disebut *lifting vortex* (*bound vortex*).

Jika lebar bentangan dari aerofoil (*span*) dibuat tidak berhingga, maka setiap titik pada sumbu transversal akan mempunyai besar kekuatan sirkulasi yang sama (konstan). Untuk *span* terbatas, keadaannya tidak demikian, dalam hal ini akan ada suatu aliran baru yang terjadi di kedua ujung *span* yang arahnya dari bawah ke atas (perhatikan gambar 2.7). Hal ini dapat dipahami karena dipermukaan bawah tekanan lebih tinggi dari permukaan atas dari aerofoil.

Dengan demikian pada kedua ujung aerofoil itu akan terjadi aliran sirkulasi (*vortex*) yang disebut *tip vortex*. Karena aerofoil ini berjalan, maka *tip vortex* tersebut akan tertinggal di belakang dan membentuk dua barisan *vortex* di kedua ujung aerofoil. *Tip vortex* ini merupakan *vortex* yang bebas (*free tip vortex*) di mana sumbu *vortex*-nya tidak terletak di penampang aerofoilnya, melainkan berada di fluida bebas di mana aerofoil tersebut bergerak. Berbeda dengan *lifting vortex* (*bound vortex*), *tip vortex* tidak dapat memproduksi gaya angkat (*lifting force*).



Gambar 2.6: (a) Aerofoil dengan span tidak terbatas;
 (b) Aerofoil dengan span terbatas;
 (c) *Lifting vortex* (*bound vortex*)



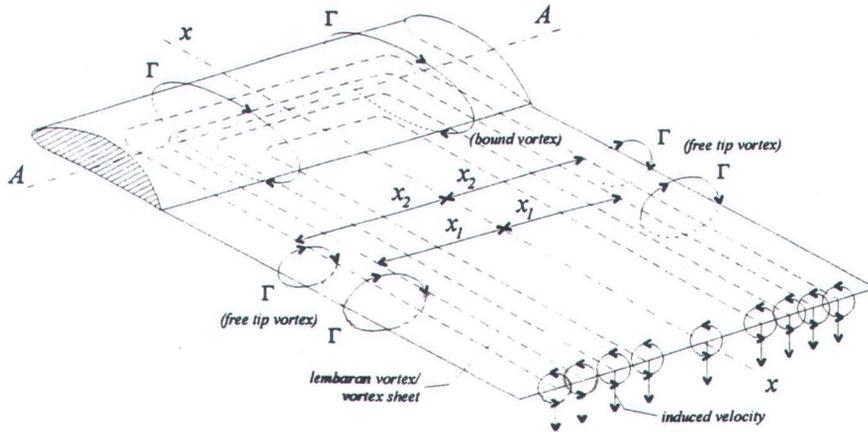
Gambar 2.7 : Sistem *vortex* tertutup pada *span* terbatas

Perhatikan gambar 2.8, Kekuatan setiap *vortex* pada lembaran *vortex* adalah perbedaan kekuatan sirkulasi di tempat itu pada sumbu *A-A*. Kekuatan *free tip vortex* yang terbentuk antara jarak x_1 dan x_2 adalah $\Gamma_1 - \Gamma_2$. Kekuatan *free tip vortex* antara jarak x_1 dan titik *A* adalah $\Gamma_1 - 0 = \Gamma_1$. Untuk penampang aerofoil yang sesungguhnya (*chord* $\neq 0$), tidak hanya terdapat satu buah *lifting vortex* saja, melainkan terdapat satu perangkat *lifting vortex* yang terbentuk di tempat di mana kekuatan totalnya sama dengan kekuatan sirkulasi dari penampang aerofoil.

Dalam prakteknya, aerofoil akan mempunyai lebar bentangan (*span*) terbatas dan *chord* tertentu. Dalam hal ini sistem *vortex* dari penampang daun aerofoil akan merupakan suatu lembaran *vortex* (*vortex sheet*). Pola dari besarnya kekuatan sirkulasi pada titik-titik sepanjang aerofoil tersebut merupakan suatu *ellipse*.

Jika diambil dua *vortex* yang masing-masing terletak di *vortex sheet* dengan jarak yang sama terhadap sumbu *X-X* dan masing-masing terletak di sebelah kiri dan kanan sumbu tersebut, maka dapat dilihat bahwa masing-masing terletak dalam daerah kecepatan (*velocity field*) terhadap daerah yang lain. Karena *vortex* tersebut bekerja di daerah kecepatan dari *vortex* yang lain, maka dapat dianggap seolah-olah ada suatu kecepatan ke arah bawah yang bekerja di titik di mana *vortex* tersebut ditinjau. Kecepatan tersebut dinamakan *induced velocity*. Besarnya *induced velocity* di belakang jauh tak berhingga dari aerofoil adalah dua kali besarnya *induced velocity* pada penampang aerofoil, hal ini dapat dijelaskan bahwa di titik jauh dibelakang aerofoil, *vortex* bebas (*free vortex*) yang menimbulkan *induced velocity* di tempat itu memanjang jauh tidak terhingga dari arah dua jurusan, sedangkan pada titik-titik sepanjang aerofoil, *vortex* bebas yang

menimbulkan *induced velocity* hanya memanjang jauh tak terhingga dari satu arah jurusan saja.



Gambar 2.8 : Lembaran vortex (vortex sheet)

2.4. TEORI SIRKULASI UNTUK BALING-BALING KAPAL

Seperti dijabarkan di muka, bahwa gaya dorong yang ditimbulkan oleh baling-baling disebabkan adanya perbedaan tekanan antara sisi muka daun dan punggung daun. Perbedaan tekanan ini ditimbulkan akibat penampang daun baling-baling berbentuk aerofoil. Putaran baling-baling di dalam air menyebabkan timbulnya aliran sirkulasi disekeliling daun baling-baling. Aliran sirkulasi tersebut menyebabkan timbulnya kenaikan kecepatan setempat pada punggung daun dan penurunan kecepatan setempat pada muka daun.

Daun baling-baling merupakan potongan aerofoil (aerofoil dengan *span* terbatas) yang berputar di dalam fluida berviskositas. Gaya hidrodinamika yang bekerja pada masing-masing penampang elemen daun adalah gaya angkat ($lift = dL$) dan tahanan ($drag = dD$), perhatikan gambar 2.9. Pada gambar tersebut juga diilustrasikan gaya-gaya pada kondisi fluida tanpa kekentalan (berindeks i). Gaya angkat dL_i bekerja tegak lurus arah kecepatan resultant (v_r), dan tahanan dD

$$\begin{aligned}
 T &= z \int_{r_H}^R dT \cdot dr \\
 &= z \int_{r_H}^R (dL_i \cos \beta_i - dD \sin \beta_i) \cdot dr
 \end{aligned}
 \tag{2.12}$$

$$\begin{aligned}
 Q &= z \int_{r_H}^R dQ \cdot dr \\
 &= z \int_{r_H}^R (dL_i \sin \beta_i + dD \cos \beta_i) r \cdot dr
 \end{aligned}
 \tag{2.13}$$

di mana:

z : banyaknya daun baling-baling

R : jari-jari baling-baling, dan r_H adalah jari-jari hub

$$dL_i = \rho \cdot \Gamma \cdot v_r \cdot dr$$

$$dQ = r \cdot dF$$

Dengan menyelesaikan integral kedua fungsi tersebut, maka efisiensi keseluruhan baling-baling adalah:

$$\eta = \frac{T \cdot v_r}{2\pi n \cdot Q} \tag{2.14}$$

Untuk aerofoil dengan span tidak terhingga yang bergerak dalam fluida yang mempunyai viskositas, akan mengalami beberapa macam tahanan (*drag*), yaitu tahanan gesek dan tahanan tekanan. Total kedua tahanan disebut tahanan profil. Tahanan gesek besarnya untuk satu satuan lebar bergantung dari panjangnya chord aerofoilnya (bergantung dari angka Reynolds aerofoilnya) dan keadaan kekasaran permukaannya. Sedangkan besarnya tahanan tekanan bergantung dari besarnya angka perbandingan panjang dan tebal (*thickness ratio* = t_x/l) penampang aerofoil, dan juga tergantung dari besarnya sudut pukul.

Daun baling-baling dapat dimisalkan suatu aerofoil dengan span terbatas. Tahanan total dari aerofoil yang mempunyai span terbatas dalam fluida berviskositas akan terdiri dari:

Tahanan profil (tahanan gesek dan tahanan tekanan)

Tahanan yang disebut *induced resistance* (tahanan akibat adanya *induced velocity*/ kecepatan induksi)

Untuk keperluan perhitungan biasanya dipakai beberapa harga koefisien tidak berdimensi sebagai berikut:

- Koefisien gaya angkat (*lift coefficient*)

$$c_L = \frac{dL}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_r^2 \cdot dA} \quad (2.15)$$

di mana:

c_L : koefisien gaya angkat (*lift coefficient*)

dL : gaya angkat (*lift*)

v_r : kecepatan relatif fluida terhadap elemen daun

ρ : *density* dari fluida

dA : luas elemen yang ditinjau, $dA = l \cdot dr$

l : panjang chord ; dr : lebar elemen

- Koefisien tahanan (*drag coefficient*)

Untuk *span* tidak terbatas:

$$c_{Dp} = \frac{dDp}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot dA} \quad (2.16)$$

Untuk *span* terbatas

$$c_D = \frac{dD}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot dA} \quad (2.17)$$

di mana:

dD_p : tahanan profil

dD : tahanan total, $dD = dD_p + \text{induced resistance}$

Baik buruknya suatu profil dari aerofoil dapat diketahui dari angka perbandingan antara tahanan dan gaya angkat ($\text{drag-lift ratio} = \varepsilon$)

$$\varepsilon = \frac{dD}{dL} = \frac{c_D}{c_L} \quad (2.18)$$

Dari koefisien tersebut dapat disimpulkan bahwa profil yang baik adalah profil yang mempunyai harga ε yang kecil, di mana harga koefisien tahanan kecil dan harga koefisien gaya angkatnya besar.

Dari koefisien-koefisien di atas dapat diperhitungkan besarnya gaya dorong dan torsi dari setiap elemen daun baling-baling, yaitu:

$$dT = \rho \cdot v_r \left[\Gamma \cdot \cos \beta_i - \frac{1}{2} \cdot c_D \cdot v_r \cdot l \cdot \sin \beta_i \cdot dr \right] \quad (2.19)$$

$$dQ = \rho \cdot v_r \left[\Gamma \cdot \sin \beta_i + \frac{1}{2} \cdot c_D \cdot v_r \cdot l \cdot \cos \beta_i \cdot r \cdot dr \right] \quad (2.20)$$

Dengan demikian, maka gaya dorong T dan torsi Q baling-baling dapat dihitung dengan jalan mengintegalkkan dari jari-jari hub r_H ke ujung daun baling-baling.

Dari gambar 2.9. diperlihatkan bahwa besarnya *induced velocity* (u) dijabarkan dalam dua komponen aksial (u_a) dan tangensial (u_t). Estimasi besarnya harga komponen kecepatan aksial dan tangensial diberikan pada persamaan berikut:

$$u_a = 2 \cdot a \cdot v_a \quad (2.21)$$

$$\text{dan} \quad u_t = 2 \cdot a' \cdot \omega \cdot r \quad (2.22)$$

di mana:

a : faktor aksial *induced velocity*

a' : faktor tangensial *induced velocity*

Dari persamaan 2.11. (Kutta-Joukowski), v_c merupakan komponen tangensial dari sirkulasi. Sehingga untuk setiap daun baling-baling, besarnya kekuatan sirkulasi adalah:

$$\Gamma = \frac{2\pi \cdot r \cdot u_t}{z}$$

dengan z : jumlah daun baling-baling

Golstein memberikan koreksi terhadap persamaan kekuatan sirkulasi untuk beberapa jumlah daun yang digunakan. Jumlah daun tersebut adalah 3 s/d 6, sesuai dengan diagram yang diberikan oleh Goldsetein (lampiran1). Diagram tersebut merupakan fungsi dari jumlah daun baling-baling (z), *radius fraction* (r/R) dan *induced advance ratio* (λ_i). Persamaan berikut ini merupakan persamaan kekuatan sirkulasi yang telah dikoreksi dengan melibatkan Goldstein *factor* (κ).

$$\Gamma = \frac{2\pi \cdot r \cdot \kappa \cdot u_t}{z}$$

eliminasi persamaan 2.22, menjadi:

$$\Gamma = \frac{4\pi \cdot \kappa \cdot r^2 \cdot \omega \cdot a'}{z}$$

Besarnya *advance angle* (β) dapat ditentukan dengan persamaan:

$$\tan \beta = \frac{v_A}{\omega \cdot r} = \frac{v_A}{\pi x n D} \quad \rightarrow \quad \lambda = \frac{v_A}{\pi n D} \quad (2.23)$$

$$= \frac{\lambda}{x}$$

di mana: v_A : *speed of advance*
 x : *radius fraction (r/R)*
 D : *diameter baling-baling*
 λ : *advance coefficient*

Lebih lanjut besarnya *hydrodynamic pitch angle* (β_i) dapat ditentukan dengan persamaan:

$$\tan \beta_i = \frac{v_A \cdot (1 + a)}{\omega \cdot r \cdot (1 - a')} = \tan \beta \frac{(1 + a)}{(1 - a')} \quad (2.24)$$

$$\tan \beta_i = \frac{\lambda_i}{x} = \frac{\lambda}{\eta_i x} = \frac{\tan \beta}{\eta_i} \quad \lambda_i = \frac{\lambda}{\eta_i} \quad (2.25)$$

di mana: η_i : ideal efficiency

Jadi *induced velocity factor* (a) dapat ditentukan dengan:

$$\tan \beta_i = \frac{a' \cdot \omega \cdot r}{a \cdot v_A} \quad (2.26) \quad a = \frac{a'}{\tan \beta \cdot \tan \beta_i} \quad (2.27)$$

substitusi persamaan 2.27 ke dalam persamaan 2.24, sehingga:

$$a' = \frac{\tan \beta_i (\tan \beta_i - \tan \beta)}{1 + \tan^2 \beta_i} \quad (2.28)$$

eliminasi persamaan 2.25:

$$a' = \frac{\tan \beta_i (1 - \eta_i)}{1 + \tan^2 \beta_i} \quad (2.29)$$

harga *induced velocity factor* (a') juga dapat ditentukan dengan:

$$a' = \frac{u_i}{2v_A} \tan \beta = \frac{u_i}{2v_A} \cdot \frac{\lambda}{x} \quad (2.30)$$

Geometric pitch angle (ϕ) ditentukan dengan persamaan:

$$\tan \phi = \frac{P}{2 \cdot \pi \cdot r} = \frac{p}{\pi x} \quad \longrightarrow \quad p = \frac{P}{D} \quad (2.31)$$

$$\tan \beta_i = \frac{p_h}{\pi x} \quad (2.32) \quad p_h = \pi \lambda_i \quad (2.33)$$

di mana: P : pitch p : pitch ratio (diameter)

p_h : hydrodynamic pitch ratio = P_h/D

Jadi dari persamaan-persamaan di atas, besarnya vektor kecepatan v_r dapat ditentukan dengan persamaan:

$$v_r = \omega \cdot r \cdot (1 - a') \cdot \sec \beta_i = \frac{v_A(1 - a') \cdot \sec \beta_i}{\tan \beta} \quad (2.34)$$

Sehingga persamaan 2.2 (Kutta-Joukowski) dapat dijabarkan sebagai berikut:

$$dL = \rho \cdot \Gamma \cdot v_r \cdot dr \quad \Gamma = \frac{4 \cdot \pi \cdot \kappa \cdot r^2 \cdot \omega \cdot a'}{z}$$

$$dL = \frac{4 \cdot \pi \cdot \rho \cdot \kappa \cdot r^2 \cdot \omega \cdot a' \cdot v_r \cdot dr}{z} \quad (2.35)$$

$$= \frac{4 \cdot \pi \cdot \rho \cdot \kappa \cdot r^2 \cdot \omega^2 \cdot a' \cdot (1 - a') \cdot \sec \beta_i \cdot dr}{z}$$

Untuk menentukan koefisien *lift*, substitusi persamaan 2.35 ke persamaan 2.15:

$$c_L = \frac{2 \cdot dL}{\rho \cdot v_r^2 \cdot l \cdot dr} = \frac{4\pi \cdot \kappa \cdot a'}{z \cdot \frac{l}{D} \cdot (1 - a') \cdot \sqrt{1 + \tan^2 \beta_i}} \quad (2.36)$$

Setelah estimasi besarnya *lift* ditentukan, dapat diperhitungkan besarnya *thrust* (T) dan *torque* (Q) dari penampang baling-baling. Pada gambar 2.9. dapat diperhatikan besarnya *thrust* dan *torque* pada aliran *non viscous* setiap penampang baling-baling, yaitu:

$$dT_i = z \cdot dL_i \cdot \cos \beta_i$$

$$\frac{dT_i}{dr} = 4\pi \cdot \rho \cdot \kappa \cdot r^3 \cdot \omega^2 \cdot a' \cdot (1 - a') = 16 \cdot \pi \cdot \rho \cdot \kappa \cdot r^3 \cdot n^2 \cdot a' \cdot (1 - a') \quad (2.37)$$

$$T_i = \int_{R_h}^R \frac{dT_i}{dr} dr$$

$$dF_i = \frac{1}{r} dQ_i = z \cdot dL_i \cdot \sin \beta_i$$

$$\frac{dQ_i}{dr} = 4\pi \cdot \rho \cdot \kappa \cdot r^4 \cdot \omega^2 \cdot a' \cdot (1 - a') \tan \beta_i = r \frac{dT_i}{dr} \tan \beta_i \quad (2.38)$$

$$Q_i = \int_{R_h}^R \frac{dQ_i}{dr} dr$$

Besarnya koefisien *thrust* dan *power* pada aliran *non viscous* setiap penampang dapat ditentukan dengan persamaan:

$$\frac{d}{dx} C_{T_i} = \frac{8 \cdot x \cdot \kappa \cdot a^i (1 - a^i)}{\tan^2 \beta} \quad (2.39) \quad \frac{d}{dx} C_{P_i} = \frac{d}{dx} C_{T_i} \quad (2.40)$$

Pada kondisi fluida dengan kekentalan (*viscous*), besarnya *thrust*, *torque* dan koefisien-koefisiennya menjadi:

$$\begin{aligned} dT &= dT_i - z \cdot dD \cdot \sin \beta_i \\ &= dT_i - \varepsilon \cdot dT_i \cdot \tan \beta_i \end{aligned} \quad (3.41)$$

$$\begin{aligned} dF &= dF_i + z \cdot dD \cdot \cos \beta_i \\ dQ &= dQ_i + \frac{\varepsilon}{\tan \beta_i} dQ_i \end{aligned} \quad (3.42)$$

$$\frac{d}{dx} C_T = (1 - \varepsilon \cdot \tan \beta_i) \cdot C_{T_i} \quad (2.43)$$

$$\frac{d}{dx} C_P = \left(1 + \frac{\varepsilon}{\tan \beta_i} \right) \cdot C_{P_i} \quad (2.44)$$

Dari persamaan-persamaan teori *vortex* yang telah diuraikan di atas, maka untuk menjabarkannya dalam perencanaan baling-baling kapal diperlukan suatu metode atau langkah-langkah perhitungan yang dapat mengakomodasi seluruh teori atau konsep-konsep menjadi tahapan-tahapan perencanaan yang mudah untuk diperhitungkan. MK. Eckhardt dan WB. Morgan memberikan suatu metode untuk menjabarkan teori tersebut dalam suatu tahapan-tahapan perencanaan. Metode ini akan dibahas pada bab selanjutnya.

BAB III

METODE ECKHARDT-MORGAN

UNTUK MERENCANAKAN BALING-BALING KAPAL

Metode ini memperkenalkan perencanaan baling-baling kapal dengan menggunakan teori *vortex* (sirkulasi) yang berdasarkan prinsip hidrodinamika, yaitu gaya angkat permukaan yang dihasilkan merupakan hasil sirkulasi fluida yang berada di sekitar piringan daun baling-baling. Metode ini dikembangkan oleh M. K. Eckhardt dan W. B. Morgan, di mana dalam setiap perhitungan digunakan diagram yang diberikan oleh Goldstein. Metode ini sangat praktis diterapkan dalam perencanaan baling-baling, karena setiap perhitungan menggunakan persamaan-persamaan matematika praktis yang mudah diterapkan dalam perhitungan komputasi.

Dalam perencanaan baling-baling kapal dengan metode ini banyak sekali ditemukan diagram-diagram yang digunakan dalam setiap perhitungan, oleh karena itu untuk mempermudah perhitungan, maka dalam Tugas Akhir ini akan dilakukan pendefinisian persamaan lengkung kurva atau permukaan dengan menggunakan metode *Basis Spline*. Hal ini akan dibahas kemudian.

Prosedur perencanaan baling-baling dengan metode Eckhardt-Morgan meliputi:

1. Penentuan input data yang diperlukan dalam perhitungan.
2. Penentuan besarnya *hydrodynamic pitch angle*
3. Penentuan koefisien gaya angkat (c_L), *expanded blade area ratio* (A_E/A_O), ratio antara tebal maksimum dan panjang maksimum (*thickness ratios* = t_x/l), rasio antara tebal *camber* maksimum dan panjang maksimum (*camber ratios* =

m_x/l) berdasarkan perhitungan harga kavitasi dari penampang daun baling-baling.

4. Melakukan koreksi camber dari teori gaya angkat permukaan (*lifting-surface theory*).
5. Melakukan koreksi besarnya pitch dari teori gaya angkat permukaan dan dari besarnya garis rata-rata (*mean line*) pada kondisi aliran ideal dan aliran dengan kekentalan.
6. Analisa kekuatan daun baling-baling
7. Melakukan pengecekan terhadap besarnya gaya dorong dan tenaga pendorong, serta perkiraan-perkiraan mengenai perhitungan sebelumnya.

Dalam pembahasan selanjutnya akan dilakukan 2 model perencanaan baling-baling kapal, yaitu perencanaan pada *non optimum free-running propeller* (*open water propeller*) dan pada *wake-adapted propeller*.

3.1. PERENCANAAN PADA *NON OPTIMUM FREE-RUNNING PROPELLER*

Perencanaan pada *non optimum free-running propeller* didasarkan pada kondisi dimana baling-baling berputar bebas pada daerah aliran kecepatan yang homogen (*uniform*) tanpa dipengaruhi oleh adanya gerakan kapal. Tahap-tahap perencanaan meliputi:

1. Menentukan input data yang diperlukan dalam perhitungan, antara lain:

Kecepatan dinas kapal (v_s)

Shaft Horsepower (P_s)

Putaran mesin (n)

Tahanan kapal (R_s)

Effective wake fraction (w_0)

Thrust deduction fraction (t)

Jumlah daun baling-baling (z)

Penentuan diameter optimum (D) dapat diperoleh dengan menggunakan Troost series, yaitu dengan bantuan $B_U\text{-}\delta$ diagram atau dapat menggunakan persamaan:

$$D = 50 \frac{(P_s)^{0.2}}{n^{0.6}} \text{ (ft)} \quad (3.1)$$

2. Penentuan koefisien-koefisien awal yang digunakan dalam perhitungan selanjutnya, antara lain:

- $v_A = \text{speed of advance (knot)} = v_s (1 - w_0)$ (3.2)

- *Advance coefficient (λ):*

$$\lambda = \frac{101.27 \cdot v_A}{\pi \cdot n \cdot D} \quad (3.3)$$

- *Advance angle (β):*

$$\tan \beta = \frac{\lambda}{x} \quad (3.4)$$

- *Koefisien gaya dorong (C_T):*

$$C_T = \frac{T}{\frac{\rho}{2} \frac{D^2}{4} \pi (1.688 \cdot v_A)^2} \quad (3.5)$$

Untuk perencanaan lebih lanjut digunakan koefisien gaya dorong berdasarkan aliran fluida tanpa kekentalan (*non viscous flow*), yaitu:

$$C_{Ti} = \frac{C_T}{1 - 2 \cdot \varepsilon \cdot \lambda_i} \quad (3.6)$$

karena besarnya *drag-lift ratio* (ε) belum diketahui, maka besarnya C_{Ti} dapat ditentukan dengan menggunakan rumus pendekatan, yaitu:

$$C_{Ti} = (1,02 \sim 1,06) \cdot C_T \quad (3.7)$$

- Besarnya gaya dorong baling-baling (*propeller thrust* = T):

$$T = \frac{325,86 \cdot Pe}{V(1-t) \cdot \cos \varphi} = \frac{R_s}{(1-t) \cos \varphi} \quad (3.8)$$

φ : sudut poros baling-baling yang direncanakan

3. Perhitungan *hydrodynamic pitch angle* (β_i) dan *pitch ratio* (P/D) awal:

Harga β_i dapat ditentukan dengan:

$$\tan \beta_i = \frac{\lambda}{x \cdot \eta_i} \quad (3.9)$$

η_i : koefisien ideal baling-baling, diperoleh dari diagram Kramer's Thrust Coefficient (lampiran 2).

Dari perhitungan β_i dan β dapat diperhitungkan harga *pitch ratio* (P/D) awal, yaitu:

$$\tan \beta_i = \frac{\tan \beta}{\eta_i} = \frac{(P/D)_i}{\pi \cdot x} \quad (3.10)$$

di mana:

$$\lambda_i = \lambda / \eta_i \quad (3.10a)$$

x : *radius fraction* (r/R)

r : radius dari tiap penampang baling-baling

β : *advance angle*

$(P/D)_i$: *pitch ratio* awal

β_i dan $(P/D)_i$ tersebut diperhitungkan pada radius 0,7 baling-baling, untuk memperoleh perhitungan pada setiap penampang baling-baling, maka dilakukan distribusi *pitch* dari setiap penampang yang bentuknya parabolik dari *hub* ke radius 0,6 dan garis lurus dari radius 0,6 ke ujung baling-baling. Besarnya distribusi *pitch* tersebut diberikan oleh tabel di bawah ini:

x	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
$ph_x/ph_{0,7}$	1.090	1.080	1.070	1.055	1.030	1.000	0.970	0.940	0.910

Tabel 3.1 : Distribusi *pitch* setiap penampang terhadap *pitch* radius 0,7

di mana :

x : *radius fraction*

ph_x : distribusi *pitch* setiap penampang baling-baling

$ph_{0,7}$: *pitch* pada radius 0,7 penampang baling-baling

Jadi besarnya β_i pada setiap penampang dapat diperhitungkan dengan

persamaan:
$$\tan \beta_i = \frac{ph_x / ph_{0,7}}{\pi \cdot x} \quad (3.11)$$

4. Perhitungan koefisien gaya dorong dan koreksi *hydrodynamic pitch angle* (β_i):

Besarnya koefisien gaya dorong (C_{Ti}) dapat diperhitungkan dengan persamaan:

$$C_{Ti} = 8 \int_{x_h}^1 xK \frac{u_t}{2V_A} \left(\frac{x}{\lambda} - \frac{u_t}{2V_A} \right) dx \quad \rightarrow \quad \frac{u_t}{2V_A} = \frac{\sin \beta_i \cdot \sin(\beta_i - \beta)}{\sin \beta} \quad (3.12)$$

Perhitungan koefisien gaya dorong ini dilakukan untuk mengoreksi besarnya *hydrodynamic pitch angle* (β_i) dari setiap penampang baling-baling yang telah diperhitungkan sebelumnya. Apabila besarnya koefisien gaya dorong ini belum sama dengan perhitungan sebelumnya, maka dilakukan koreksi

terhadap besarnya *hydrodynamic pitch angle* (β_i) dan setelah itu dilakukan kembali perhitungan gaya dorong dengan persamaan di atas. Proses ini akan selalu diiterasi sampai besarnya harga koefisien gaya dorong sama dengan perhitungan sebelumnya (langkah 1).

Koreksi *hydrodynamic pitch angle* (β_i) dapat dilakukan dengan persamaan:

$$\tan \beta_i (\text{koreksi}) = \tan \beta_i \left(1 + \frac{C_{Ti}' - C_{Ti}}{5 \cdot C_{Ti}'} \right) \quad (3.13)$$

di mana:

- C_{Ti}' : C_T rata-rata pada aliran non viscous
- C_{Ti} : C_T pada aliran *non viscous* diukur dari setiap penampang
- x : r/R (*radius fraction*)
- x_h : r/R pada pangkal baling-baling (*hub*)
- κ : *Goldstein function* (lampiran 1)

5. Estimasi koefisien gaya angkat (*lift coefficient* = c_L):

Besarnya koefisien gaya angkat dapat diperoleh dari persamaan:

$$\frac{c_L \cdot l}{D} = \frac{4 \cdot \pi}{z} \frac{x \cdot \kappa \cdot \frac{u_t}{2 \cdot V_A}}{\frac{x}{\lambda} - \frac{u_t}{2V_A}} \cdot \cos \beta_i \quad (3.14)$$

6. Perhitungan besarnya kavitasi (σ) untuk setiap penampang daun baling-baling:

$$\sigma = \frac{\gamma}{\frac{\rho}{2} (1.688 \cdot V_A)^2} \left[\frac{(p + p_a) \sin^2 \beta}{\cos^2 (\beta_i - \beta)} \right] \quad (3.15)$$

di mana:

- γ : *specific weight* air
- ρ : *density* air

p_a : kedalaman air pada tekanan atmosfer

p : kedalaman air diukur dari setiap radius penampang yang diperhitungkan

7. Estimasi untuk menentukan tebal maksimum daun baling-baling (t_x):

Distribusi tebal maksimum dari penampang daun baling-baling dapat diperhitungkan dari fraksi ketebalan daun baling-baling, dengan rumus yang diberikan oleh Van Manen dan Troost, yaitu:

$$\frac{t_x}{D} = \frac{t_{Tip}}{D} + f \left[\frac{t_0}{D} - \frac{t_{Tip}}{D} \right] \quad (3.16)$$

Taylor memberikan estimasi ketebalan daun baling-baling dengan persamaan:

$$\frac{t_o}{D} = \frac{1}{D} \sqrt[3]{\frac{C_1 \cdot P_b}{4.123 \cdot n \cdot S_c}} \quad (3.16a)$$

di mana: C_1 : koefisien estimasi tebal daun baling-baling yang merupakan fungsi dari *pitch ratio* (P/D) pada radius 0.7, diperoleh dari diagram yang diberikan oleh Taylor (lampiran 5).

P_b : SHP setiap daun baling-baling

S_c : tegangan maksimum baling-baling yang diijinkan, sesuai dengan bahan yang dipakai untuk baling-baling.

Ciri bahan yang dapat dipakai untuk baling-baling, dinyatakan dalam table berikut ini:

Bahan	Massa jenis [g/cm ³]	Kekuatan tarik minimum [N/mm ²]	Tegangan yang diijinkan [N/mm ²]
Gray cast iron spheroidal or nodular	7.2	250	17.2
Graphite cast iron	7.3	400	20.6
Carbon & low-alloy steels	7.9	400	20.6

13% Chromium stainless steels	7.7	500	41.2
Chromium-nickel austenitic stainless steels	7.9	450	41.2
Manganese bronze (high tensile brass)	8.3	440	43.1
Nickel-manganese bronze (high tensile brass)	8.3	440	43.1
Nickel-aluminium bronze	7.6	590	56.0
Manganese-aluminium bronze	7.5	630	51.0

Tabel 3.2: Ciri-ciri bahan untuk baling-baling

t_{tip} / D : *thickness fraction* pada tip ≈ 0.003

f : koefisien distribusi radial dari tebal maksimum, diperoleh dari tabel

Romson's, yang merupakan fungsi dari *radius fraction* (r/R).

r/R	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
f	0.788	0.665	0.551	0.443	0.344	0.251	0.162	0.079	0.000

Tabel 3.3: Koefisien untuk distribusi radial dari tebal maksimum

8. Perhitungan *thickness ratio* (t_x/l), *camber ratio* (m_x/l) dan koefisien gaya angkat (c_L) untuk menentukan geometri baling-baling:

Thickness ratio (t_x/l) dan *camber ratio* (m_x/l) dapat ditentukan dengan diagram *incipient cavitations curve* (lampiran 3) dari seri aerofoil NACA 16 dan 66.

Diagram tersebut merupakan fungsi $c_L.l/t_x$ terhadap harga kavitasi. Besarnya t_x/l dan m_x/l dapat ditentukan dengan mengamati hubungan antara $c_L.l/t_x$ dan harga kavitasi, di mana $c_L.l/t_x$ dapat diperoleh dari harga $c_L.l/D$ dan t_x/D .

Harga *thickness ratio* juga dapat ditentukan dengan persamaan yang diberikan oleh Walchner, yaitu:

$$\sigma = \frac{2}{\pi} \left(c_L + 4 \cdot \frac{t_x}{l} \right) \quad (3.15a)$$

Sedangkan *camber ratio* dapat ditentukan dari geometri aerofoil yang digunakan, yaitu dengan persamaan:

$$m_x / l = c_L \cdot 0.06790 \quad \text{untuk NACA } a = 0.8 \text{ mean line} \quad (3.17a)$$

$$m_x / l = c_L \cdot 0.06790 \quad \text{untuk NACA } a = 1.0 \text{ mean line} \quad (3.17b)$$

Sebelum menentukan geometri utama baling-baling terlebih dahulu dilakukan koreksi terhadap *camber* dari teori gaya angkat permukaan, yaitu:

$$\frac{m_x}{l} (\text{koreksi}) = k_1 \cdot k_2 \cdot \frac{m_x}{l} \quad (3.17c)$$

k_1 dan k_2 merupakan fungsi dari A_E/A_0 (*expanded blade area ratio*), diperoleh dari diagram *camber correction coefficient* (lampiran 4). Besarnya A_E/A_0 dapat ditentukan dengan persamaan:

$$A_E/A_0 = \frac{2z}{\pi} \int_{x_h}^l \frac{l}{D} dx \quad (3.18)$$

di mana:

x_h : jari-jari hub baling-baling

Pada tahap ini, geometri dari setiap penampang baling-baling (panjang = l , tebal = t_x dan *camber* = m_x) dapat ditentukan, untuk memperoleh geometri dan karakteristik baling yang lebih optimal, maka dari perhitungan-perhitungan tersebut dilakukan analisa terhadap kekuatan baling-baling (dibahas kemudian).

9. Perhitungan *pitch ratio* (P/D)

Setelah geometri setiap penampang baling-baling ditentukan, maka selanjutnya diperhitungkan besarnya *pitch ratio* (P/D) yang sesungguhnya dari setiap penampang baling-baling. Untuk menentukan besarnya *pitch ratio*

(P/D) yang sesungguhnya, maka dilakukan koreksi terhadap besarnya *pitch ratio* awal $(P/D)_i$. Ada tiga koreksi yang perlu dilakukan, hal ini menyangkut penambahan besarnya sudut masuk (*angle of attack*) dari setiap penampang baling-baling, koreksi tersebut antara lain : *angle of attack from friction*, *ideal angle of attack*, dan *angle of attack* terhadap teori gaya angkat permukaan.

Dua koreksi, yaitu koreksi *angle of attack from friction* dan koreksi *ideal angle of attack* dapat dikombinasi dalam persamaan:

$$\alpha_1 = 2,86 \cdot c_L \text{ [derajat]} \quad \text{untuk } \textit{circular arc mean line} \quad (3.19a)$$

$$\alpha_1 = 2,35 \cdot c_L \text{ [derajat]} \quad \text{untuk NACA } a = 1.0 \textit{ mean line} \quad (3.19b)$$

$$\alpha_1 = 1,15 \cdot c_L \text{ [derajat]} \quad \text{untuk NACA } a = 0.8 \textit{ mean line} \quad (3.19c)$$

Koreksi *angle of attack* terhadap teori gaya angkat permukaan ditentukan dengan persamaan:

$$\alpha_2 = \alpha_b + \alpha_f - (\alpha_i + \alpha_0)$$

koreksi ini melibatkan beberapa tahapan, antara lain:

- Perhitungan *angle of attack* akibat efek dari *bound vertices* (α_b):

$$\alpha_b = \frac{\sin \beta_i}{2} \sum \left[\left(\frac{l}{D} \sin \mu - 0.7 \cos \beta_i \cdot \cos \mu \right) \int_{x_h}^1 \frac{G \cdot dx}{(P/R)^3} \right] \quad (3.20)$$

di mana:

μ : posisi angular dari daun baling-baling, untuk daun 4 posisi angularnya bisa 0° , 90° , 180° , 270° dan 360°

$$(P/R)^3 = \left[x^2 + (l/D)^2 + 0.49 \right. \\ \left. - 2 \cdot (l/D) \cos \mu \cdot \cos \beta_i + 0.7 \sin \mu \right] x \quad (3.21)$$

$$G = \frac{2x\kappa}{z} \cdot \frac{u_i}{2v_A} \quad (3.22)$$

- Perhitungan *angle of attack* akibat efek dari *free vertices* (α_f):

$$\alpha_f = \alpha_i \frac{2}{1 + \cos^2 \beta_i \left(\frac{2}{h} - 1 \right)} \quad (3.23)$$

di mana:

$$\alpha_i = \beta_i - \beta \text{ [radian]} \quad (3.23a)$$

h : koefisien koreksi *pitch* untuk $r/R = 0.7$ (lampiran 6)

$$\text{dengan : } \theta = \arctan \left(\frac{0.7}{\sin \beta_i} \cdot \frac{D}{l} \right) \quad (3.23b)$$

- Perhitungan *angle of zero lift of mean line* (α_0)

$$\alpha_0 = 0,13 \cdot c_L \text{ [radian]} \quad \text{untuk } \textit{circular arc mean line} \quad (3.24a)$$

$$\alpha_0 = 0,12 \cdot c_L \text{ [radian]} \quad \text{untuk NACA a = 1.0 mean line} \quad (3.24b)$$

$$\alpha_0 = 0,139 \cdot c_L \text{ [radian]} \quad \text{untuk NACA a = 0.8 mean line} \quad (3.24c)$$

Jadi besarnya penambahan *angle of attack* akibat efek gaya angkat permukaan adalah:

$$\alpha_2 = 57.3 \cdot \left[\alpha_b + \alpha_i \left(\frac{2}{1 + \cos^2 \beta_i \left(\frac{h}{2} - 1 \right)} - 1 \right) - \alpha_0 \right] \quad (3.25)$$

Koreksi *pitch* untuk 0.7 radius adalah:

$$1 + \frac{\Delta P / D}{P / D} = \frac{\tan(\beta_i + \alpha_2)_{0.7}}{(\tan \beta_i)_{0.7}} \quad (3.26)$$

untuk perhitungan *pitch* setiap penampang baling-baling dapat digunakan persentase radius terhadap radius 0,7.

Jadi besarnya *pitch ratio* adalah:

$$P / D = \pi \cdot x \cdot \tan(\beta_i + \alpha_1) \cdot \left(1 + \frac{\Delta P / D}{P / D} \right) \quad (3.27)$$

Sampai pada tahap ini perencanaan telah selesai dilakukan, lebih lanjut akan dilakukan pengecekan terhadap koefisien gaya dorong (C_T) yang telah diperhitungkan sebelumnya.

10. Perhitungan koefisien gaya dorong (C_T):

Pada tahap awal perencanaan telah diasumsikan besarnya koefisien gaya dorong pada kondisi fluida tanpa kekentalan (C_{Ti}), yaitu 2~6 persen lebih besar dari C_T . Asumsi ini dapat dicek dengan persamaan:

$$C_{Ti} = \frac{C_T}{1 - 2 \cdot \varepsilon \cdot \lambda_i} \quad (3.28) \quad \text{di mana: } \varepsilon \approx \frac{0.008}{c_L} \quad (3.28a)$$

Lebih jauh dapat dicek besarnya koefisien gaya dorong baling-baling yang sebenarnya, yaitu dengan melakukan perhitungan integrasi numeris terhadap persamaan:

$$\begin{aligned} C_T &= 8 \cdot \int_{xh}^1 x \cdot \kappa \cdot \frac{u_t}{2v_A} \left(\frac{x}{\lambda} - \frac{u_t}{2v_A} \right) \cdot (1 - \varepsilon \tan \beta_i) \cdot dx \\ &= \int_{xh}^1 (1 - \varepsilon \tan \beta_i) \cdot \frac{dC_{Ti}}{dx} \cdot dx \end{aligned} \quad (3.29)$$

Koefisien gaya dorong dari persamaan tersebut besarnya kira-kira 1~2 persen lebih besar atau kurang dari koefisien gaya dorong yang diperhitungkan dari besarnya gaya dorong (*thrust*) baling-baling.

11. Perhitungan koefisien tenaga penggerak kapal (C_P):

Besarnya koefisien tenaga penggerak kapal (C_P) dapat ditentukan dengan persamaan:

$$\begin{aligned} C_P &= 8 \cdot \int_{xh}^1 \frac{x \cdot \kappa}{\tan \beta} \cdot \frac{u_t}{2v_A} \cdot \left(1 + \frac{u_a}{2v_A} \right) \cdot \left(1 + \frac{\varepsilon}{\tan \beta_i} \right) \cdot dx \\ &= \int_{xh}^1 \frac{(\tan \beta_i + \varepsilon)}{\tan \beta} \cdot \frac{dC_{Ti}}{dx} \cdot dx \end{aligned} \quad (3.30)$$

Besarnya tenaga penggerak kapal dapat ditentukan dengan persamaan:

$$P_s = \frac{\rho}{550} R^2 \pi (1.688 \cdot v_A)^3 C_p \quad (3.31)$$

12. Perhitungan efisiensi baling-baling (η):

Setelah harga C_T dan C_P diperoleh, maka besarnya efisiensi baling-baling dapat ditentukan dengan persamaan:

$$\eta = \frac{C_T}{C_P} \quad (3.32)$$

3.2. PERENCANAAN PADA *WAKE ADAPTED PROPELLER*

Perencanaan pada *wake adapted propeller* didasarkan pada kondisi di mana setiap aliran yang masuk pada baling-baling diperhitungkan besarnya arus ikut (*wake*) setiap penampang baling-baling kapal. Tahap-tahap perencanaan meliputi:

1. Menentukan input data yang diperlukan dalam perhitungan, antara lain:

Kecepatan dinas kapal (v_s)

Shaft Horsepower (P_s)

Putaran mesin (n)

Tahanan kapal (R_s)

Effective wake fraction (w_0)

Wake fraction (w_x) pada setiap penampang baling-baling

Thrust deduction fraction (t)

Penentuan diameter optimum (D) dan jumlah daun baling-baling (z) dapat diperoleh dengan menggunakan *Troost series*, yaitu dengan bantuan $B_U-\delta$ diagram atau dapat menggunakan persamaan 3.1.

2. Penentuan koefisien-koefisien awal yang digunakan dalam perhitungan selanjutnya, antara lain:

- *Speed of advance* (v_A) (persamaan 3.2)
- *Advance coefficient* (λ):

$$\lambda_s = \frac{101.27 \cdot v}{\pi \cdot n \cdot D} \quad (3.33)$$

- *Advance angle* (β):

$$\tan \beta = \frac{\lambda_s}{x} (1 - w_x) \quad (3.34)$$

- Koefisien gaya dorong (C_{Ts}):

$$C_{Ts} = \frac{T}{\frac{\rho}{2} \frac{D^2}{4} \pi (1.688 \cdot v_s)^2} \quad (3.35)$$

Untuk perencanaan lebih lanjut digunakan koefisien gaya dorong berdasarkan aliran fluida tanpa kekentalan (*non viscous flow*), yaitu:

$$C_{Tsi} = \frac{C_{Ts}}{1 - 2 \cdot \varepsilon \cdot \lambda_i} \quad (3.36)$$

karena besarnya *drag-lift ratio* (ε) belum diketahui, maka besarnya C_{Ti} dapat ditentukan dengan menggunakan rumus pendekatan, yaitu:

$$C_{Tsi} = (1,02 \sim 1,06) \cdot C_{Ts} \quad (3.37)$$

- Besarnya gaya dorong baling-baling (T) (persamaan 3.8)

3. Perhitungan *hydrodynamic pitch angle* (β_i) dan *pitch ratio* (P/D) awal:

Harga β_i dapat ditentukan dengan:

$$\tan \beta_i = \frac{\lambda_s}{x \cdot \eta_i} \cdot (1 - w_0)^{1/2} \cdot (1 - w_x)^{1/2} \quad (3.38)$$

η_i : koefisien ideal baling-baling, diperoleh dari diagram Kramer's Thrust Coefficient (lampiran 2).

Dari perhitungan β_i dan β dapat diperhitungkan harga *pitch ratio* (P/D) awal menggunakan persamaan 3.10. β_i dan $(P/D)_i$ tersebut diperhitungkan pada radius 0,7 baling-baling, untuk memperoleh perhitungan pada setiap penampang baling-baling, maka dilakukan distribusi *pitch* dari setiap penampang yang bentuknya parabolik dari *hub* ke radius 0,6 dan garis lurus dari radius 0,6 ke ujung baling-baling. Besarnya distribusi *pitch* tersebut dapat dilihat pada tabel 3.1. Jadi besarnya β_i pada setiap penampang dapat diperhitungkan dengan persamaan 3.11.

4. Perhitungan koefisien gaya dorong dan koreksi *hydrodynamic pitch angle* (β_i):
Besarnya koefisien gaya dorong (C_{Ti}) dapat diperhitungkan dengan persamaan:

$$C_{T_{si}} = 8 \int_{x_h}^1 x \kappa \frac{u_t}{2V_A} \left(\frac{x}{\lambda_S} - \frac{u_t}{2v} \right) dx \rightarrow \frac{u_t}{2v} = \frac{(1-w_x) \sin \beta_i \cdot \sin(\beta_i - \beta)}{\sin \beta} \quad (3.39)$$

Perhitungan koefisien gaya dorong ini dilakukan untuk mengoreksi besarnya *hydrodynamic pitch angle* (β_i) dari setiap penampang baling-baling yang telah diperhitungkan sebelumnya. Apabila besarnya koefisien gaya dorong ini belum sama dengan perhitungan sebelumnya, maka dilakukan koreksi terhadap besarnya *hydrodynamic pitch angle* (β_i) dan setelah itu dilakukan kembali perhitungan gaya dorong dengan persamaan di atas. Proses ini akan selalu diiterasi sampai besarnya harga koefisien gaya dorong sama dengan perhitungan sebelumnya (langkah 1).

Koreksi *hydrodynamic pitch angle* (β_i) dapat dilakukan dengan persamaan:

$$\tan \beta_i (\text{koreksi}) = \tan \beta_i \left(1 + \frac{C_{Tsi}' - C_{Tsi}}{5 \cdot C_{Tsi}'} \right) \quad (3.40)$$

di mana:

C_{Tsi}' : C_{Ts} rata-rata pada aliran non viscous

C_{Tsi} : C_{Ts} pada aliran non viscous diukur dari setiap penampang

x : r/R (*radius fraction*)

x_h : r/R pada pangkal baling-baling (*hub*)

κ : *Goldstein function* (lampiran 1)

5. Estimasi koefisien gaya angkat (*lift coefficient* = c_L):

Besarnya koefisien gaya angkat dapat diperoleh dari persamaan:

$$\frac{c_L \cdot l}{D} = \frac{4 \cdot \pi}{z} \frac{x \cdot \kappa \cdot \frac{u_t}{2 \cdot v}}{\frac{x}{\lambda_s} - \frac{u_t}{2 \cdot v}} \cdot \cos \beta_i \quad (3.41)$$

6. Perhitungan besarnya kavitasi (σ) untuk setiap penampang daun baling-baling:

$$\sigma = \frac{\gamma}{\frac{\rho}{2} (1.688 \cdot v)^2} \left[\frac{(p + p_a) \sin^2 \beta}{(1 - w_x)^2 \cos^2 (\beta_i - \beta)} \right] \quad (3.42)$$

di mana:

γ : *specific weight* air

ρ : *density* air

p_a : kedalaman air diukur pada tekanan atmosfer

p : kedalaman air diukur dari setiap radius penampang yang diperhitungkan

7. Estimasi untuk menentukan tebal maksimum daun baling-baling (t_x):

Distribusi tebal maksimum dari penampang daun baling-baling dapat diperhitungkan dari fraksi ketebalan daun baling-baling dengan persamaan 3.16 dan 3.16a.

8. Perhitungan *thickness ratio* (t_x/l), *camber ratio* (m_x/l) dan koefisien gaya angkat (c_L) untuk menentukan geometri baling-baling sama dengan langkah 8 perencanaan pada *non optimum free-running propeller*.

9. Perhitungan *pitch ratio* (P/D)

Setelah geometri setiap penampang baling-baling ditentukan, maka selanjutnya diperhitungkan besarnya *pitch ratio* (P/D) yang sesungguhnya dari setiap penampang baling-baling. Untuk menentukan besarnya *pitch ratio* (P/D) yang sesungguhnya, maka dilakukan koreksi terhadap besarnya *pitch ratio* awal (P/D)_i. Ada tiga koreksi yang perlu dilakukan, hal ini menyangkut penambahan besarnya sudut masuk (*angle of attack*) dari setiap penampang baling-baling, koreksi tersebut antara lain : *angle of attack from friction*, *ideal angle of attack*, dan *angle of attack* terhadap teori gaya angkat permukaan.

Dua koreksi, yaitu koreksi *angle of attack from friction* dan koreksi *ideal angle of attack* dapat dikombinasi dalam persamaan 3.19.

Koreksi *angle of attack* terhadap teori gaya angkat permukaan ditentukan dengan persamaan:

$$\alpha_2 = \alpha_b + \alpha_f - (\alpha_i + \alpha_0)$$

koreksi ini melibatkan beberapa tahapan, antara lain:

- Perhitungan *angle of attack* akibat efek dari *bound vertices* (α_b):

$$\alpha_b = \frac{\sin \beta_i}{2} \sum \left[\left(\frac{l}{D} \sin \mu - 0.7 \cos \beta_i \cdot \cos \mu \right) \int_{x_h}^1 \frac{G \cdot dx}{(P/R)^3} \right] \quad (3.43)$$

di mana:

μ : posisi angular dari daun baling-baling, untuk daun 4 posisi angularnya bisa 0° , 90° , 180° , 270° dan 360°

$$(P/R)^3 = \left[x^2 + (l/D)^2 + 0.49 - 2 \cdot ((l/D) \cos \mu \cdot \cos \beta_i + 0.7 \sin \mu)x \right]^{3/2} \quad (3.44)$$

$$G = \frac{2x\kappa}{z} \cdot \frac{u_i}{2v} \cdot \frac{1}{(1-w_x)} \quad (3.45)$$

- Perhitungan *angle of attack* akibat efek dari *free vertices* (α_f)

(persamaan 3.23)

- Perhitungan *angle of zero lift of mean line* (α_0) (persamaan 3.24)

Jadi besarnya penambahan *angle of attack* akibat efek gaya angkat permukaan adalah:

$$\alpha_2 = 57.3 \cdot \left[\alpha_b + \alpha_i \left(\frac{2}{1 + \cos^2 \beta_i (\frac{h}{2} - 1)} - 1 \right) - \alpha_0 \right] \quad (3.46)$$

Koreksi *pitch* untuk 0.7 radius adalah:

$$1 + \frac{\Delta P/D}{P/D} = \frac{\tan(\beta_i + \alpha_2)_{0.7}}{(\tan \beta_i)_{0.7}} \quad (3.47)$$

untuk perhitungan *pitch* setiap penampang baling-baling dapat digunakan persentase radius terhadap radius 0,7.

Jadi besarnya *pitch ratio* adalah:

$$P/D = \pi \cdot x \cdot \tan(\beta_i + \alpha_1) \cdot \left(1 + \frac{\Delta P/D}{P/D} \right) \quad (3.48)$$

Sampai pada tahap ini perencanaan telah selesai dilakukan, lebih lanjut akan dilakukan pengecekan terhadap koefisien gaya dorong (C_{Ts}) yang telah diperhitungkan sebelumnya.

10. Perhitungan koefisien gaya dorong (C_{Ts}):

Pada tahap awal perencanaan telah diasumsikan besarnya koefisien gaya dorong pada kondisi fluida tanpa kekentalan (C_{Ti}), yaitu 2~6 persen lebih besar dari C_{Ts} . Asumsi ini dapat dicek dengan persamaan:

$$C_{Tsi} = \frac{C_{Ts}}{1 - 2 \cdot \varepsilon \cdot \lambda_i} \quad (3.49) \quad \text{di mana: } \varepsilon \approx \frac{0.008}{c_L} \quad (3.49a)$$

Lebih jauh dapat dicek besarnya koefisien gaya dorong baling-baling yang sebenarnya, yaitu dengan melakukan perhitungan integrasi numeris terhadap persamaan:

$$\begin{aligned} C_{Ts} &= 8 \cdot \int_{xh}^1 x \cdot \kappa \cdot \frac{u_t}{2v} \left(\frac{x}{\lambda_s} - \frac{u_t}{2v} \right) \cdot (1 - \varepsilon \tan \beta_i) \cdot dx \\ &= \int_{xh}^1 (1 - \varepsilon \tan \beta_i) \cdot \frac{dC_{Tsi}}{dx} \cdot dx \end{aligned} \quad (3.50)$$

Koefisien gaya dorong dari persamaan tersebut besarnya kira-kira 1~2 persen lebih besar atau kurang dari koefisien gaya dorong yang diperhitungkan dari besarnya gaya dorong (*thrust*) baling-baling.

11. Perhitungan koefisien tenaga penggerak kapal (C_{Ps}):

Besarnya koefisien tenaga penggerak kapal (C_{Ps}) dapat ditentukan dengan persamaan:

$$\begin{aligned} C_{Ps} &= \frac{8}{\lambda_s} \cdot \int_{xh}^1 \frac{x^2 \cdot \kappa}{\tan \beta} \cdot \frac{u_t}{2v} \cdot \left((1 - w_x) + \frac{u_a}{2v} \right) \cdot \left(1 + \frac{\varepsilon}{\tan \beta_i} \right) \cdot dx \\ &= \frac{1}{\lambda_s} \int_{xh}^1 x (\tan \beta_i + \varepsilon) \cdot \frac{dC_{Tsi}}{dx} \cdot dx \end{aligned} \quad (3.51)$$

Besarnya tenaga penggerak kapal dapat ditentukan dengan persamaan:

$$P_s = \frac{\rho / 2}{550} R^2 \pi (1.688 \cdot v)^3 C_{P_s} \quad (3.52)$$

12. Perhitungan efisiensi baling-baling (η):

Setelah harga C_{T_s} dan C_{P_s} diperoleh, maka besarnya efisiensi baling-baling dapat ditentukan dengan persamaan:

$$\eta = \frac{C_{T_s}}{C_{P_s}} \quad (3.53)$$

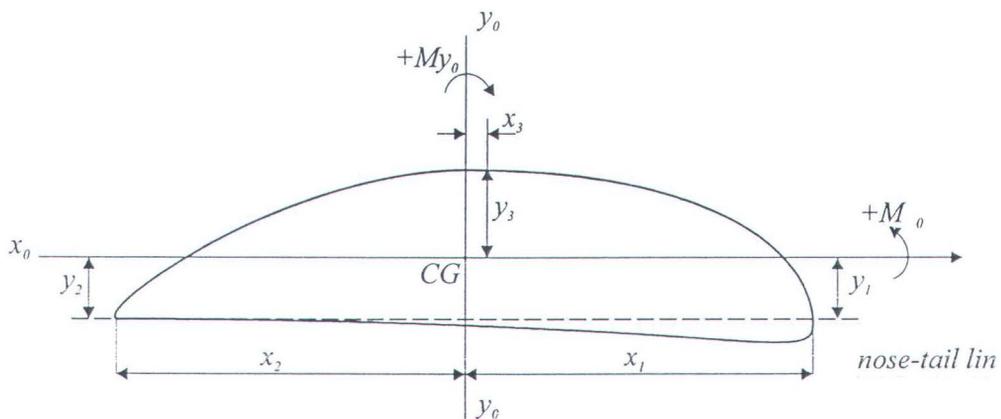
3.3. ANALISA KEKUATAN DAUN BALING-BALING

Taylor (TMB Report 919) memberikan perkiraan mengenai metode untuk menentukan tegangan pada daun baling-baling dengan teori balok sederhana. Dengan beberapa modifikasi, teori ini telah dipakai bertahun-tahun sebagai dasar untuk menentukan tebal daun baling-baling yang memberikan tegangan sesuai dengan material yang digunakan.

Metode ini menggunakan harga rata-rata gaya dorong, torsi, dan gaya sentrifugal pada kecepatan mesin maksimum yang dapat dipakai secara terus-menerus (*maximum continuous rating*) dan pada harga rata-rata kecepatan maju baling-baling. Dengan anggapan ini berarti bahwa secara mengeliling, untuk tiap jari-jari yang ditinjau, kecepatan aliran masuk pada baling-baling tersebut adalah tetap. Gaya dorong dan torsi dalam tiap kisaran baling-baling dianggap tetap, sehingga harga tegangan yang akan diperoleh hanyalah harga rata-rata yang bersifat kira-kira saja.

Lebih lanjut akan dilakukan analisa kekuatan daun baling-baling terhadap dua tipe penampang aerofoil seperti yang diuraikan di muka, yaitu NACA seri 16

dan 66. Kedua seri tersebut digunakan sebagai acuan untuk menganalisa kekuatan daun baling-baling dalam Tugas Akhir ini. Taylor telah memberikan perhitungan kekuatan terhadap kedua seri tersebut, untuk menentukan geometri optimum dari penampang daun baling-baling berdasarkan analisa kekuatan daun baling-baling. Perhitungan akan dilakukan pada setiap penampang daun baling-baling dengan beberapa tipe *mean line* dari kedua seri aerofoil tersebut, yaitu *circular arc*, NACA $a = 1.0$ dan NACA $a = 0.8$.



Gambar 3.1 : Geometri penampang daun baling-baling

Perhatikan gambar 3.1, untuk menentukan tegangan lengkung (*bending stress*), momen lengkung (*bending moment*) harus diperhitungkan dahulu. Momen-momen tersebut dijabarkan dalam dua komponen, yaitu M_{x_0} adalah momen yang bekerja terhadap sumbu x yang sejajar dengan *nose-tail line* dari penampang daun baling-baling dan M_{y_0} adalah momen yang bekerja terhadap sumbu y yang arahnya tegak lurus dengan *nose-tail line* dari penampang daun baling-baling.

Kedua dari sumbu-sumbu tersebut berpotongan di titik pusat dari penampang daun baling-baling. Jika besarnya *pitch angle* (ϕ), momen akibat

bekerjanya gaya dorong (M_{Tb}) dan momen torsi (M_{Qb}) telah diketahui, maka besarnya momen lengkung terhadap sumbu x dan sumbu y dapat diberikan dengan persamaan:

$$M_{x0} = M_{Tb} \cos \phi + M_{Qb} \sin \phi \quad (3.54)$$

$$M_{y0} = M_{Tb} \sin \phi - M_{Qb} \cos \phi \quad (3.55)$$

Momen yang ditimbulkan dari gaya dorong (M_{Tb}) dan momen yang ditimbulkan dari torsi (M_{Qb}) dapat dihitung dari distribusi gaya dorong dan torsi yang ditentukan dari teori sirkulasi. Untuk menghitung momen-momen tersebut dapat digunakan persamaan:

1. Free running non optimum propeller:

$$M_{Tb} = \frac{\rho R^3 \pi}{2 z} (1.688 \cdot v_A)^2 \cdot \int_{xh}^1 (x - x_0) \cdot (1 - \varepsilon \tan \beta_i) \frac{dC_{Ti}}{dx} dx \quad (3.56a)$$

$$M_{Qb} = \frac{\rho R^3 \pi}{2 z} (1.688 \cdot v_A)^2 \cdot \int_{xh}^1 (x - x_0) \cdot (\tan \beta_i + \varepsilon) \frac{dC_{Ti}}{dx} dx \quad (3.57a)$$

2. Wake adapted propeller:

$$M_{Tb} = \frac{\rho R^3 \pi}{2 z} (1.688 \cdot v_s)^2 \cdot \int_{xh}^1 (x - x_0) \cdot (1 - \varepsilon \tan \beta_i) \frac{dC_{Tsi}}{dx} dx \quad (3.56b)$$

$$M_{Qb} = \frac{\rho R^3 \pi}{2 z} (1.688 \cdot v_s)^2 \cdot \int_{xh}^1 (x - x_0) \cdot (\tan \beta_i + \varepsilon) \frac{dC_{Tsi}}{dx} dx \quad (3.57b)$$

di mana x_0 : *radius fraction* dari penampang yang dianalisa.

Jika I_{x0} dan I_{y0} adalah momen inersia dari penampang terhadap sumbu x dan sumbu y , maka tegangan pada beberapa penampang daun baling-baling diberikan menurut persamaan:

$$\circ \text{ Tegangan di } \textit{leading edge} = -\frac{y_1 M_{x0}}{I_{x0}} - \frac{x_1 M_{y0}}{I_{y0}} \quad (3.58a)$$

$$\circ \text{ Tegangan di } \textit{trailing edge} = -\frac{y_2 M_{x0}}{I_{x0}} - \frac{x_2 M_{y0}}{I_{y0}} \quad (3.58b)$$

$$\circ \text{ Tegangan pada tebal maksimum} = -\frac{y_3 M_{x0}}{I_{x0}} - \frac{x_3 M_{y0}}{I_{y0}} \quad (3.58c)$$

Tegangan positif dinotasikan sebagai tegangan tarik dan tegangan negatif dinotasikan sebagai tegangan tekan. Seperti yang ditunjukkan oleh gambar 3.1, x_1 , x_2 , dan x_3 adalah absis dari *nose*, *tail* dan titik pada tebal maksimum penampang daun baling-baling. Sedangkan y_1 , y_2 , dan y_3 adalah ordinat dari *nose*, *tail* dan titik pada tebal maksimum penampang daun baling-baling.

Berikut ini akan dilakukan perhitungan geometri properti dari kedua tipe aerofoil:

1. NACA seri 16:

$$A = 0.986 \cdot (a \cdot t_x / l) \cdot l^2 \quad (3.59a)$$

$$x_1 = (0.4838 - 0.026 \cdot m_x / l) \cdot l \quad (3.60a)$$

$$x_2 = x_1 - l \quad (3.61a)$$

$$x_3 = x_1 - 0.5 \cdot l \quad (3.62a)$$

$$y_1 = -(0.113 \cdot t_x / l + 0.782) \cdot (m_x / l) \cdot l \quad (3.63a)$$

$$y_2 = y_1 \quad (3.64a)$$

$$y_3 = (0.5 \cdot t_x / l + m_x / l) \cdot l + y_1 \quad (3.65a)$$

$$I_{x0} = 0.9925 \cdot [b \cdot (m_x / l)^2 + 0.04487 \cdot (t_x / l)^3] \cdot l^4 \quad (3.66a)$$

$$I_{y0} = 0.946 \cdot (c \cdot t_x / l) \cdot l^4 \quad (3.67a)$$

2. NACA seri 66:

$$A = 0.963 \cdot (a \cdot t_x / l) \cdot l^2 \quad (3.59b)$$

$$x_1 = (0.473 - 0.026 \cdot m_x / l) \cdot l \quad (3.60b)$$

$$x_2 = x_1 - l \quad (3.61b)$$

$$x_3 = x_1 - 0.45 \cdot l + 0.12 \cdot (m_x / l) \cdot (t_x / l) \cdot l \quad (3.62b)$$

$$y_1 = -(0.115 \cdot t_x / l + 0.80) \cdot (m_x / l) \cdot l \quad (3.63b)$$

$$y_2 = y_1 \quad (3.64b)$$

$$y_3 = (0.5 \cdot t_x / l + 0.99 \cdot m_x / l) \cdot l + y_1 \quad (3.65b)$$

$$I_{x0} = 0.945 \cdot [b \cdot (m_x / l)^2 + 0.04487 \cdot (t_x / l)^3] \cdot l^4 \quad (3.66b)$$

$$I_{y0} = 0.914 \cdot (c \cdot t_x / l) \cdot l^4 \quad (3.67b)$$

di mana:

A : Luas penampang daun baling-baling

a : koefisien luas penampang daun baling-baling (lampiran 7.a)

b : koefisien I_{x0} penampang daun baling-baling (lampiran 7.b)

c : koefisien I_{y0} penampang daun baling-baling (lampiran 7.c)

Setelah dilakukan analisa terhadap kekuatan daun baling-baling dan besarnya tegangan maksimum dapat ditentukan, maka dapat dilakukan koreksi terhadap panjang (*chord*) dari setiap penampang daun baling-baling yang telah ditentukan dengan perhitungan sebelumnya. Panjang (*chord*) dari setiap penampang daun baling-baling dapat dikoreksi dengan menggunakan rumus pendekatan sebagai berikut:

$$l_{baru} = 1.05 \cdot \left[l \cdot \sqrt{\frac{\text{tegangan maksimum}}{S_c}} \right] \quad (3.68)$$

di mana:

l : panjang penampang daun baling-baling yang diperhitungkan dari teori sirkulasi

S_c : tegangan maksimum baling-baling yang diijinkan, sesuai dengan bahan yang dipakai untuk baling-baling (tabel 2.2)

Untuk memperoleh geometri dan karakteristik yang optimum dari baling-baling yang direncanakan, maka dengan pertimbangan analisa kekuatan daun baling-baling dilakukan perhitungan ulang terhadap geometri dan karakteristik baling-baling yang telah direncanakan sebelumnya.

BAB IV

PENDEFINISIAN PERSAMAAN LENGKUNG KURVA DAN PERMUKAAN DENGAN METODE BASIS SPLINE

4.1. REPRESENTASI KURVA DENGAN B-SPLINE

Basis Spline atau disingkat B-Spline, pertama kali diperkenalkan oleh Schoenberg. B-Spline merupakan suatu fungsi matematis dengan sifat-sifat khusus yang jika dibandingkan dengan polinomial atau fungsi-fungsi spline lainnya, fungsi ini memiliki beberapa kelebihan yang menguntungkan dalam mendefinisikan/ membentuk suatu kurva.

Horst Nowacky mengemukakan bahwa B-Spline memenuhi syarat dari karakteristik suatu tipe fungsi yang dikehendaki untuk digunakan dalam membentuk suatu kurva. Karakteristik yang dikehendaki antara lain:

1. Memungkinkan pendefinisian kurva tanpa memperhatikan orientasi kurva dalam ruang.
2. Adanya hubungan yang pasti antara variabel bebas dan variabel tak bebas.
3. Perhitungan dari masing-masing komponen koordinat kurva dapat dilakukan terpisah.

Ketiga syarat ini dapat dipenuhi oleh suatu persamaan parametris, dan B-Spline merupakan persamaan parametris. Syarat selanjutnya:

4. Memungkinkan adanya diskontinuitas turunan orde tertentu pada suatu kurva.
5. Memungkinkan adanya kontrol lokal terhadap sebarang bagian dari garis tersebut, dan tidak mengakibatkan perubahan pada bagian yang lain.
6. Mampu menampung sejumlah batasan geometris.

7. Mudah digunakan tanpa fungsi matematis yang rumit, yang membutuhkan dasar matematis yang kuat.
8. Perhitungan dapat dilakukan secara cepat.

4.1.1. Teori Dasar

Sebelum kurva B-Spline dibentuk, terlebih dahulu ditentukan titik-titik pembentuk kurva. Kurva yang terbentuk bukanlah kurva yang tepat melewati titik-titik poligon, tetapi yang terbentuk adalah kurva yang lebih smooth atau fair. Istilah smooth atau fair yang digunakan di sini hanya mengacu pada pengertian kualitatif, yaitu suatu kurva yang enak dipandang dan tidak nampak patah, tanpa mengacu pada suatu definisi matematis tertentu, karena masih banyak perdebatan mengenai definisi matematis tersebut.

Kurva B-spline dibentuk dari persamaan:

$$P(t) = \sum_{i=1}^{n+1} B_i N_{i,k}(t) \quad (4.1)$$

$$t_{min} \leq t < t_{max}$$

$$2 \leq k < n+1$$

di mana:

B_i : koordinat dari $n+1$ vertex poligon pembentuk kurva

$N_{i,k}$: fungsi basis B-spline

k : orde kurva, dengan kontinuitas C^{k-2}

Fungsi basis B-spline $N_{i,k}(t)$ dapat didefinisikan oleh rumus Cox-de Boor, untuk fungsi basis ke i dengan orde kurva k , adalah:

$$N_{i,k}(t) = \frac{(t - x_i)N_{i,k-1}(t)}{x_{i+k-1} - x_i} + \frac{(x_{i+k} - t)N_{i-1,k-1}(t)}{x_{i+k} - x_{i+1}} \quad (4.2)$$

$$N_{i,k}(t) = \begin{cases} 1, & \text{jika } x_i \leq t < x_{i+1} \\ 0, & \text{selainnya} \end{cases}$$

di mana:

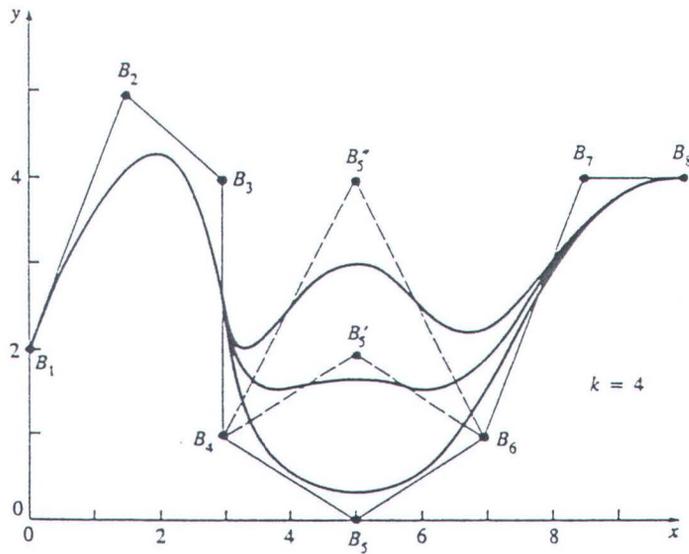
- Harga x_i adalah elemen ke i dari knot vektor yang dipakai, di mana $x_i \leq x_{i+1}$
- Parameter bervariasi dari t_{min} hingga t_{max} sepanjang kurva P
- Dalam perhitungan basis ini berlaku konvensi $0/0 = 0$

Dari rumus Cox-de Boor terlihat bahwa suatu fungsi basis dengan orde k memerlukan fungsi-fungsi basis dengan orde yang lebih rendah, dari orde $k-1$ hingga orde 1 . Untuk suatu fungsi basis $N_{i,k}$ ketergantungan ini akan membentuk pola segitiga sebagai berikut.

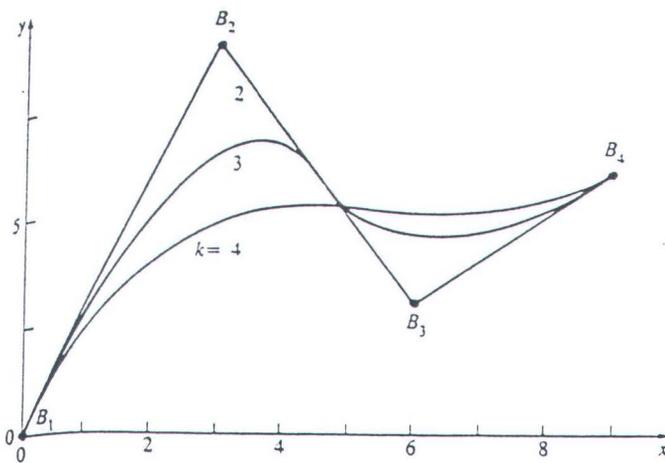
$$\begin{array}{ccccccc} N_{i,k} & & & & & & \\ N_{i,k-1} & , & N_{i+1,k-1} & & & & \\ \vdots & & \vdots & & & & \\ N_{i,1} & , & N_{i+1,1} & , & N_{i+2,1} & \cdots & , N_{i+k-1,1} \end{array}$$

Karena suatu basis B-spline digunakan untuk membentuk kurva, beberapa sifat penting lainnya dapat diketahui sebagai berikut:

- Orde maksimum dari suatu kurva sama dengan jumlah titik poligon yang ada
- Bentuk dari setiap span kurva dipengaruhi oleh k titik poligon yang berturutan. Karena itu dapat dilakukan kontrol lokal pada kurva, di mana merubah satu titik poligon hanya akan merubah sebagian dari kurva, yakni sepanjang $\pm \frac{1}{2}$ parameter. Gambar 4.1 menunjukkan bentuk kontrol lokal pada B-Spline.
- Semakin rendah orde yang diambil, bentuk kurva akan semakin mendekati bentuk poligon. Gambar 4.2 menunjukkan pengaruh perbedaan orde pada kurva B-Spline.



Gambar 4.1: Kontrol lokal pada kurva B-Spline



Gambar 4.2: Pengaruh perbedaan orde pada kurva B-spline

Dari sifat-sifat di atas dapat dilihat bahwa kurva B-spline dipengaruhi oleh:

- Orde yang diambil
- Poligon pembentuknya
- Tipe knot vektor

4.1.2. Knot vektor

Knot vektor, sesuai dengan namanya, menunjukkan letak-letak simpul dari fungsi basis, yaitu menentukan pada parameter berapa pengaruh itu mulai hilang. Jumlah elemen knot vektor adalah $n+k+1$. Harga tiap elemennya tergantung dari tipe knot vektor yang digunakan.

Fungsi basis ke i akan mulai berpengaruh terhadap kurva ($N_{i,k} > 0$) pada harga parameter yang ditunjukkan oleh elemen knot vektor ke i . Sedang elemen ke $i+k$ menunjukkan harga parameter di mana fungsi basis ke i mulai menghitung pengaruhnya ($N_{i,k} = 0$).

Ada tiga tipe knot vektor yang masing-masing mempunyai karakteristik yang berbeda dan akan menghasilkan kurva yang berbeda untuk poligon yang sama dan orde yang sama. Ketiga tipe knot vektor itu adalah periodik, open uniform dan nonuniform. Masing-masing akan dibahas pada bagian selanjutnya.

4.1.3. Open uniform B-spline

Pada knot vektor open uniform terdapat penggandaan harga knot vektor pada kedua ujungnya, sejumlah orde k yang diambil pada fungsi basis. Sedang harga-harga knot diantaranya, atau elemen knot internal, bertambah secara tetap.

Secara umum, elemen-elemen knot vektor open uniform dibentuk dari:

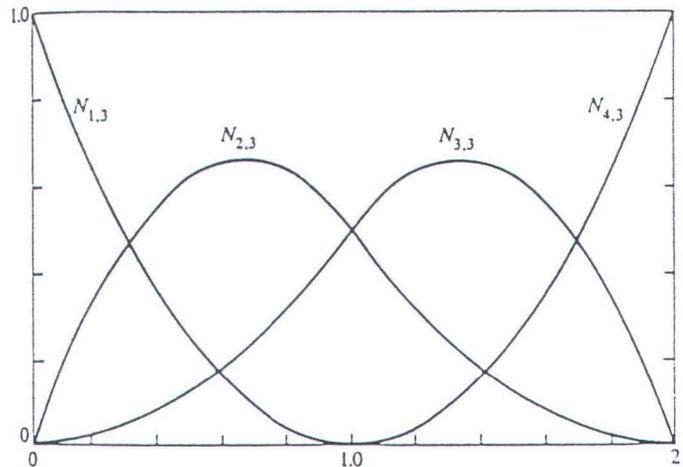
$$x_i = 0, \text{ untuk } 1 \leq i \leq k \quad (4.3a)$$

$$x_i = i-k, \text{ untuk } k+1 \leq i \leq n+1 \quad (4.3b)$$

$$x_i = n-k+2, \text{ untuk } n+2 \leq i \leq n+k+1 \quad (4.3c)$$

Sebagai contoh untuk $k = 3$ dan $n = 4$, maka knot vektor *open uniform*-nya adalah $[0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 2 \ 3 \ 3 \ 3]$.

Penggandaan harga knot di ujung-ujung sebanyak jumlah orde menyebabkan kurva bentukan knot vektor ini membentang dari ujung ke ujung poligon pembentuknya.



Gambar 4.3 : Fungsi basis B-Spline Open Uniform

4.1.4. Nonuniform B-spline

Knot vektor nonuniform dapat diterapkan pada knot vektor periodik maupun open. Berbeda dengan knot vektor uniform yang selisih antara elemen internal knot vektor yang berurutan selalu tetap, maka pada knot vektor nonuniform selisih itu tidak tetap dan dapat disusun bervariasi.

Penvariasian selisih antara elemen internal knot vektor nonuniform yang umum dipakai adalah penvariasian dengan penggandaan harga knot vektor, yaitu beberapa elemen diberi harga sama. Penggandaan harga knot vektor ini digunakan untuk menimbulkan titik diskontinu pada kurva tepat pada titik yang harga parameternya digandakan pada knot vektor. Penggandaan harga knot vektor yang sama sebanyak p kali akan menyebabkan simpul yang digandakan akan diskontinu pada turunan ke $p-1$. Ini berguna untuk pembentukan kurva dengan suatu sudut yang tajam, *knuckle*, atau lompatan kelengkungan.

Penvariasian yang lain adalah dengan membentuk harga-harga elemen internal knot vektor proporsional dengan jarak *chord* antara titik-titik poligon pembentuk. Knot vektor ini dapat dibentuk dengan rumus:

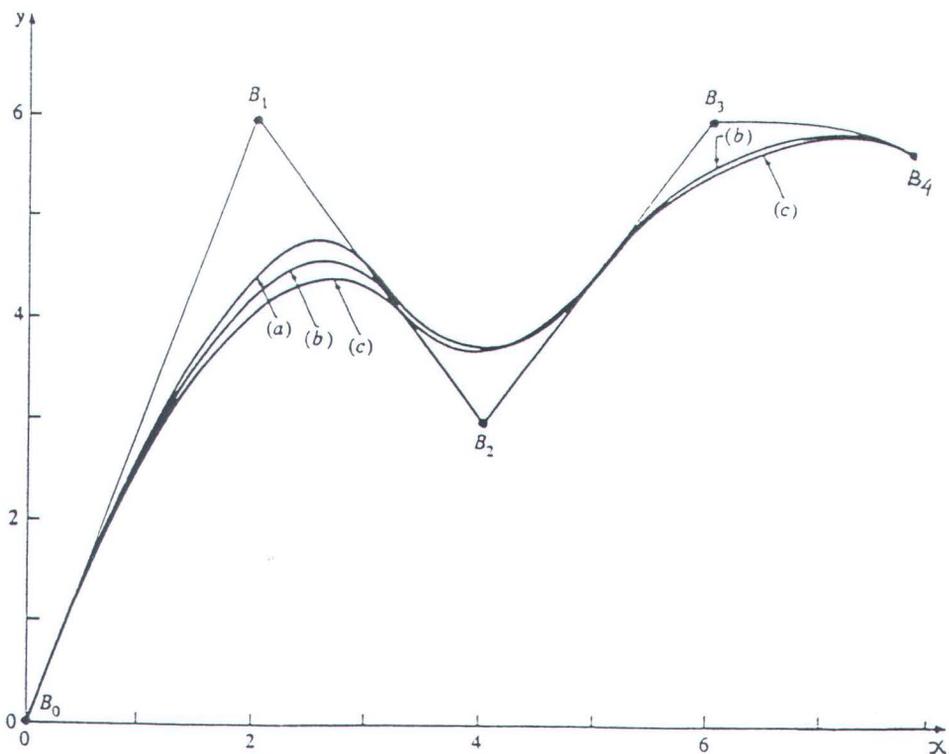
$$x_i = 0, \text{ untuk } 1 \leq i \leq k \quad (4.4a)$$

$$x_{i,k} = \left(\frac{\left(\frac{i}{n-k+2} \right) c_{i+1} + \sum_{j=1}^i c_j}{\sum_{i=1}^n c_i} \right) (n-k+2), \text{ untuk } 1 \leq i \leq n-k+1 \quad (4.4b)$$

$$x_i = n-k+2, \text{ untuk } n+1 \leq i \leq n+k \quad (4.4c)$$

di mana:

c_i : jarak antara titik poligon ke i dan ke $i + 1$, atau panjang *span* ke i .



Gambar 4.4 : Kurva B-spline

- (a) Dengan knot vektor uniform
- (b) Dengan knot vektor nonuniform yang proporsional terhadap jarak bentangan antar titik data poligon
- (c) Dengan knot vektor nonuniform dan penggandaan titik poligon di B_3 .

Penggandaan knot vektor ini adalah untuk mengatasi kekurangan dari knot vektor dalam hal kontrol lokal terhadap kurva. Jika suatu poligon dengan jarak antar titik poligon yang tidak sama satu sama lain, dibentuk kurvanya dengan knot vektor uniform yang jarak antar simpulnya sama, maka akan terjadi ketidakseimbangan dalam kontrol lokal terhadap kurva, di mana masing-masing poligon akan memberikan pengaruh kontrol lokal pada panjang bagian kurva yang tidak sama. Dengan knot vektor nonuniform yang proporsional terhadap jarak antar titik poligon diharapkan hal ini dapat teratasi.

4.1.5. Turunan kurva B-spline

Turunan kurva B-spline terhadap parameter t dapat diperoleh dengan penurunan sebagaimana pada umumnya. Jika:

$$P(t) = \sum_{i=1}^{n+1} B_i \cdot N_{i,k}(t), \text{ maka turunan pertamanya adalah:}$$

$$P'(t) = \sum_{i=1}^{n+1} B_i \cdot N_{i,k}'(t) \quad (4.5)$$

dan turunan keduanya:

$$P''(t) = \sum_{i=1}^{n+1} B_i \cdot N_{i,k}''(t) \quad (4.6)$$

Selanjutnya turunan fungsi basis dapat diperoleh sebagai berikut:

$$N_{i,k}'(t) = \frac{N_{i,k-1}(t) + (t - x_i)N_{i,k-1}'(t)}{x_{i,k-1} - x_i} + \frac{(x_{i+k} - t)N_{i+1,k-1}'(t) - N_{i+1,k-1}(t)}{x_{i+k} - x_{i+1}} \quad (4.7)$$

di mana $N_{i,l}'(t) = 0$ untuk semua t . Turunan kedua fungsi basis adalah:

$$N_{i,k}''(t) = \frac{2 \cdot N_{i,k-1}'(t) + (t - x_i) \cdot N_{i,k-1}''(t)}{x_{i,k-1} - x_i} + \frac{(x_{i+k} - t) \cdot N_{i+1,k-1}''(t) - 2 \cdot N_{i+1,k-1}'(t)}{x_{i+k} - x_{i+1}} \quad (4.8)$$

di mana:

$$N_{i,1}''(t) = 0$$

$$N_{i,2}''(t) = 0$$

untuk semua harga t .

4.1.6. B-Spline Curve Fitting

Jika pada bagian-bagian sebelumnya dibahas mengenai bagaimana membentuk kurva dari poligon pembentuknya, maka pada bagian ini akan dibahas bagaimana membentuk poligon yang akan menghasilkan suatu kurva yang melewati satu perangkat titik data kurva yang telah diketahui. Jika suatu titik data terletak pada kurva B-Spline, maka persamaan [3.1] harus dipenuhi. Untuk setiap j titik data persamaan [3.1] dapat ditulis ulang:

$$\begin{aligned} D_1(t) &= N_{1,k}(t_1) \cdot B_1 + N_{2,k}(t_1) \cdot B_2 + \cdots + N_{i,k}(t_1) \cdot B_i \\ D_2(t) &= N_{2,k}(t_2) \cdot B_1 + N_{2,k}(t_2) \cdot B_2 + \cdots + N_{i,k}(t_2) \cdot B_i \\ &\vdots \\ D_j(t_j) &= N_{1,k}(t_j) \cdot B_1 + N_{2,k}(t_j) \cdot B_2 + \cdots + N_{i,k}(t_j) \cdot B_i \end{aligned} \quad (4.9)$$

di mana: $2 \leq k \leq n+1 \leq j$

Persamaan-persamaan di atas dapat disederhanakan dalam bentuk matriks sebagai berikut:

$$[D] = [N] \cdot [B] \quad (4.10)$$

di mana:

$$[D]^T = [D_1(t_1) \quad D_2(t_2) \quad \cdots \quad D_j(t_j)]$$

$$[B]^T = [B_1 \quad B_2 \quad \cdots \quad B_i]$$

$$[N] = \begin{bmatrix} N_{1,k}(t_1) & \cdots & N_{i,k}(t_1) \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ N_{1,k}(t_j) & \cdots & N_{i,k}(t_j) \end{bmatrix}$$

Jika jumlah titik poligon pembentuk diambil sama dengan jumlah j titik data yang diketahui, maka matriks $[N]$ menjadi matriks bujursangkar, sehingga poligon yang dicari dapat diperoleh secara langsung dengan inverse matriks, yaitu:

$$[B] = [N]^{-1} [D], \text{ dengan } 2 \leq k \leq n+1 = j \quad (4.11)$$

Hasil kurva bentukan poligon akan melewati setiap titik data. Walaupun kurva ini mempunyai kontinuitas C^{k-2} , kurva ini mungkin tidak *smooth* dan dapat terjadi *wiggle* atau gelombang yang tidak diinginkan. Kurva yang mulus dapat diperoleh dengan mengambil jumlah titik poligon yang lebih sedikit dari jumlah titik data, di mana $2 \leq k \leq n+1 < j$. Dengan jalan ini matriks $[N]$ tidak lagi bujursangkar, sehingga tidak dapat di-*inverse* secara langsung. Supaya matriks tersebut dapat di-*inverse*, maka harus dibentuk matriks bujursangkar dengan mengalikan matriks tersebut dengan transpose matriknya. Secara lengkap dapat dituliskan:

$$\begin{aligned} [D] &= [N] \cdot [B] \\ [N]^T \cdot [D] &= [N]^T \cdot [N] \cdot [B] \\ [B] &= \left[[N]^T \cdot [N] \right]^{-1} \cdot [N]^T \cdot [D] \end{aligned}$$

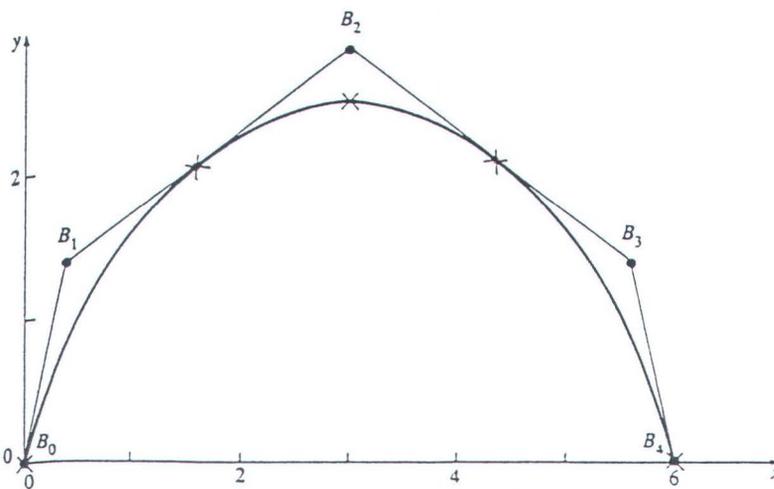
Hasil kurva bentukannya memang akan lebih mulus, dan gelombang yang mungkin terjadi dapat dikurangi, tetapi kurva ini tidak lagi tepat melewati titik-titik data yang diberikan, sehingga tidak lagi memenuhi untuk digunakan dalam *curve fitting*.

Perhitungan-perhitungan di atas dapat dilakukan jika matriks $[N]$ telah diketahui. Sedangkan matriks $[N]$ dapat diketahui jika orde k dan jumlah titik poligon $n+1$ telah ditentukan, dan harga-harga parameter sepanjang kurva juga telah diketahui.

Untuk orde k dan titik poligon $n+1$ harganya dapat diambil berdasarkan batasan $2 \leq k \leq n+1 \leq j$. Harga parameter untuk setiap titik data adalah ukuran jarak titik data tersebut pada sepanjang *chord* kurva. Pendekatan yang dapat dipakai untuk menentukan harga t ini adalah dengan menggunakan panjang *chord* antar titik-titik data. Dapat dirumuskan untuk sejumlah titik data, harga parameter untuk titik ke- l adalah:

$$\frac{t_l}{t_{\max}} = \frac{\sum_{s=2}^l D_s - D_{s-1}}{\sum_{s=2}^j D_s - D_{s-1}}, \text{ dengan } l \geq 2 \quad (4.12)$$

t_{\max} adalah harga parameter maksimum, biasa diambil harga maksimum dari knot vektor.



Gambar 4.5 : Kurva B-Spline dengan teknik *fitting*

4.2. REPRESENTASI PERMUKAAN DENGAN B-SPLINE

4.2.1. Teori Dasar

Suatu permukaan dapat dibentuk dengan metode B-Spline berdasar cara yang sama dengan pembentukan kurva, hanya saja untuk suatu permukaan digunakan dua buah parameter yakni u dan w . Dengan dua parameter ini, maka akan terbentuk dua fungsi basis dan dua knot vektor. Permukaan B-Spline dibentuk dari persamaan:

$$Q(u, w) = \sum_{i=1}^{n+1} \sum_{j=1}^{m+1} B_{i,j} \cdot N_{i,k}(u) \cdot M_{j,l}(w) \quad (4.13)$$

di mana $N_{i,k}(u)$ dan $M_{j,l}(w)$ masing-masing adalah fungsi basis B-Spline untuk parameter arah u dan w , dengan persamaan yang sama dengan basis untuk pembentukan kurva B-Spline, yaitu:

$$N_{i,k}(u) = \frac{(u - x_i) \cdot N_{i,k-1}(u)}{x_{i+k-1} - x_i} + \frac{(x_{i+k} - u) \cdot N_{i-1,k-1}(u)}{x_{i+k} - x_{i+1}} \quad (4.14)$$

$$N_{i,1}(u) = \begin{cases} 1, & \text{jika } x_i \leq u < x_{i+1} \\ 0, & \text{selainnya} \end{cases}$$

dan

$$M_{j,l}(w) = \frac{(w - y_j) \cdot M_{j,l-1}(w)}{y_{j+l-1} - y_j} + \frac{(y_{j+l} - w) \cdot M_{j-1,l-1}(w)}{y_{j+l} - y_{j+1}} \quad (4.15)$$

$$M_{j,1}(w) = \begin{cases} 1, & \text{jika } y_j \leq w < y_{j+1} \\ 0, & \text{selainnya} \end{cases}$$

di mana x_i dan y_j masing-masing adalah elemen-elemen knot vektor $[X]$ dan $[Y]$, masing-masing untuk parameter u dan w . Sedangkan $B_{i,j}$ adalah titik-titik dari jaring-jaring poligon pembentuk permukaan. Harga $n+1$ dan $m+1$ adalah jumlah titik poligon pada arah parameter u dan w . Sebagaimana pada kurva B-

Spline, bentuk dan karakter permukaan B-Spline ditentukan oleh knot vektor yang digunakan, di mana dapat dipilih knot vektor *periodik*, *open*, atau *non-uniform*. Tipe knot vektor yang digunakan tidak harus sama untuk arah parameter u dan w . Sifat yang dimiliki oleh permukaan B-Spline tidak jauh berbeda dengan sifat-sifat kurva B-Spline, yaitu antara lain:

- Harga orde terbesar yang dapat diambil untuk masing-masing arah parameter adalah sama dengan jumlah titik poligon pembentuk permukaan pada arah tersebut.
- Kontinuitas permukaan pada masing-masing arah parameter adalah orde minus satu.
- Pengaruh dari suatu titik-titik jaring-jaring poligon terbatas pada $\pm k/2$ dan $\pm l/2$ dari bentangan pada masing-masing arah parameter.

4.2.2. Turunan Permukaan B-Spline

Turunan parametris dari permukaan B-Spline dapat diperoleh dengan persamaan-persamaan sebagai berikut:

$$Q_u(u, w) = \sum_{i=1}^{n+1} \sum_{j=1}^{m+1} B_{i,j} \cdot N'_{i,k}(u) \cdot M_{j,l}(w) \quad (4.16)$$

$$Q_w(u, w) = \sum_{i=1}^{n+1} \sum_{j=1}^{m+1} B_{i,j} \cdot N_{i,k}(u) \cdot M'_{j,l}(w) \quad (4.17)$$

$$Q_{uw}(u, w) = \sum_{i=1}^{n+1} \sum_{j=1}^{m+1} B_{i,j} \cdot N'_{i,k}(u) \cdot M'_{j,l}(w) \quad (4.18)$$

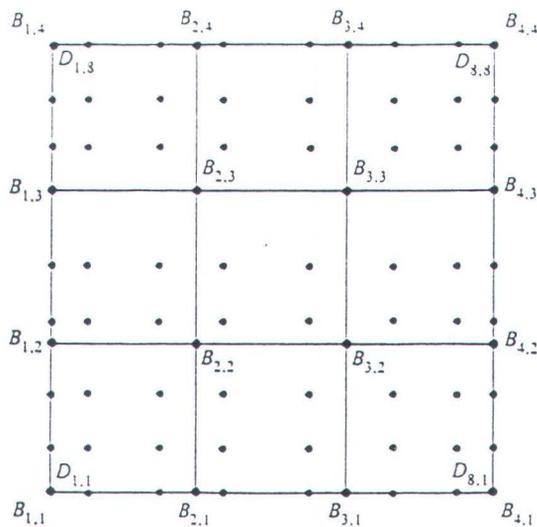
$$Q_{uu}(u, w) = \sum_{i=1}^{n+1} \sum_{j=1}^{m+1} B_{i,j} \cdot N''_{i,k}(u) \cdot M_{j,l}(w) \quad (4.19)$$

$$Q_{ww}(u, w) = \sum_{i=1}^{n+1} \sum_{j=1}^{m+1} B_{i,j} \cdot N_{i,k}(u) \cdot M''_{j,l}(w) \quad (4.20)$$

Turunan-turunan dari fungsi basis sebagaimana turunan fungsi basis pada kurva B-Spline.

4.2.3. B-Spline Surface Fitting

Sebagaimana pada kurva, jaring-jaring poligon pembentuk permukaan B-Spline juga dapat dibentuk jika seperangkat data titik dari permukaan yang akan dibentuk diketahui. Hasil permukaan bentukan merupakan interpolasi dari data-data titik yang diberikan. Harga fungsi-fungsi basis $N_{i,k}(u)$ dan $M_{j,l}(w)$ dapat dihitung dari orde yang diambil, jumlah titik poligon pada tiap arah parameter, dan harga-harga parameter u dan w pada tiap-tiap titik data yang diberikan. Untuk menentukan titik-titik data permukaan dalam pembentukan jaring-jaring poligon *fitting* dapat diperhatikan pada gambar 4.6.



Gambar 4.6 : Pembentukan jaring-jaring poligon *fitting*

Dari persamaan umum permukaan B-Spline dapat ditulis secara lengkap untuk satu titik data yang diketahui, yaitu:

$$\begin{aligned}
D_{1,1}(u_1, w_1) &= N_{1,k}(u_1) [M_{1,l}(w_1)B_{1,1} + M_{2,l}(w_1)B_{1,2} + \dots + M_{m+1}(w_1)B_{1,m+1}] + \\
&= N_{2,k}(u_1) [M_{1,l}(w_1)B_{2,1} + M_{2,l}(w_1)B_{2,2} + \dots + M_{m+1}(w_1)B_{2,m+1}] + \\
&\quad \vdots \\
&= N_{n+1,k}(u_1) [M_{1,l}(w_1)B_{n+1,1} + M_{2,l}(w_1)B_{n+1,2} + \dots + M_{m+1}(w_1)B_{n+1,m+1}]
\end{aligned}
\tag{4.21}$$

di mana untuk $r \times s$ titik data, maka harus dipenuhi $2 \leq k \leq n+1 \leq r$ dan $2 \leq l \leq n+1 \leq r$. Persamaan di atas diteruskan untuk semua titik yang di tentukan seperti diilustrasikan pada gambar 4.6. Sehingga dalam bentuk matriks dapat dituliskan:

$$[D] = [C] \cdot [B] \tag{4.22}$$

di mana:

$D_{i,j}$: Titik-titik data pada permukaan

$B_{i,j}$: Titik-titik poligon untuk pembentukan permukaan

$C_{i,j} = N_{i,k} \cdot M_{j,l}$: Fungsi basis untuk permukaan

$[D]$ adalah matriks ber-orde $r \cdot s \times 3$ (matriks yang berisi koordinat 3 dimensi), $[B]$ adalah matriks ber-orde $m \cdot n \times 3$ (matriks yang berisi koordinat 3 dimensi), dan $[C]$ adalah matriks ber-orde $r \cdot s \times m \cdot n$ yang merupakan perkalian dari dua matriks fungsi basis.

Jika $[C]$ adalah matriks bujursangkar, maka untuk menentukan titik-titik poligon pembentuk permukaan $[B]$ adalah:

$$[B] = [C]^{-1} \cdot [D] \tag{4.23a}$$

Untuk $[C]$ yang tidak bujursangkar, maka titik-titik poligon $[B]$ dapat ditentukan dengan persamaan:

$$[B] = [[C]^T \cdot [C]]^{-1} \cdot [C]^T \cdot [D] \tag{4.23b}$$

Harga parameter u dan w untuk tiap titik data dapat diperoleh dengan menggunakan suatu pendekatan panjang *chord* antar titik data. Untuk sejumlah r titik data pada arah u , harga parameter u pada titik data ke- l adalah:

$$u_1 = 0$$

$$\frac{u_l}{u_{\max}} = \frac{\sum_{g=2}^l |D_{g,s} - D_{g-1,s}|}{\sum_{g=2}^r |D_{g,s} - D_{g-1,s}|} \quad (4.24a)$$

untuk sejumlah s titik data pada arah w , harga parameter w pada titik-titik data ke- l adalah:

$$w_1 = 0$$

$$\frac{w_l}{w_{\max}} = \frac{\sum_{g=2}^l |D_{r,g} - D_{r,g-1}|}{\sum_{g=2}^s |D_{r,g} - D_{r,g-1}|} \quad (4.24b)$$

di mana u_{\max} dan w_{\max} adalah harga maksimum pada knot vektor yang bersesuaian.

4.3. METODE PENCARIAN TITIK

Setelah persamaan lengkung kurva/ diagram dan permukaan B-Spline didefinisikan, maka untuk menentukan titik-titik data yang akan dipakai dalam perhitungan digunakan beberapa metode numerik, yaitu:

1. Metode bagi dua
2. Metode posisi palsu
3. Metode Newton Raphson

Ketiga metode tersebut dapat diterapkan dalam menentukan akar-akar persamaan secara numeris dengan tingkat ketelitian tertentu.

Seperti dijabarkan di muka, B-Spline merupakan suatu persamaan parametris yang dibentuk oleh titik-titik koordinat yang merupakan fungsi parameteris pula. Posisi dari vektor untuk setiap titik pada suatu kurva/ permukaan merupakan nilai parameteris dari titik-titik tersebut, yang didefinisikan dalam persamaan:

- Posisi titik vektor pada kurva B-Spline:

$$P(t) = [x(t) \quad y(t) \quad z(t)]$$

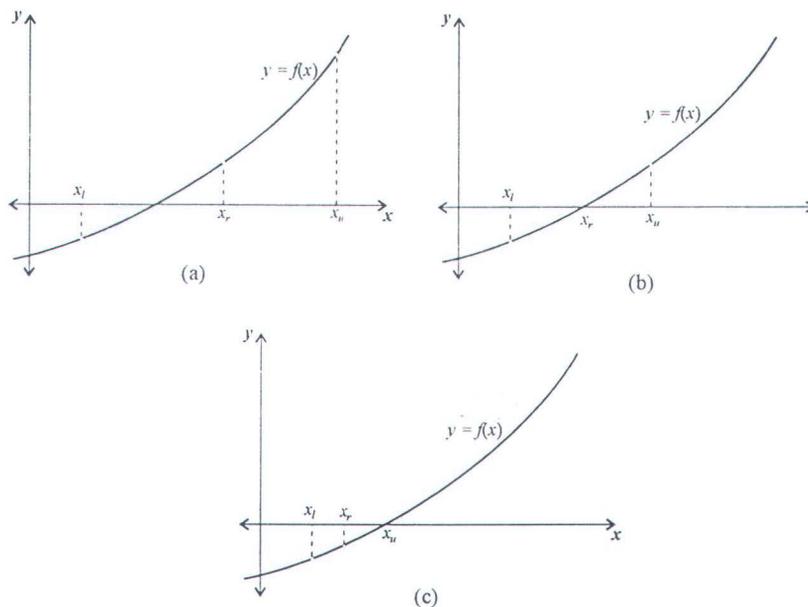
- Posisi titik vektor pada permukaan B-Spline

$$Q(u, w) = [x(u, w) \quad y(u, w) \quad z(u, w)]$$

4.3.1. Metode Bagi Dua

Metode ini termasuk metode pengurung, yakni metode yang memanfaatkan kenyataan bahwa suatu fungsi secara khas berganti tanda disekitar suatu akar. Pada metode pengurung diperlukan dua terkaan awal, di mana harus mengurung atau berada pada kedua sisi dari akar.

Metode bagi dua menggunakan pencarian yang semakin bertambah (*incremental search*) dengan cara mengambil suatu interval di mana fungsi berubah tanda. Dari interval awal itu dilakukan pengidentifikasian akar secara lebih tepat dengan membagi interval menjadi sejumlah sub-interval. Masing-masing sub-interval tersebut diselidiki untuk menentukan perubahan tanda. Proses tersebut diulang terus dengan membagi dua lagi sub-interval yang terjadi perubahan tanda menjadi interval-interval yang lebih sempit lagi, hingga diperoleh ketepatan angka taksiran akar yang diinginkan.



Gambar 4.8 : Pencarian akar persamaan menggunakan metode bagi dua

Pada metode bagi dua interval selalu dibagi dua tepat pada titik-titik tengah interval. Dari dua sub-interval ini dicari di mana perubahan tanda terjadi. Sebagaimana disebutkan sebelumnya, metode ini digunakan bukan untuk mencari akar persamaan, tetapi mencari suatu harga variabel jika harga variabel lainnya dalam fungsi itu diketahui. Untuk itu fungsi yang akan digunakan di sini diubah

dahulu. Jika yang dicari adalah harga x pada harga u tertentu, atau dapat dituliskan:

$$f(x) = u \quad (4.25a)$$

maka untuk bisa mencari dengan metode ini, fungsi dirubah menjadi:

$$f(x) - u = 0 \quad (4.25b)$$

Sehingga akar dari fungsi tersebut adalah harga yang dicari pada fungsi semula.

Algoritma metode bagi dua adalah sebagai berikut:

1. Tentukan batas bawah interval (x_l) dan batas atas interval (x_u), di mana pada interval ini terdapat perubahan tanda, yang dapat diperiksa dengan memastikan $f(x_l) \cdot f(x_u)$
2. Taksiran akar dari dua harga tersebut adalah:

$$x_r = \frac{x_l + x_u}{2} \quad (4.26)$$

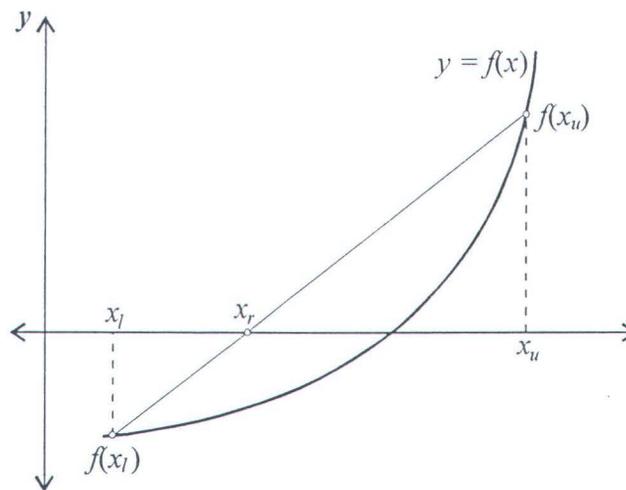
3. Lakukan pengecekan letak akar yang dicari:
 - a. Jika $f(x_l) \cdot f(x_u) < 0$, akar berada pada bagian interval bawah, maka $x_u = x_r$ dan langkah 2 diulang.
 - b. Jika $f(x_l) \cdot f(x_u) > 0$, akar berada pada bagian interval atas, maka $x_l = x_r$ dan langkah 2 diulang.
 - c. Jika $f(x_l) \cdot f(x_u) = 0$, akar tepat pada x_r , perhitungan dapat dihentikan.

4.3.2. Metode Posisi Palsu

Dengan menggunakan metode bagi dua, suatu akar persamaan akan dapat didekati dengan baik. Hasil iterasinya akan selalu konvergen, yakni akan semakin dekat kepada akar persamaan yang dicari. Tetapi pengambilan taksiran akar yang

kasar relatif tidak efisien. Metode posisi palsu merupakan salah satu alternatif perbaikan.

Kekurangan metode bagi dua adalah dalam membagi selang interval dari x_l hingga x_u menjadi dua bagian yang sama tanpa memperhitungkan harga $f(x_l)$ dan $f(x_u)$. Sebagai contoh, jika $f(x_l)$ jauh lebih dekat ke nol dari pada $f(x_u)$ maka akar persamaan akan lebih dekat ke x_l dari pada ke x_u , sehingga proses pencarian titik akan tidak efisien. Metode yang dibahas ini akan menarik garis dari titik-titik tersebut dan perpotongan garis ini dengan sumbu x merupakan suatu posisi palsu dari akar persamaan.



Gambar 4.9 : Prinsip metode posisi palsu

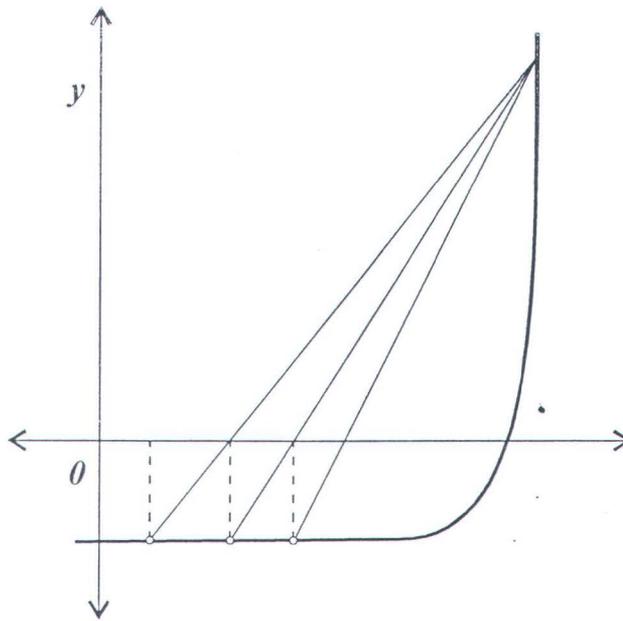
Dengan menggunakan prinsip segitiga sebangun, perpotongan dengan sumbu x dapat diambil dari:

$$\frac{f(x_l)}{x_r - x_l} = \frac{f(x_u)}{x_r - x_u} \quad x_r = x_u - \frac{f(x_u) \cdot (x_l - x_u)}{f(x_l) - f(x_u)} \quad (4.27)$$

Persamaan tersebut adalah formula dari posisi palsu. Nilai x_r dari persamaan tersebut kemudian menggantikan salah satu terkaan awal x_l atau x_u ,

dengan melakukan evaluasi yang sama dengan evaluasi pada langkah 3 metode bagi dua.

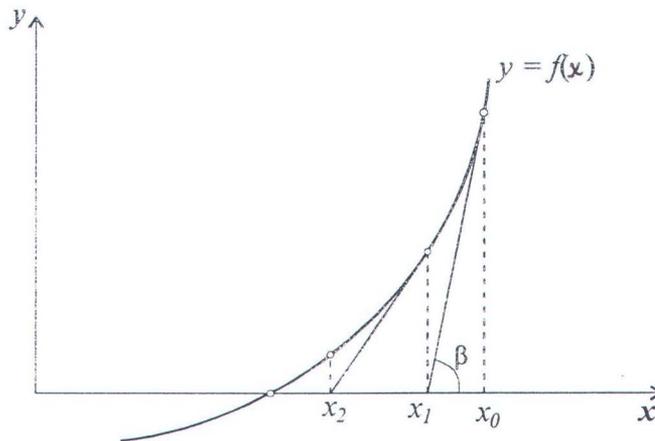
Untuk kasus-kasus tertentu pencarian titik dengan metode ini akan tidak efisien, misalnya seperti pada gambar di bawah ini.



Gambar 4.10 : Kasus pencarian titik yang lambat pada metode posisi palsu

4.3.3. Metode Newton Raphson

Metode yang dibahas ini agak berbeda dari metode-metode sebelumnya. Metode ini adalah metode terbuka, bukan metode pengurung, di mana hanya diperlukan satu nilai taksiran awal. Dari terkaan awal pada akar x_i dapat ditarik suatu garis singgung dari titik $[x_i, f(x_i)]$. Titik potong dari garis singgung ini dengan sumbu x biasanya merupakan taksiran akar yang baik.



Gambar 4.11 : Prinsip metode Newton Raphson

Tangen dari garis singgung tersebut adalah turunan dari fungsi kurva yang dapat dituliskan:

$$\tan \beta = f'(x_i) = \frac{f(x_i)}{x_i - x_{i+1}} \quad x_{i+1} = x_i - \frac{f(x_i)}{f'(x_i)} \quad (4.28)$$

Persamaan di atas adalah rumus dari metode Newton Raphson untuk harga taksiran akar yang lebih baik.

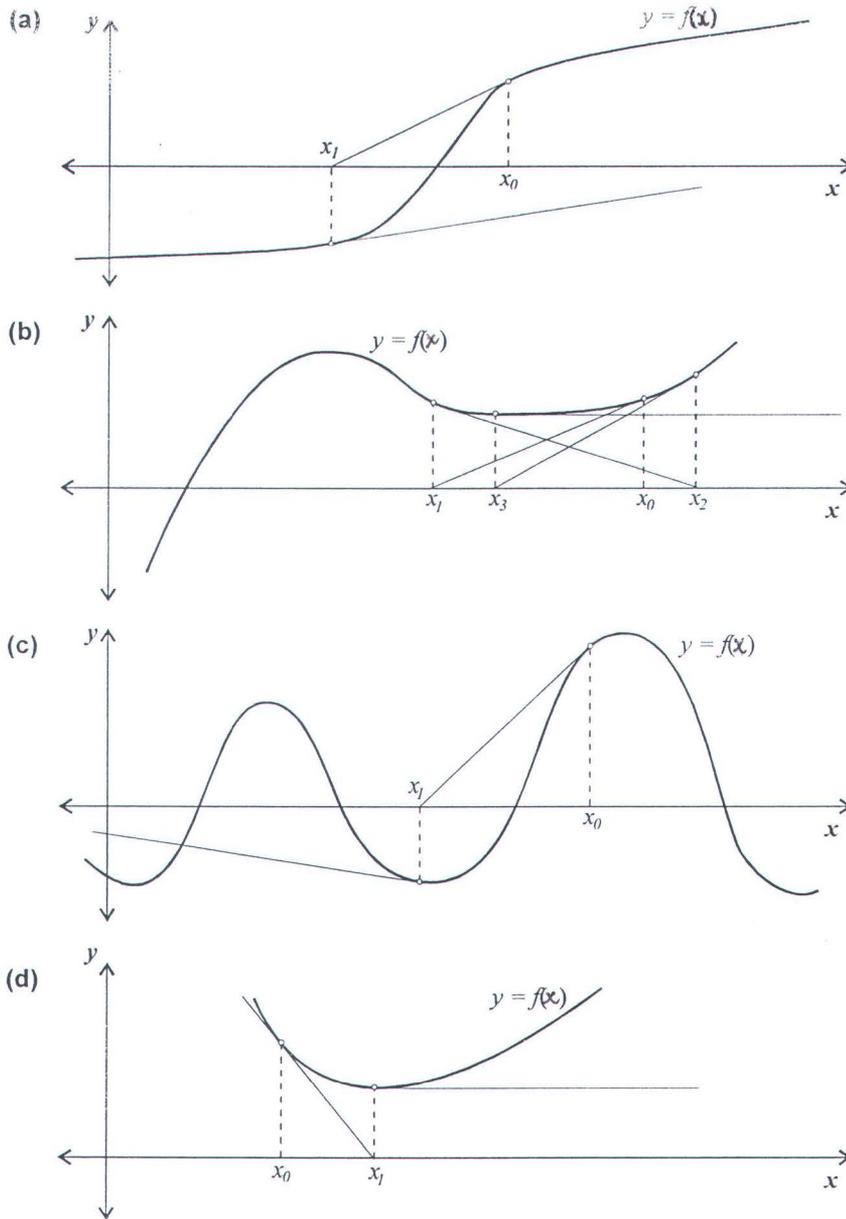
Algoritma metode bagi dua adalah sebagai berikut:

1. Tentukan taksiran awal x_0 dan nilai toleransi $\varepsilon > 0$.
2. Lakukan perhitungan turunan pertama ($f'(x_i)$) dari kurva.
3. Jika $f'(x_i) = 0$, perhitungan selesai dan fungsi tidak menghasilkan akar persamaannya (fungsi tidak berbentuk kurva).
4. Lakukan perhitungan:

$$x_{i+1} = x_i - \frac{f(x_i)}{f'(x_i)} \quad (4.29)$$

5. Jika $|x_{i+1} - x_i| < \varepsilon$, langkah 4 diulang kembali dengan penambahan i .
6. $|x_{i+1} - x_i| \approx \varepsilon$, proses dihentikan dengan x_i sebagai harga dari akar persamaannya.

Metode Newton Raphson ini biasanya sangat efisien, hanya saja terdapat keadaan di mana metode ini akan berjalan dengan buruk pada bentuk-bentuk kurva tertentu. Beberapa contoh bentuk kurva yang dapat menjebak metode ini dapat dilihat pada gambar berikut ini.



Gambar 4.12 : Bentuk-bentuk kurva yang dapat menjebak metode Newton Raphson

BAB V PERANCANGAN DAN PEMBUATAN PERANGKAT LUNAK

Pada bab ini akan dibahas mengenai sistem perangkat lunak, algoritma program, dan struktur data yang digunakan dalam program perencanaan baling-baling kapal. Perangkat lunak tersebut dibuat dengan kompiler Borland Delphi 4.0 yang berbahasa program Pascal. Delphi adalah suatu kompiler berbasis *window* dengan kemampuan *visual programming*, di mana terdapat sarana untuk pembuatan antar muka pemakai (*user interface*) yang baik dengan cara yang relatif mudah. Kemudahan dalam pembuatan antar muka tersebut membuat penyusun dapat lebih berkonsentrasi pada sistem perangkat lunak dari pada membuat sistem menu, dialog, atau penampilan grafis yang baik. Sistem ini dibuat dengan memanfaatkan obyek-obyek yang telah tersedia di dalam Delphi.

5.1. PERSYARATAN SISTEM

Program ini dirancang pada sistem operasi Windows 95, dengan spesifikasi minimum perangkat keras (*hardware*) yang disarankan adalah sebagai berikut:

- *Processor*, Pentium 100MHz
- *Memory*, 32 MB (RAM)
- Kapasitas *Hard Disk* untuk program ± 3 MB
- *Monitor*, SVGA dengan VGA *memory* sebesar 1 MB

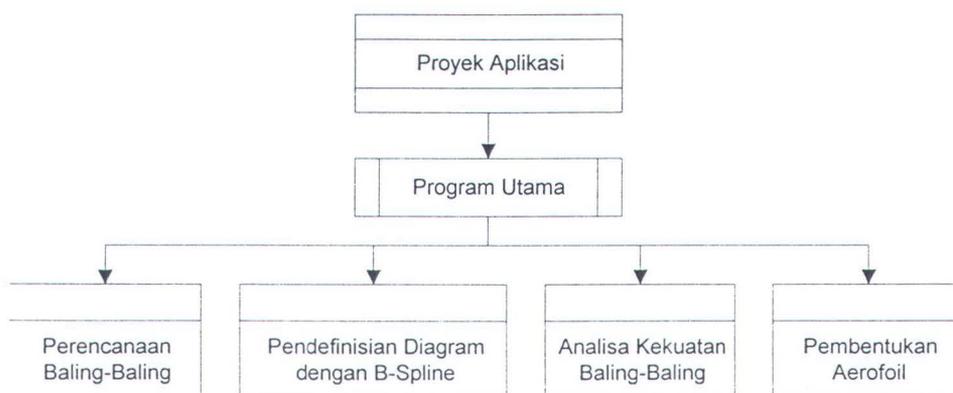
5.2. STRUKTUR PROGRAM

Desain program disusun berdasarkan bagian-bagian pembahasan yang terbagi menjadi beberapa unit program. Pengelompokan ini bertujuan untuk mempermudah dalam penyusunan dan evaluasi dari program tersebut, serta dimungkinkan dari unit-unit program tersebut dapat dikembangkan untuk perancangan perangkat lunak lain yang menggunakan salah satu pembahasan dari program ini.

Pembahasan yang menjadi dasar dari perancangan perangkat lunak ini, antara lain:

- Perencanaan baling-baling kapal
- Pendefinisian lengkung kurva atau permukaan dari diagram pendukung dengan metode B-Spline.
- Analisa kekuatan baling-baling kapal
- Pembentukan profil aerofoil penampang baling-baling

Masing-masing pembahasan ini tersusun berdasarkan unit-unit program yang dikontrol oleh program utama (*project file*). Secara garis besar struktur program dari perencanaan ini adalah:



Gambar 5.1 : Struktur program

5.2.1. Proyek Aplikasi

Delphi mengatur dan mengaktifkan semua unit-unit aplikasi dalam suatu *project file*. File ini berfungsi sebagai file induk, yang mendaftarkan semua unit aplikasi dan *form-form* yang akan dibentuk pada saat program dijalankan. Berikut ini akan diberikan *listing* program dari *project file*, di mana dapat dilihat unit-unit aplikasi yang diaktifkan pada saat program dijalankan.

```

program DPROP;
uses
  Forms,
  Main in 'MAIN.PAS' {MainForm},
  UFinFRN in 'UFinFRN.pas' {FinFRN},
  UFCoef in 'UFCoef.pas' {FCoef},
  About in 'About.pas' {AboutBox},
  UFSheet in 'UFSheet.pas' {FSheet},
  Typevar in 'Typevar.pas',
  Calc in 'Calc.pas',
  BSpline in 'BSpline.pas',
  UFStrght in 'UFStrght.pas' {FStrength},
  Foiltype in 'Foiltype.pas',
  Unew in 'Unew.pas' {UFNew},
  Ulview in 'Ulview.pas' {Flview},
  UPD in 'UPD.pas' {FPD},
  Uexpview in 'Uexpview.pas' {FEXPView},
  Ufoilview in 'Ufoilview.pas' {FFoilview},
  DpLogo in 'DpLogo.pas' {Flogo};

{$R *.RES}

begin
  Flogo := TFlogo.Create(Application);
  Flogo.Show;
  Flogo.Update;
  Application.CreateForm(TMainForm, MainForm);
  Application.CreateForm(TUFNew, UFNew);
  Application.CreateForm(TFinFRN, FinFRN);
  Application.CreateForm(TFCoef, FCoef);
  Application.CreateForm(TFSheet, FSheet);
  Application.CreateForm(TFStrength, FStrength);
  Application.CreateForm(TAboutBox, AboutBox);
  Application.CreateForm(TFlview, Flview);
  Application.CreateForm(TFPD, FPD);
  Application.CreateForm(TFEXPView, FEXPView);
  Application.CreateForm(TFFoilview, FFoilview);
  Flogo.Hide;
  Flogo.Free;
  Application.Run;
end.

```

5.2.2. Program Utama

Aplikasi perencanaan baling-baling ini memiliki beberapa *form* (*multiform*) yang dikontrol dalam program utama. Metode perancangan aplikasi ini didasarkan pada konsep *Single document interface* (SDI), dimana program hanya beroperasi pada satu *file* data. Program ini tersusun menjadi dua tipe jendela (*window*), yaitu *window* utama dan *window* anak. Program utama tersusun pada *window* utama sedangkan aplikasi-aplikasi dibawahnya terletak pada *window* anak.

Keuntungan menggunakan metode SDI adalah aplikasi yang tersusun dapat dikelompokkan dalam satu jendela utama, sehingga program mempunyai otoritas pada sistem dan aplikasi dapat terkoordinasi dengan baik. Salah satu contoh aplikasi dengan metode SDI adalah aplikasi Borland Delphi 4.0.

Unit-unit program yang membentuk program utama adalah:

TYPEVAR.PAS : Pendefinisian konstanta, tipe variabel, dan variabel yang digunakan secara global dalam program.

MAIN.PAS : Unit program utama yang mengkoordinasi *routine-routine* aplikasi dibawahnya.

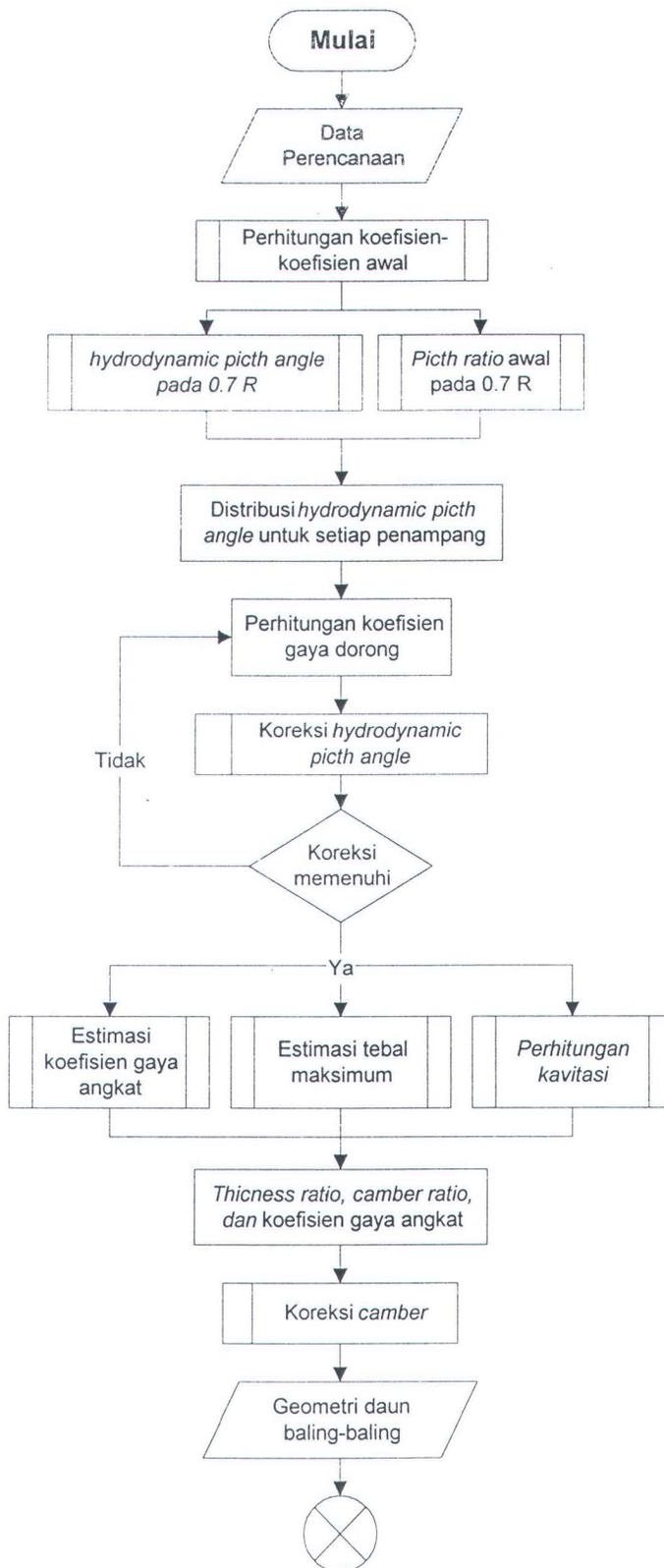
ABOUT.PAS : Tentang Aplikasi

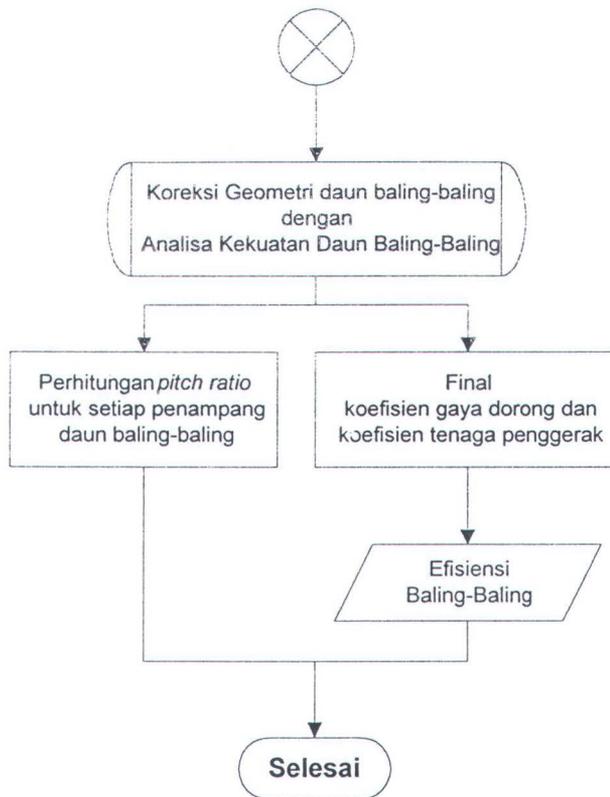
5.2.3. Aplikasi Perencanaan Baling-Baling

Pada bagian ini dibahas mengenai proses penyusunan aplikasi perencanaan baling-baling kapal. Bagian ini merupakan inti dari program perencanaan baling-baling kapal dengan metode Eckhardt-Morgan, dimana proses perencanaan dilakukan dari input data, proses perhitungan sampai output geometri dan



karakteristik yang direncanakan. Aplikasi perencanaan baling-baling kapal tersusun dalam beberapa tahap sesuai dengan diagram proses berikut ini:





Gambar 5.2 : Diagram proses pembuatan aplikasi perencanaan baling-baling kapal

Dari diagram proses tersebut dapat diuraikan persamaan-persamaan dan data data yang diperhitungkan dalam program, antara lain:

1. Data perencanaan, meliputi:

- Kecepatan dinas kapal (v_s)
- *Shaft Horsepower* (P_s)
- Putaran mesin (n)
- Tahanan kapal (R_s)
- *Effective wake fraction* (w_0)
- *Thrust deduction fraction* (t)
- Jumlah daun baling-baling (z)
- Diameter baling-baling (D), dapat diperoleh dengan persamaan 3.1.

2. Perhitungan koefisien-koefisien awal, meliputi persamaan 3.2, 3.3, 3.4, 3.5, 3.6, 3.7, dan 3.8.
3. Perhitungan *hydrodynamic pitch angle* (β_i) dan *pitch ratio* (P/D) awal pada $0.7 R$, meliputi persamaan 3.9 dan 3.10.
4. Distribusi *hydrodynamic pitch angle* (β_i) dengan persamaan 3.11.
5. Perhitungan koefisien gaya dorong (C_{Ti}) pada aliran *non viscous* diukur dari setiap penampang dengan persamaan 3.12. Pendefinisian *Golstein factor* dilakukan dengan metode *B-Spline*.
6. Koreksi *hydrodynamic pitch angle* (β_i) terhadap besarnya gaya dorong yang diperhitungkan, dengan persamaan 3.13.
7. Estimasi koefisien gaya angkat (c_L) dengan persamaan 3.14.
8. Estimasi tebal maksimum (t_x) dengan persamaan 3.16.
9. Perhitungan kavitasi dengan persamaan 3.15.
10. *Geometric ratio* diperoleh dari *incipien cavitation curve* (lampiran 3).
11. Koreksi *camber* dengan persamaan 3.17 dan 3.18 serta dilakukan pembacaan diagram *camber correction coefficient* (lampiran 4).
12. Geometri daun baling-baling, diperhitungkan dari beberapa estimasi yang ditentukan sebelumnya.
13. Koreksi geometri daun baling-baling dengan analisa kekuatan daun baling-baling (dapat dilihat pada bagian analisa kekuatan daun baling-baling).
14. Dari analisa tersebut diperoleh geometri utama dari baling-baling, yaitu panjang (l), tebal (t_x) dan *camber* (m_x).

15. Perhitungan *pitch ratio* (P/D) setiap penampang daun baling-baling, meliputi persamaan 3.19 s/d 3.27.
16. Perhitungan koefisien gaya dorong (C_T), meliputi persamaan 3.28 dan 3.29.
17. Perhitungan koefisien tenaga penggerak (C_P) dengan persamaan 3.30.
18. Efisiensi baling-baling ditentukan dengan persamaan 3.32.

Unit-unit program yang mendukung aplikasi perencanaan baling-baling kapal antara lain:

- | | | |
|--------------|---|--|
| TYPEVAR.PAS | : | Pendefinisian konstanta, tipe variabel, dan variabel yang digunakan dalam program. |
| UFINFRN.PAS | : | Proses pembacaan input data perencanaan |
| UFSHEET.PAS | : | Proses perencanaan baling-baling kapal |
| CALC.PAS | : | Perhitungan koefisien-koefisien dalam perencanaan |
| UEXPVIEW.PAS | : | Menampilkan <i>expanded outline</i> |
| ULVIEW.PAS | : | Menampilkan bentuk setiap penampang daun baling-baling |
| UPD.PAS | : | Menampilkan kurva harga <i>pitch</i> |

5.2.4. Pendefinisian diagram/ grafik dengan metode B-Spline

Bagian ini membahas mengenai pendefinisian lengkung kurva atau permukaan dari diagram-diagram yang digunakan pada proses perhitungan perencanaan baling-baling kapal dengan metode B-Spline. Diagram-diagram yang diperhitungkan dalam perencanaan antara lain:

1. Goldstein *functions*
2. Kramer's *thrust coefficient curves*
3. *Camber correction coefficient*
4. *Incipient cavitation curves*
5. *Coefficient for estimating blades thickness*
6. *Pitch correction coefficient for $r/R = 0.7$*
7. *Coefficient for blade section area*
8. *Coefficient for I_{xo} of blade section*
9. *Coefficient for I_{yo} of blade section*

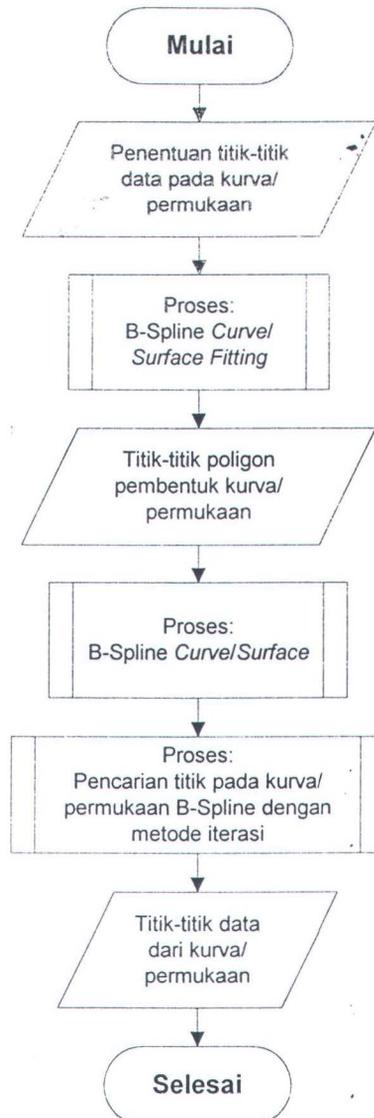
diagram-diagram tersebut dapat dilihat pada lampiran.

Unit-unit program yang mendukung pendefinisian lengkung kurva atau permukaan dari diagram-diagram pendukung, antara lain:

TYPEVAR.PAS : Pendefinisian konstanta, tipe variabel, dan variabel yang digunakan dalam program.

BSPLINE.PAS : Pendefinisian lengkung kurva atau permukaan dengan metode B-Spline.

Secara garis besar diagram proses dari pendefinisian persamaan lengkung kurva/ permukaan dari diagram-diagram yang digunakan dalam perhitungan dapat dilihat pada gambar 5.3.

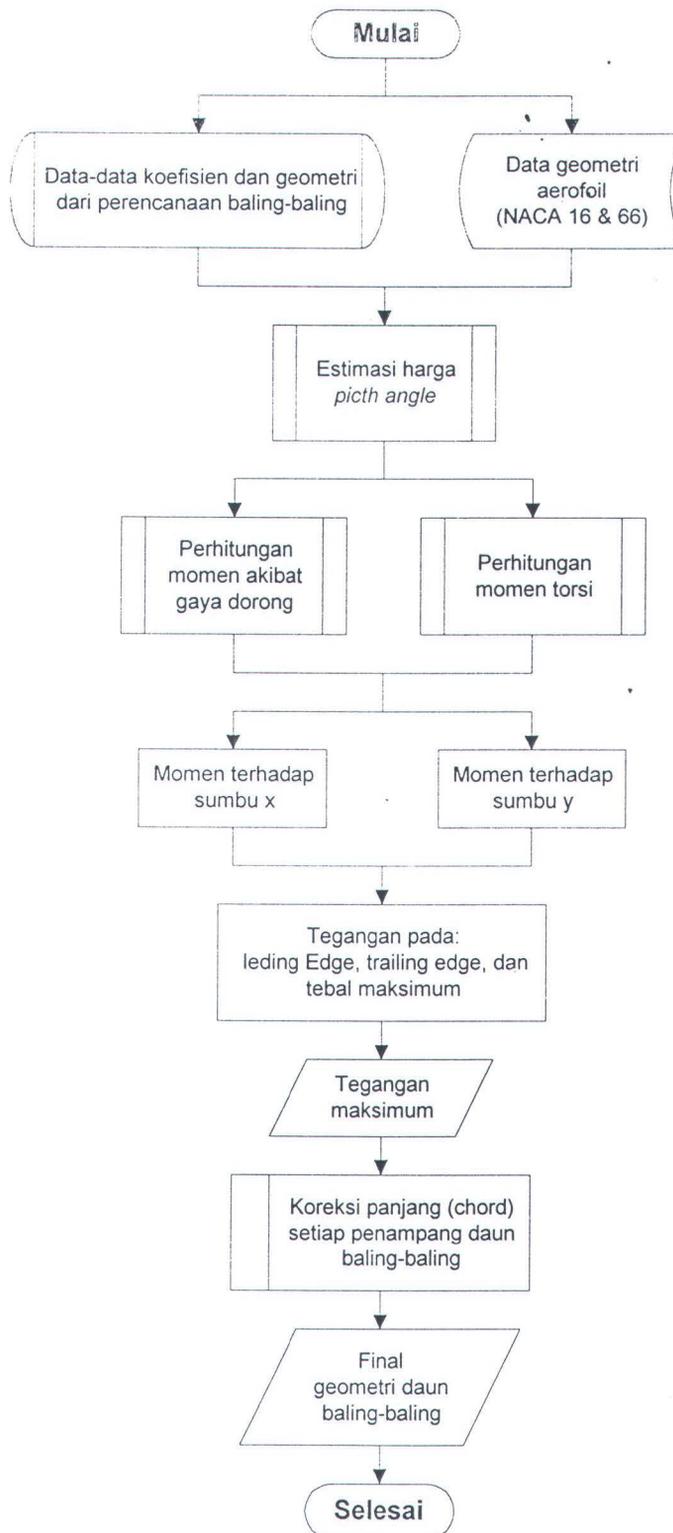


Gambar 5.3 : Diagram proses pendefinisian lengkung kurva/ permukaan dari diagram

5.2.5. Analisa Kekuatan Daun Baling-Baling Kapal

Setelah proses perencanaan dilakukan dan menghasilkan bentuk geometri dari penampang daun baling-baling, maka selanjutnya dilakukan koreksi terhadap kekuatan daun baling-baling kapal berdasarkan tipe dari aerofoil yang digunakan. Koreksi ini dimungkinkan untuk mendapatkan bentukan geometri baru yang memenuhi kriteria kekuatan daun baling-baling yang diijinkan.

Diagram proses dari analisa kekuatan daun baling-baling adalah sebagai berikut:



Gambar 5.4 : Diagram proses analisa kekuatan daun baling-baling

Dari diagram proses tersebut dapat diuraikan persamaan-persamaan dan data data yang diperhitungkan dalam analisa kekuatan daun baling-baling, antara lain:

1. Data-data koefisien dan geometri dari perencanaan baling-baling, meliputi:
 - panjang (*chord*) penampang daun baling-baling (l)
 - *thickness ratio* (t_x/l)
 - *camber ratio* (m_x/l) pada setiap penampang
 - *Hydrodynamic pitch angle* (β_i) pada setiap penampang
 - *Lift coefficient* (c_L)
2. Data geometri aerofoil yang digunakan, lampiran 8. Dari data-data tersebut diperhitungkan geometri properti aerofoil dengan menggunakan persamaan 3.59 s/d 3.67.
3. Estimasi *pitch angle* dengan persamaan:
$$\tan \phi = 1.05 \cdot \tan \beta_i$$
4. Perhitungan momen akibat gaya dorong, menggunakan persamaan 3.56.
5. Perhitungan momen torsi menggunakan persamaan 3.57.
6. Perhitungan momen terhadap sumbu x dengan persamaan 3.54 dan momen terhadap sumbu y dengan persamaan 3.55.
7. Perhitungan tegangan maksimum pada daun baling-baling, meliputi tegangan pada:
 - *Leading edge*, dengan persamaan 3.58a.
 - *Trailing Edge*, dengan persamaan 3.58b.

- Tebal maksimum, dengan persamaan 3.58c.
8. Dari beberapa tegangan pada *point 7* ditentukan tegangan terbesar untuk mengkoreksi panjang (*chord*) setiap daun baling-baling. Koreksi tersebut dilakukan dengan menggunakan persamaan 3.68.

Unit-unit program yang memproses analisa kekuatan daun baling-baling, antara lain:

TYPEVAR.PAS : Pendefinisian konstanta, tipe variabel, dan variabel yang digunakan dalam program.

UFSTRGHT.PAS : Analisa kekuatan daun baling-baling.

5.3. PENGUJIAN PROGRAM

Berikut ini akan dibahas mengenai pengujian aplikasi dari perencanaan baling-baling kapal dengan metode Echartd-Morgan. Alur dari pengujian ini mengikuti diagram proses aplikasi perencanaan baling-baling yang telah dikemukakan sebelumnya.

1. Input data:

Input data dari aplikasi perencanaan baling-baling, meliputi:

- *Number of blade* [z] : jumlah daun baling-baling
- *Optimum diameter* : ukuran diameter baling-baling (ft).
- *Density of water* [ρ]: massa jenis air (lb/ft^3)
- *Specific weight of water* [γ] : specific weight air.
- *Max. allowable stress* [Sc] : maksimum tegangan yang diijinkan untuk bahan yang digunakan pada daun baling-baling (psi).

Input Data

Free-Running Nonoptimum Propeller Design

Number of blades [z]	5	Optimum diameter [D]	12.5 feet
Density of water [ρ]	1.988 lb/ft ³	Ship speed [V_s]	35 knots
Specific weight of water [γ]	64.4	RPM	300
Max. allowable stress [S_c]	12500 psi	Shaft horsepower [Ps]	32600
Atmospheric pressure in deep of water [pa]	33 feet	Resistance of ship [Rs]	200000 lb
Hydrostatic pressure at section in deep of water [p]	12 feet	Thrust deduction fraction [t]	0.05
Type of blade section	NACA_16	Effective wake fraction [w ₀]	0
Type of mean line	a=0.8		

Buttons: Save... OK Cancel

Gambar 5.5 : Kotak dialog input data

- *Atmospheric pressure in deep of water [pa]* : kedalaman air diukur pada tekanan atmosfer (*ft*).
- *Hydrostatic pressure in deep of water [p]* : kedalaman air diukur dari poros baling-baling.
- *Ship speed (v_s)* : kecepatan kapal yang direncanakan (*knot*)
- *RPM* : putaran mesin setiap menit
- *Shaft horsepower [Ps]*: besarnya tenaga penggerak yang ditransmisikan pada poros baling-baling.
- *Resistance of ships [Rs]* : besarnya tahanan kapal yang direncanakan.
- *Thrust deduction fraction [t]* : besarnya koefisien *thrust deduction fraction* baling-baling.
- *Effective wake fraction [w₀]* : besarnya koefisien *effective wake fraction* baling-baling.

- *Type of blade section* : tipe bentuk penampang baling-baling yang digunakan.
- *Type of mean line* : bentuk mean line yang digunakan untuk membentuk penampang daun baling-baling.

Data-data tersebut diisikan pada kotak dialog "Input Data", seperti pada gambar 5.4.

2. Perhitungan koefisien-koefisien awal:

Hasil perhitungan koefisien-koefisien awal yang merupakan variabel-variabel dalam perhitungan perencanaan ditunjukkan pada gambar 5.6.

The image shows a dialog box titled "Design Coefficients" with a close button (X) in the top right corner. Inside the dialog, there are six input fields, each with a label and a unit. The values entered in the fields are as follows:

Parameter	Value	Unit
Speed of advance	35.0000	knots
Advance coefficient	0.3009	
Propeller thrust	210526.3158	lbs
Thrust coefficient	0.4945	
Nonviscous thrust coefficient	0.5142	
Ideal efficiency	0.8999	

At the bottom of the dialog box, there is an "OK" button.

Gambar 5.6 : Kotak informasi Design Coefficient

Koefisien-koefisien tersebut meliputi:

- *Speed of Advance* (V_A)
- *Advance Coefficient* (λ)
- *Propeller Thrust* (T)

- Thrust Coefficient (C_T)
- Nonviscous Thrust Coefficient (C_{Ti})
- Ideal Efficiency (η_i)

3. Geometri baling-baling

Hasil perhitungan geometri baling-baling yang direncanakan dapat dilihat pada gambar 5.7.

Camber Correction				Geometry of blades						
r/R	k1	k2	(mx/l)	r/R	Γ	l	bx/l	mx/l	tx	my
0.200	0.9943	1.3500	0.0197	0.200	3.5041	2.8821	0.2070	0.0239	0.5967	0.0690
0.300	0.9901	1.6569	0.0237	0.300	4.7547	3.6069	0.1412	0.0312	0.5094	0.1126
0.400	0.9858	1.9381	0.0229	0.400	6.1608	4.2024	0.1020	0.0336	0.4285	0.1411
0.500	0.9794	2.2436	0.0207	0.500	7.4127	4.5614	0.0771	0.0336	0.3519	0.1534
0.600	0.9686	2.6412	0.0186	0.600	8.0360	4.5821	0.0599	0.0326	0.2745	0.1495
0.700	0.9555	3.0482	0.0159	0.700	8.1864	4.0909	0.0527	0.0318	0.2157	0.1299
0.800	0.9422	3.6133	0.0143	0.800	7.3459	3.1893	0.0478	0.0330	0.1524	0.1052
0.850	0.9356	3.9303	0.0135	0.850	6.5983	2.6720	0.0464	0.0333	0.1239	0.0889
0.900	0.9288	4.2229	0.0127	0.900	5.5101	2.0956	0.0446	0.0334	0.0935	0.0700
0.950	0.9220	4.5000	0.0113	0.950	4.0873	1.3959	0.0467	0.0332	0.0651	0.0463
1.000	0.9153	0.0000	0.0000	1.000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

Gambar 5.7 : Tabel geometri dari baling-baling

r/R	c_L/D	l	c_L	σ	tx/l	mx/l	mx/l [cor]
0.200	0.0605	2.8821	0.2625	0.5711	0.2070	0.0178	0.0239
0.300	0.0809	3.6069	0.2804	0.4082	0.1412	0.0190	0.0312
0.400	0.0870	4.2024	0.2589	0.2895	0.1020	0.0176	0.0336
0.500	0.0823	4.5614	0.2254	0.2092	0.0771	0.0153	0.0336
0.600	0.0688	4.5821	0.1878	0.1551	0.0599	0.0128	0.0326
0.700	0.0526	4.0909	0.1606	0.1182	0.0527	0.0109	0.0318
0.800	0.0364	3.1893	0.1427	0.0923	0.0478	0.0097	0.0330
0.850	0.0285	2.6720	0.1333	0.0822	0.0464	0.0091	0.0333
0.900	0.0210	2.0956	0.1254	0.0736	0.0446	0.0085	0.0334
0.950	0.0131	1.3959	0.1177	0.0662	0.0467	0.0080	0.0332
1.000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0597	0.0000	0.0000	0.0000

Gambar 5.8 : Tabel hasil koreksi analisa kekuatan daun baling-baling

Geometri baling-baling yang direncanakan, meliputi:

- panjang (*chord*) penampang daun baling-baling (l)

- *thickness ratio* (t_x/l)
- *camber ratio* (m_x/l) pada setiap penampang

Harga-harga tersebut telah dikoreksi oleh analisa kekuatan daun baling-baling (gambar 5.8) dan koreksi *camber* (khusus untuk perhitungan *camber*).

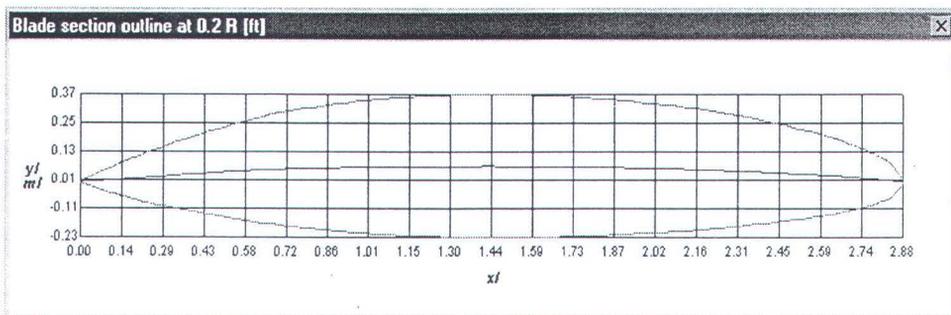
4. Geometri dari penampang daun baling-baling

Hasil perhitungan geometri dari penampang daun baling-baling dapat dilihat pada gambar 5.9. Bentuk dari penampang tersebut disesuaikan dengan jenis aerofoil yang digunakan (NACA 16 atau 66).

		Hydrodynamic Pitch Angle	Geometric Ratio	Geometry of Blades	Geometry of Blade Section	Pitch Ratio	Thrust and Power				
TE	xl	0.0000	0.1441	0.2882	0.5764	0.8646	1.1529	1.4411	1.5852	1.7293	2.0175
	yl	0.0060	0.0704	0.1252	0.2088	0.2620	0.2901	0.2984	0.2960	0.2911	0.2634
	ml	0.0000	0.0118	0.0249	0.0495	0.0613	0.0674	0.0690	0.0681	0.0663	0.0595
0.2 R	xl	0.0000	0.1803	0.3607	0.7214	1.0821	1.4428	1.8034	1.9838	2.1641	2.5248
	yl	0.0051	0.0601	0.1069	0.1783	0.2237	0.2477	0.2547	0.2527	0.2486	0.2300
	ml	0.0000	0.0193	0.0404	0.0792	0.1001	0.1102	0.1126	0.1113	0.1083	0.0972
TE	xl	0.0000	0.2101	0.4202	0.8405	1.2607	1.6810	2.1012	2.3113	2.5215	2.9417
	yl	0.0043	0.0505	0.0899	0.1499	0.1882	0.2083	0.2143	0.2125	0.2091	0.1934
	ml	0.0000	0.0241	0.0507	0.0932	0.1255	0.1380	0.1411	0.1394	0.1356	0.1218
TE	xl	0.0000	0.2281	0.4561	0.9123	1.3684	1.8246	2.2807	2.5088	2.7368	3.1930
	yl	0.0035	0.0415	0.0738	0.1231	0.1545	0.1711	0.1760	0.1745	0.1717	0.1588
	ml										

Gambar 5.9 : Tabel *Geometry of Blade Section*

Salah satu bentuk dari penampang baling-baling tersebut dapat dilihat pada gambar berikut ini.



Gambar 5.10 : Bentuk penampang pada 0.2 R

5. Efisiensi baling-baling:

Efisiensi baling-baling yang diperhitungkan dari *thrust* dan *power coefficient* dapat dilihat pada gambar 5.11.

v/R	β_i	ϵ	dC_T	ams	$F(C_T)$	dC_P	$F(C_P)$
0.200	63.1483	0.0305	0.1163	1.0000	0.1163	0.1650	0.1650
0.300	52.5322	0.0285	0.2957	4.0000	1.1830	0.4084	1.6335
0.400	44.1126	0.0309	0.5257	2.0000	1.0513	0.7206	1.4415
0.500	37.4058	0.0355	0.7518	4.0000	3.0072	1.0277	4.1107
0.600	31.8886	0.0426	0.8939	2.0000	1.7877	1.2173	2.4345
0.700	27.3731	0.0498	0.9234	4.0000	3.6934	1.2516	5.0065
0.800	23.7228	0.0561	0.8326	1.5000	1.2489	1.1248	1.6871
0.850	22.1570	0.0600	0.7345	2.0000	1.4689	0.9938	1.9876
0.900	20.7335	0.0638	0.6064	1.0000	0.6064	0.8223	0.8223
0.950	19.4369	0.0680	0.4219	2.0000	0.8437	0.5744	1.1488
1.000	18.2531	0.0000	0.0000	0.5000	0.0000	0.0000	0.0000

Coefficient:	
Thrust Coefficient	0.5002
Power Coefficient	0.6813
Shaft horse power	31157.6692
Propeller efficiency	0.7343

Gambar 5.11 : Tabel *Thrust and Power*

Untuk lebih jelas mengenai petunjuk penggunaan aplikasi perencanaan baling-baling dapat dibaca manual aplikasi pada lampiran.

BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN

6.1. KESIMPULAN

Kesimpulan yang dapat diambil dalam penyusunan Tugas Akhir ini adalah:

1. Teori *vortex* dapat memberikan penjelasan yang rasional tentang terjadinya dan perhitungan gaya dorong yang dihasilkan oleh baling-baling kapal. Sehingga perencanaan baling-baling kapal dapat diperhitungkan lebih teliti sesuai dengan kondisi kapal yang direncanakan.
2. Metode Eckhardt-Morgan dapat menjabarkan teori *vortex* dalam perencanaan baling-baling kapal, sehingga perhitungan-perhitungan matematis yang melibatkan konsep hidrodinamik dapat disusun dalam tahap-tahap perencanaan yang mudah untuk diterapkan dalam perhitungan numeris dan aplikasi komputer.
3. Aplikasi komputer dapat membantu proses perencanaan, sehingga penentuan geometri dan karakteristik dari baling-baling yang direncanakan dapat dilakukan dengan cepat dan teliti.
4. Pendefinisian diagram-diagram yang digunakan dalam perhitungan perencanaan dengan metode Basis Spline sangat mempermudah proses perencanaan, karena secara otomatis komputer dapat membaca diagram-diagram tersebut untuk digunakan dalam perhitungan.
5. Bentuk aerofoil yang disediakan dalam aplikasi perencanaan baling-baling dapat memberikan alternatif pemilihan bentuk penampang dan penentuan geometri/ karakteristik baling-baling yang direncanakan.

6.2. SARAN

Saran-saran yang dapat diberikan untuk mengembangkan aplikasi perencanaan baling-baling dengan teori vortex (metode Eckhardt-Morgan) adalah:

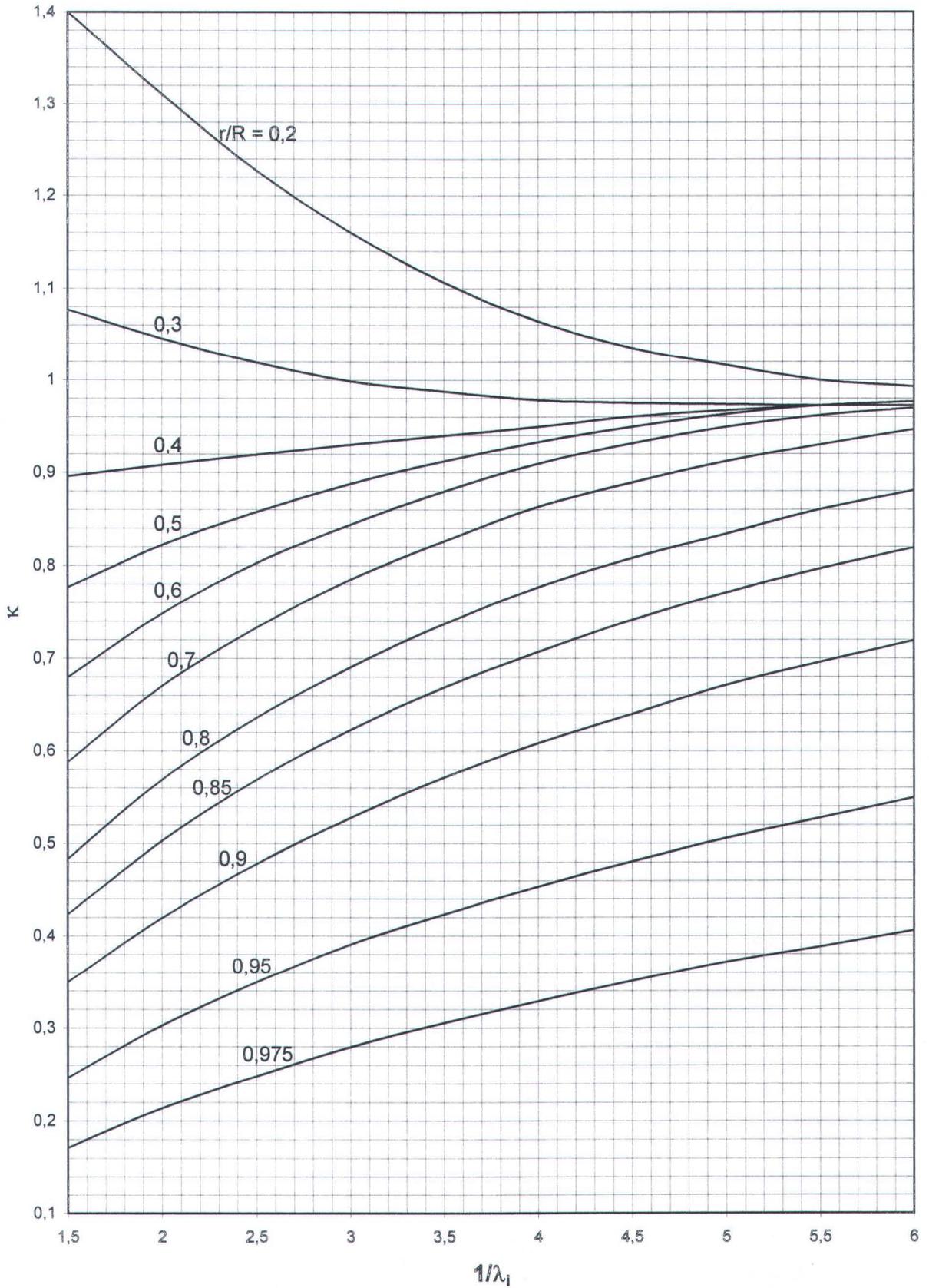
1. Untuk melengkapi aplikasi perencanaan baling-baling, maka perlu ditambahkan proses penggambaran baling-baling dalam program komputer, sehingga aplikasi perencanaan yang disusun merupakan suatu paket program yang menyeluruh dalam perencanaan baling-baling kapal.
2. Pada intinya proses perencanaan hanya terbatas pada penentuan geometri dan karakteristik dari baling-baling yang direncanakan, tanpa memperhitungkan bentuk dari permukaan daun baling-baling (*expanded outline*), sehingga perlu dilakukan penelitian, sejauh mana pengaruh penentuan bentuk permukaan daun baling-baling terhadap karakteristik baling-baling yang telah diperhitungkan.
3. Penambahan bentuk aerofoil yang digunakan dalam perhitungan penentuan geometri dan karakteristik dari baling-baling dapat memberikan banyak alternatif dalam mencari bentuk geometri dan karakteristik yang baik dari baling-baling yang direncanakan.

DAFTAR PUSTAKA

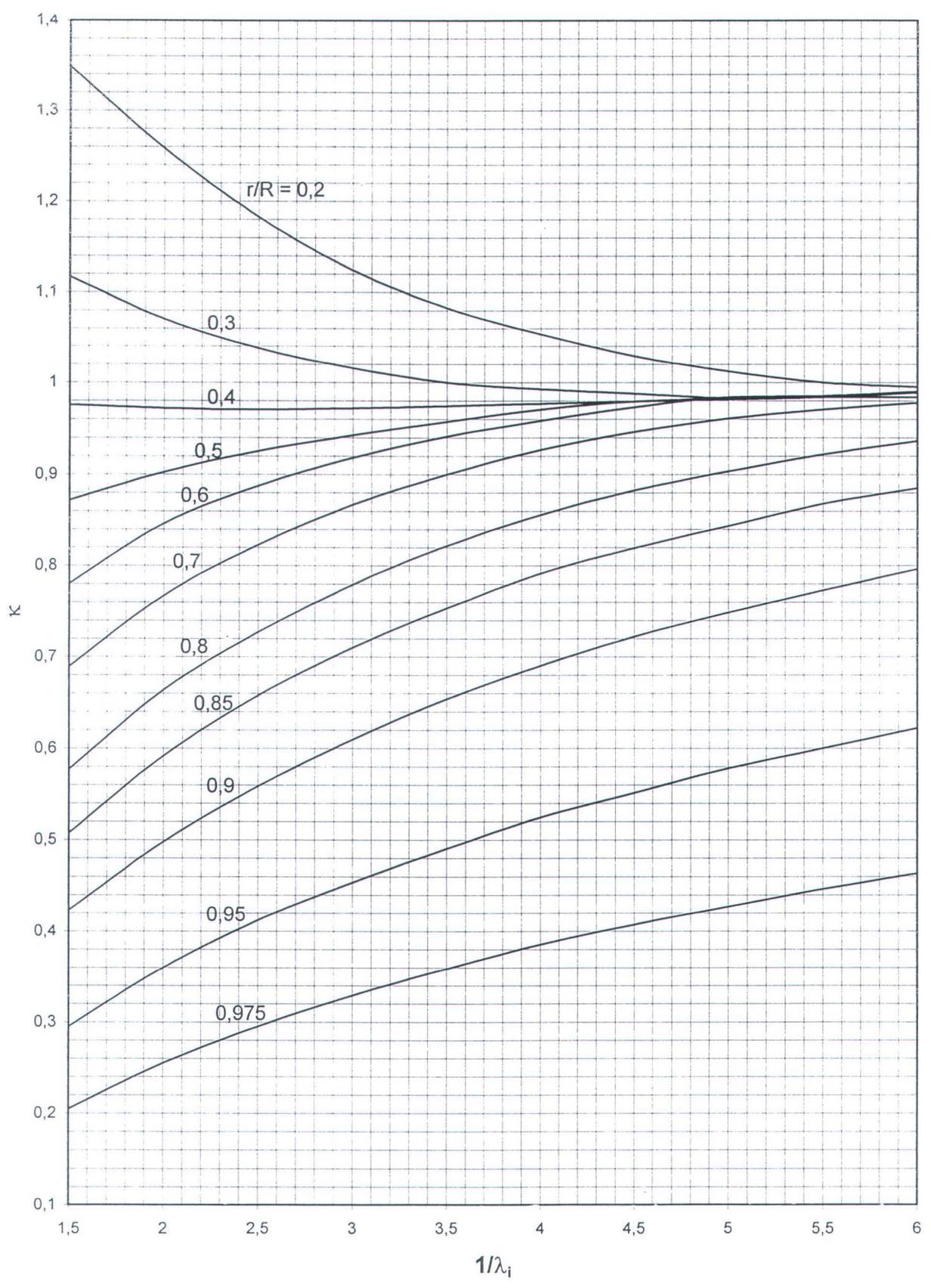
- 1). Eckhardt, M. K., Morgan, W. B., "A Propeller Design Method", the Society of Naval Architects and Marine Engineers, Paper presented at the Annual Meeting, New York, November 9-12, 1955.
- 2). Abbott, I. H., von Doenhoff, A. E., "Theory of Wing Sections", including "Summary of Airfoil Data", Dover Publication, Inc., New York, June 1958.
- 3). O'Brien, T. P., "The Design of Marine Screw Propellers", Hutchinson & Co. (publishers) Ltd., London, 1962.
- 4). Satrodiwongso, T., Mahardjo, W., "Diktat Propulsi Kapal", Jurusan Teknik Perkapalan FTK-ITS, Surabaya, 1982.
- 5). Harvald, SV. AA., "Resistance and Propulsion of Ship", John Wiley & Sons, Inc., 1983.
- 6). Roger, D.F., Adams, J.A., "Mathematical Elements for Computer Graphics", 2ed, McGraw-Hill International Book Company, New York, 1989.
- 7). Holtrop, J., "Propeller Design", Maritime Research Institute Netherlands, January, 1992.
- 8). Van Lammeren, W.P.A, Troost, L., Koning, J.G., "Resistance, Propulsion and Steering of Ships", The technical Publishing Company, Wageningen, September 1946.

LAMPIRAN

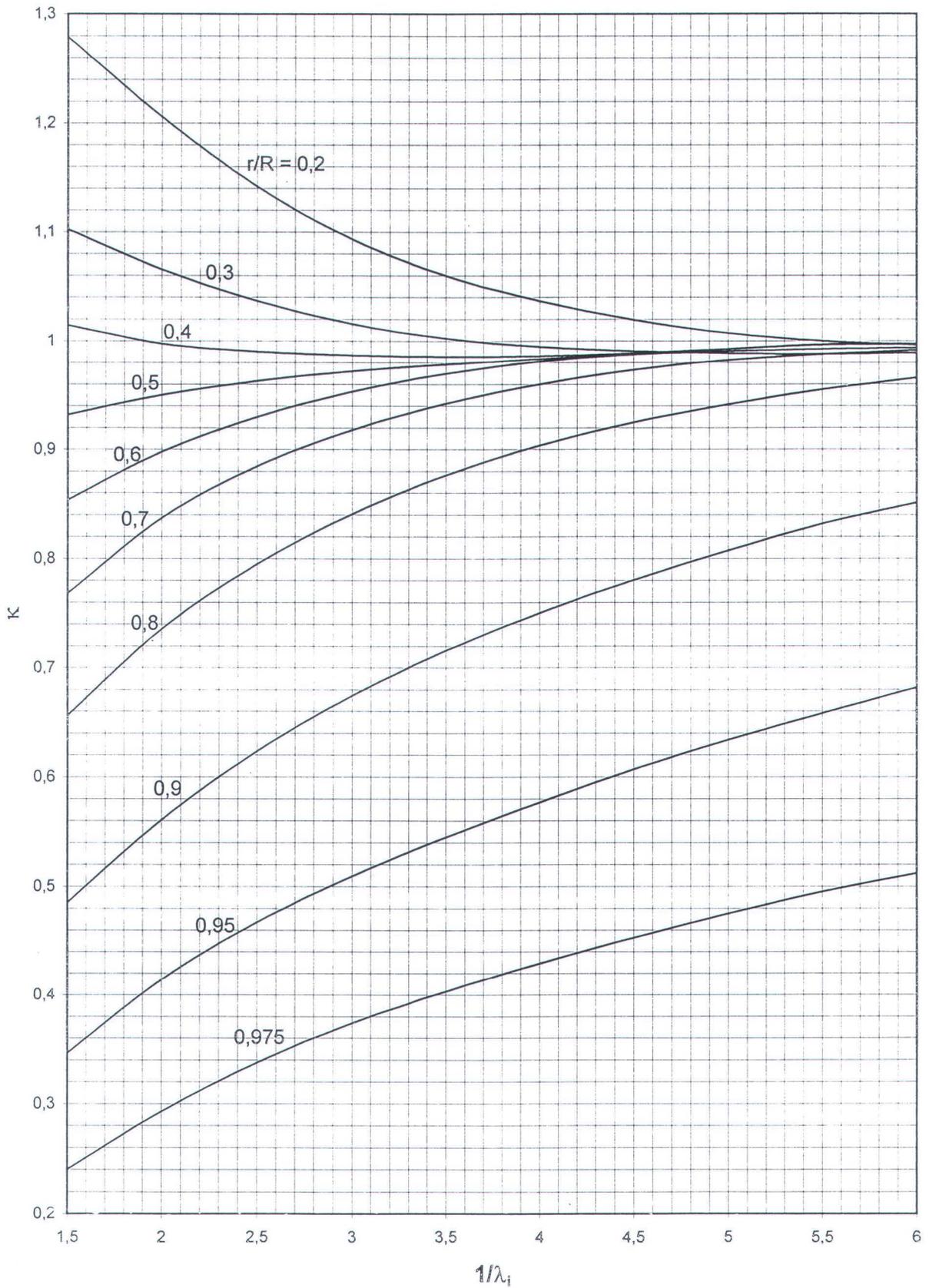
GOLSTEIN FACTOR (3 BLADES)



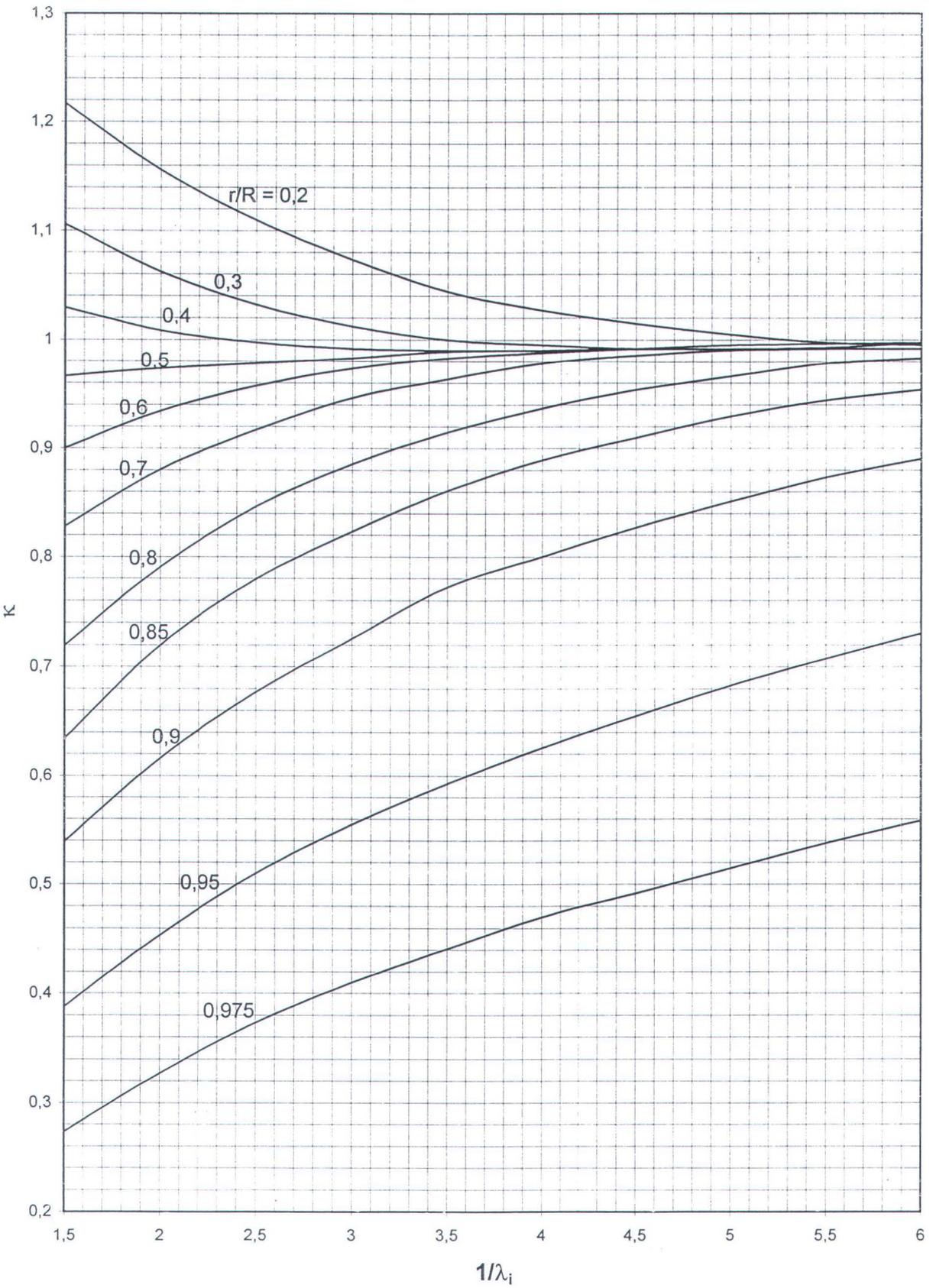
GOLSTEIN FACTOR (4 BLADES)



GOLSTEIN FACTOR (5 BLADES)



GOLSTEIN FACTOR (6 BLADES)



B-Spline Surface Data

Goldstein Factor (3 Blades)

xyz	0,200	0,300	0,400	0,500	0,600	0,700	0,800	0,900	0,950	0,975
1,5	1,4000	1,0767	0,8959	0,7767	0,6795	0,5877	0,4836	0,3493	0,2466	0,1712
2,0	1,3110	1,0452	0,9082	0,8219	0,7479	0,6699	0,5685	0,4192	0,3027	0,2137
2,5	1,2274	1,0192	0,9192	0,8575	0,8027	0,7329	0,6356	0,4781	0,3493	0,2480
3,0	1,1603	0,9986	0,9301	0,8877	0,8438	0,7849	0,6904	0,5274	0,3904	0,2795
3,5	1,1068	0,9877	0,9397	0,9123	0,8795	0,8260	0,7370	0,5712	0,4233	0,3055
4,0	1,0640	0,9781	0,9493	0,9329	0,9096	0,8630	0,7767	0,6082	0,4534	0,3288
4,5	1,0350	0,9753	0,9603	0,9493	0,9315	0,8890	0,8082	0,6397	0,4808	0,3507
5,0	1,0164	0,9740	0,9671	0,9630	0,9493	0,9123	0,8342	0,6710	0,5055	0,3712
5,5	1,0000	0,9726	0,9726	0,9726	0,9616	0,9301	0,8603	0,6959	0,5274	0,3877
6,0	0,9932	0,9726	0,9767	0,9767	0,9699	0,9466	0,8808	0,7192	0,5493	0,4055

Goldstein Factor (4 Blades)

xyz	0,200	0,300	0,400	0,500	0,600	0,700	0,800	0,900	0,950	0,975
1,5	1,3488	1,1171	0,9756	0,8720	0,7805	0,6890	0,5768	0,4232	0,2951	0,2049
2,0	1,2585	1,0707	0,9720	0,9024	0,8463	0,7671	0,6634	0,4976	0,3598	0,2549
2,5	1,1829	1,0378	0,9707	0,9256	0,8878	0,8232	0,7268	0,5585	0,4122	0,2951
3,0	1,1244	1,0159	0,9720	0,9427	0,9183	0,8671	0,7793	0,6098	0,4537	0,3293
3,5	1,0829	1,0000	0,9744	0,9573	0,9415	0,9000	0,8220	0,6537	0,4902	0,3585
4,0	1,0537	0,9927	0,9768	0,9707	0,9585	0,9268	0,8561	0,6902	0,5244	0,3854
4,5	1,0293	0,9878	0,9793	0,9793	0,9732	0,9463	0,8829	0,7220	0,5512	0,4073
5,0	1,0122	0,9829	0,9817	0,9829	0,9841	0,9610	0,9037	0,7488	0,5780	0,4268
5,5	1,0000	0,9841	0,9841	0,9854	0,9854	0,9707	0,9220	0,7732	0,6000	0,4463
6,0	0,9951	0,9841	0,9890	0,9902	0,9902	0,9780	0,9366	0,7963	0,6220	0,4634

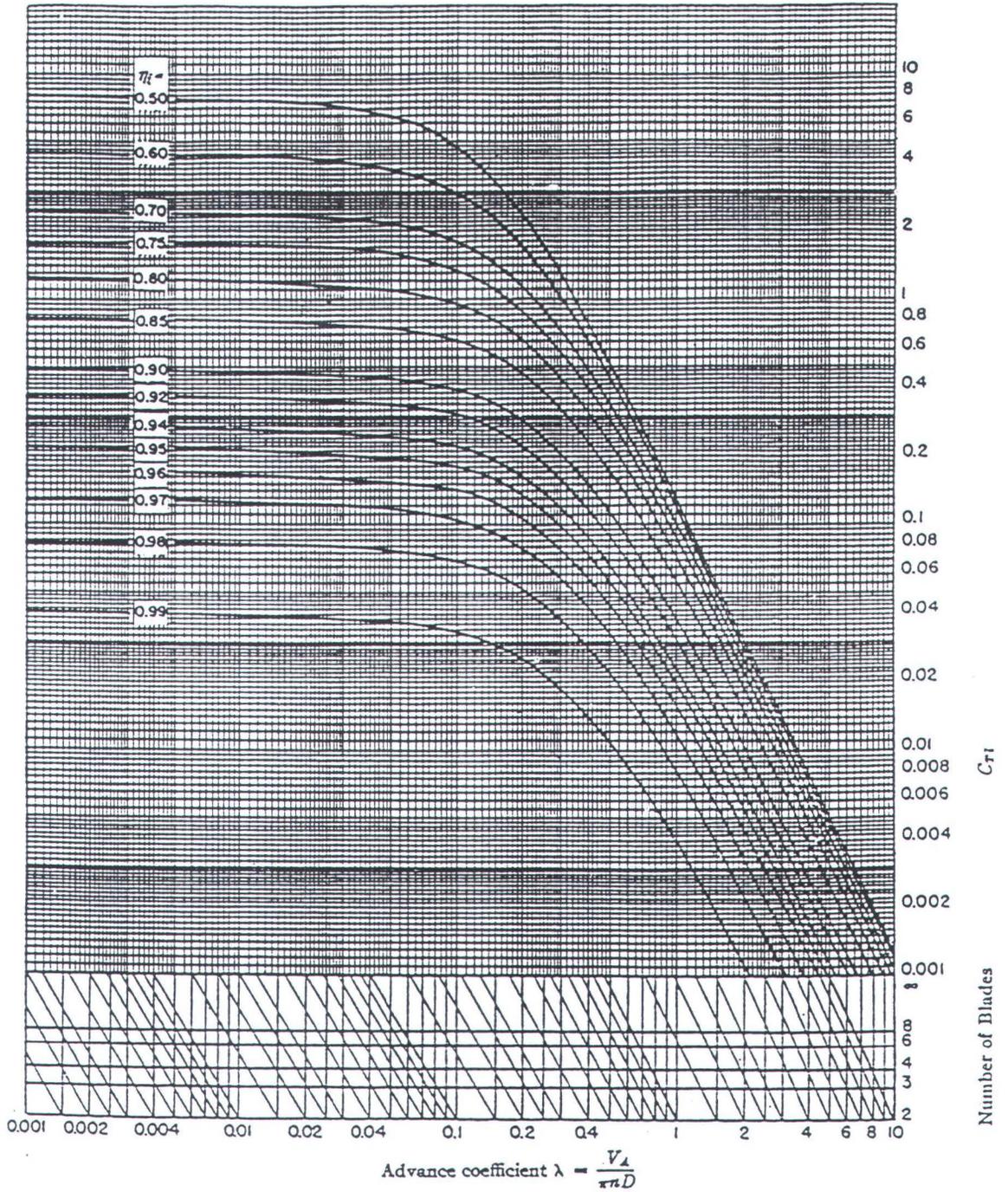
Goldstein Factor (5 Blades)

xyz	0,200	0,300	0,400	0,500	0,600	0,700	0,800	0,900	0,950	0,975
1,5	1,2793	1,1024	1,0146	0,9317	0,8536	0,7682	0,6561	0,4854	0,3462	0,2402
2,0	1,2060	1,0658	0,9976	0,9499	0,8977	0,8370	0,7354	0,5609	0,4139	0,2928
2,5	1,1417	1,0366	0,9903	0,9629	0,9298	0,8845	0,7948	0,6234	0,4672	0,3375
3,0	1,0936	1,0158	0,9869	0,9720	0,9532	0,9179	0,8407	0,6743	0,5095	0,3737
3,5	1,0600	1,0025	0,9855	0,9784	0,9699	0,9422	0,8764	0,7157	0,5449	0,4033
4,0	1,0365	0,9948	0,9860	0,9832	0,9809	0,9601	0,9037	0,7503	0,5769	0,4291
4,5	1,0195	0,9907	0,9886	0,9878	0,9874	0,9733	0,9247	0,7803	0,6066	0,4529
5,0	1,0073	0,9887	0,9926	0,9926	0,9907	0,9823	0,9412	0,8074	0,6338	0,4752
5,5	1,0000	0,9879	0,9964	0,9969	0,9925	0,9877	0,9550	0,8317	0,6581	0,4953
6,0	0,9963	0,9890	0,9971	0,9975	0,9939	0,9915	0,9658	0,8512	0,6818	0,5122

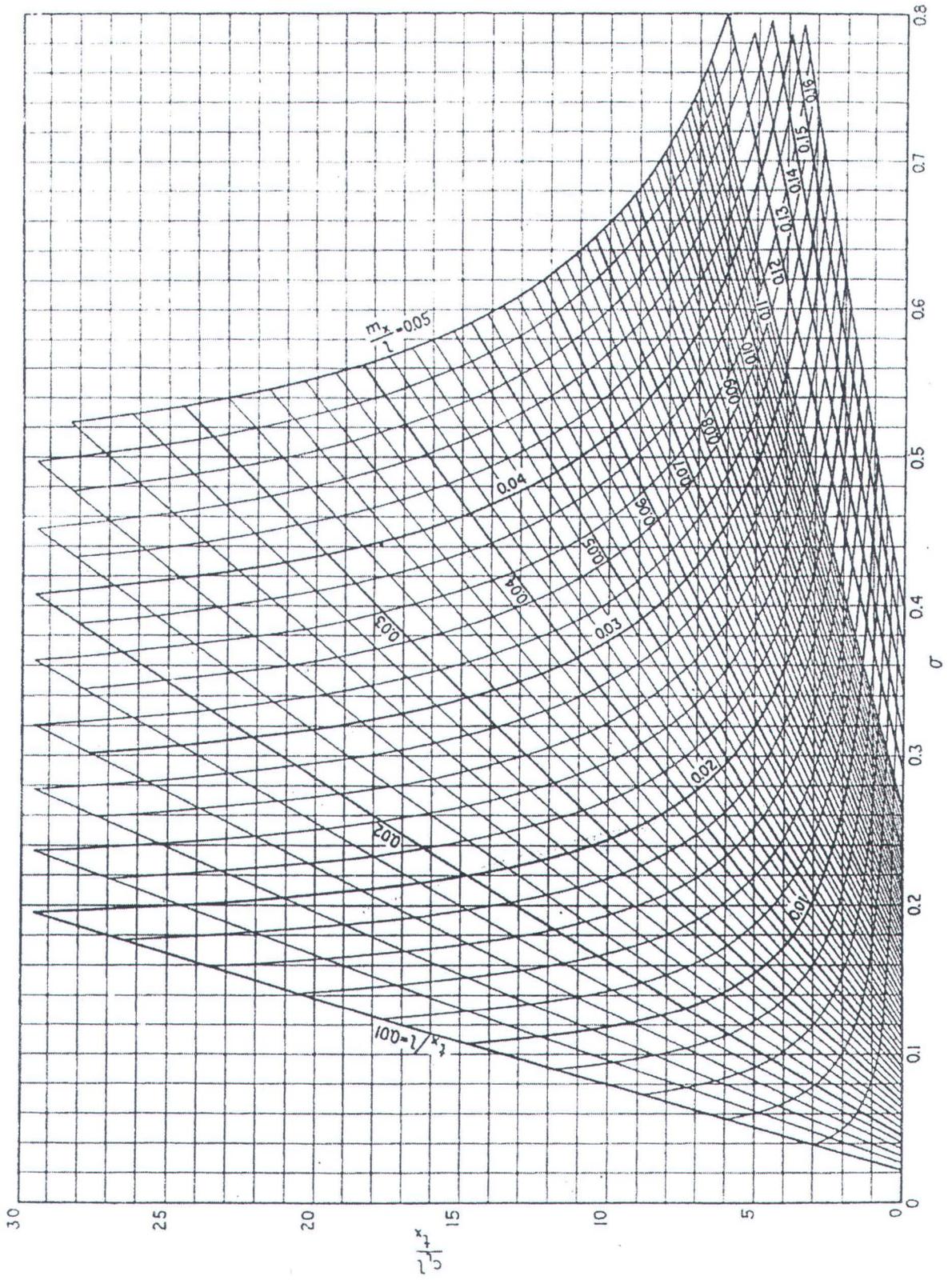
Goldstein Factor (6 Blades)

xyz	0,200	0,300	0,400	0,500	0,600	0,700	0,800	0,900	0,950	0,975
1,5	1,2171	1,1061	1,0293	0,9659	0,9000	0,8280	0,7195	0,5390	0,3878	0,2732
2,0	1,1561	1,0622	1,0085	0,9732	0,9341	0,8805	0,7902	0,6159	0,4537	0,3268
2,5	1,1098	1,0317	0,9976	0,9780	0,9573	0,9171	0,8463	0,6768	0,5098	0,3732
3,0	1,0732	1,0122	0,9915	0,9829	0,9732	0,9463	0,8854	0,7256	0,5549	0,4098
3,5	1,0439	1,0000	0,9902	0,9890	0,9829	0,9634	0,9146	0,7720	0,5927	0,4410
4,0	1,0268	0,9951	0,9902	0,9902	0,9878	0,9730	0,9366	0,8000	0,6256	0,4700
4,5	1,0146	0,9915	0,9915	0,9915	0,9915	0,9854	0,9537	0,8268	0,6549	0,4915
5,0	1,0049	0,9915	0,9915	0,9915	0,9951	0,9902	0,9659	0,8512	0,6829	0,5146
5,5	0,9976	0,9927	0,9915	0,9915	0,9963	0,9915	0,9780	0,8732	0,7073	0,5378
6,0	0,9951	0,9976	0,9915	0,9915	0,9976	0,9915	0,9829	0,8902	0,7305	0,5585

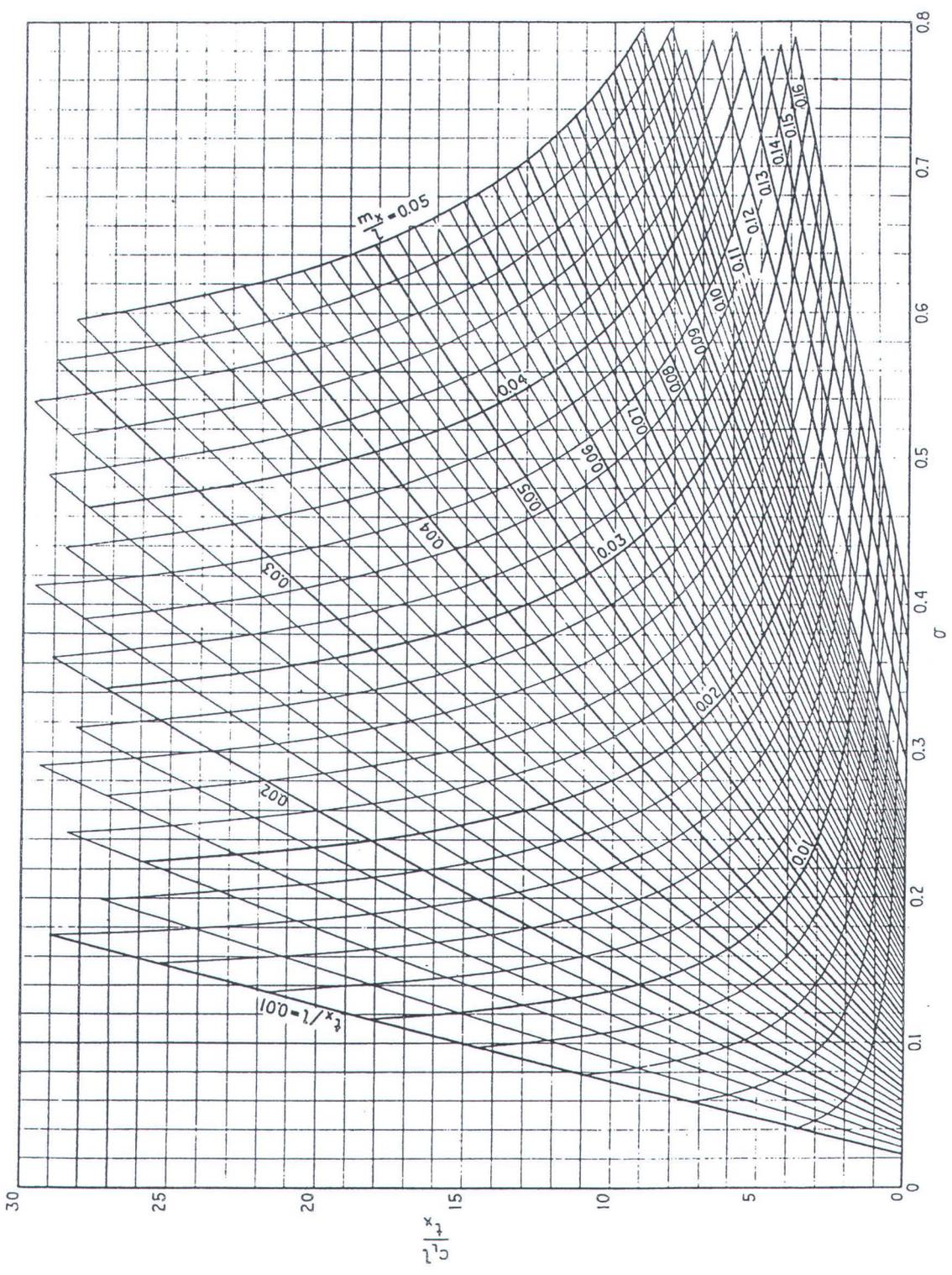
Lampiran 2 Kramer's Thrust Coefficient Curves



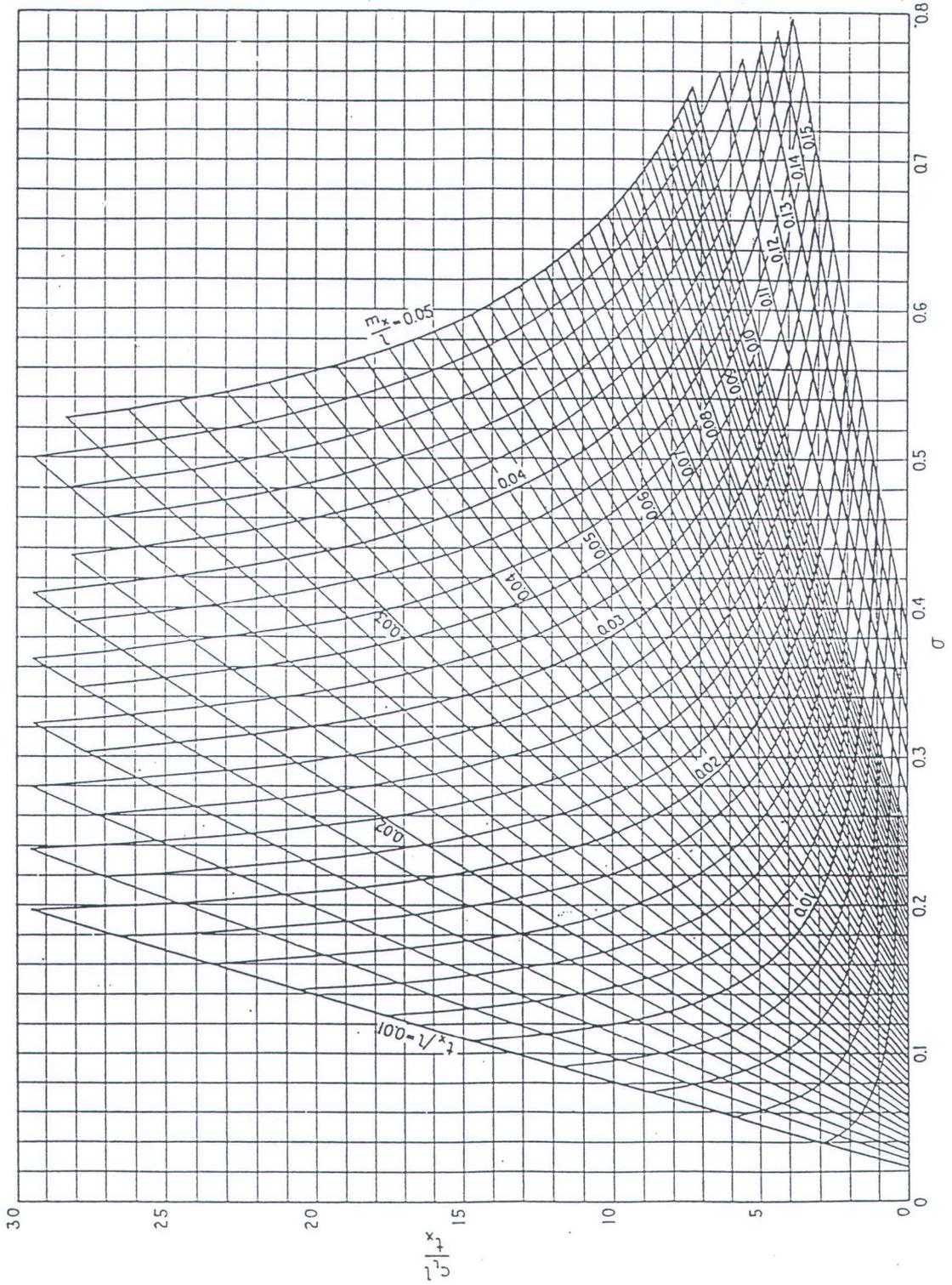
Lampiran 3
Incipient Cavitation Curves For NACA 16 ($a=0.8$)



Lampiran 3
Incipient Cavitation Curves For NACA 16 ($a=1.0$)

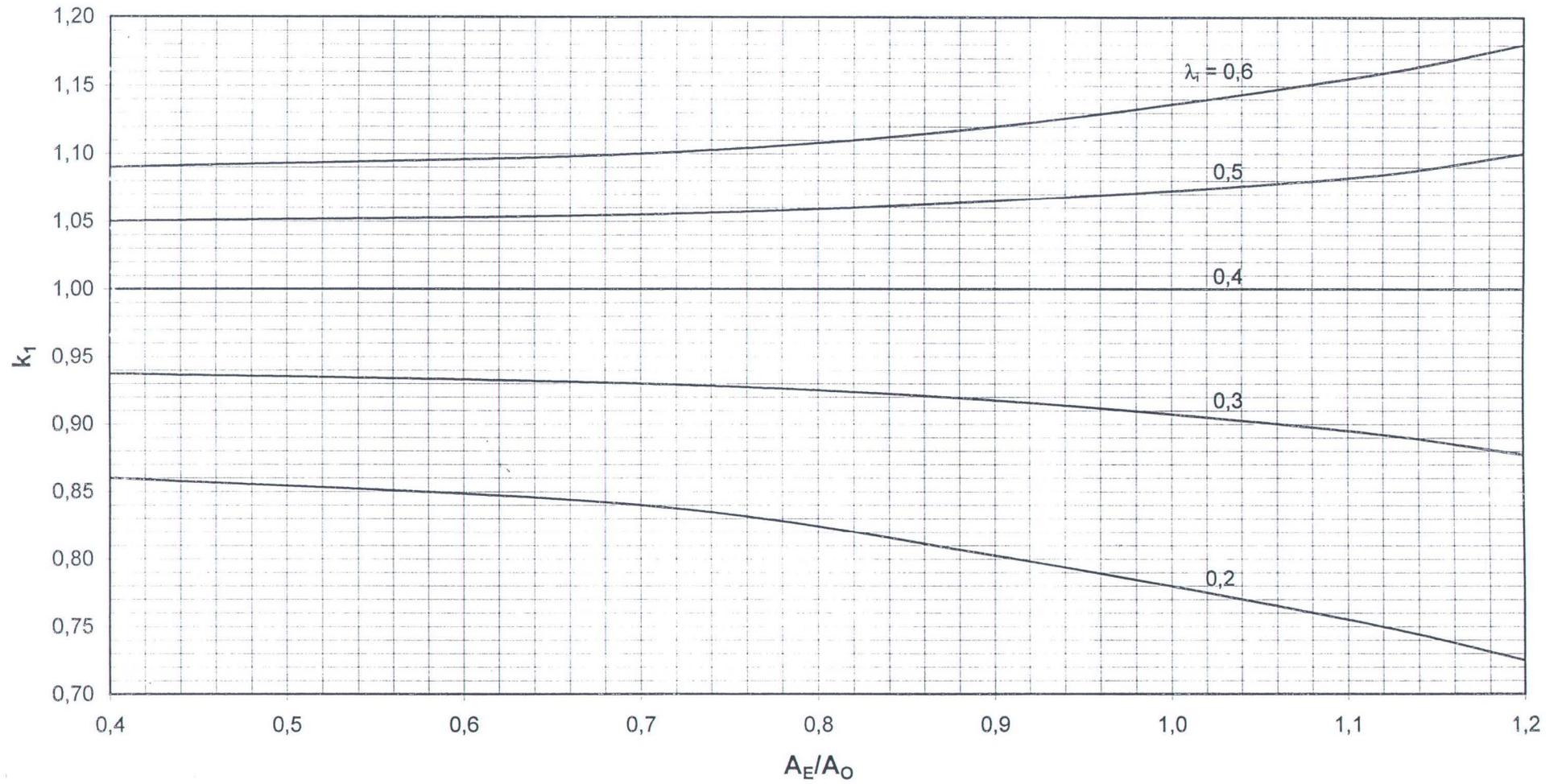


Lampiran 3
Incipient Cavitation Curves For NACA 66 ($\alpha=0.8$)



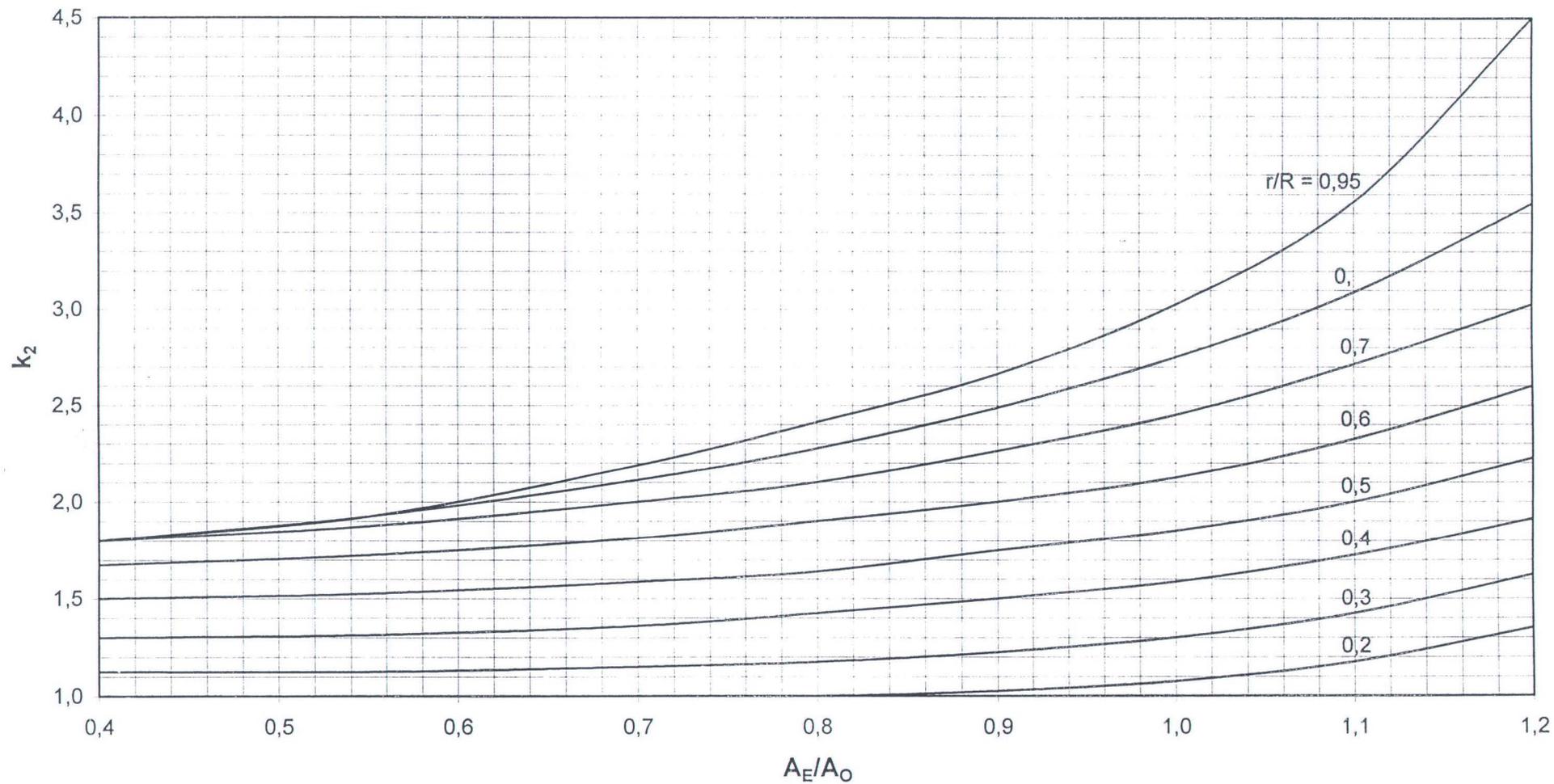
Lampiran 4

Camber Correction Coefficient (k_1)



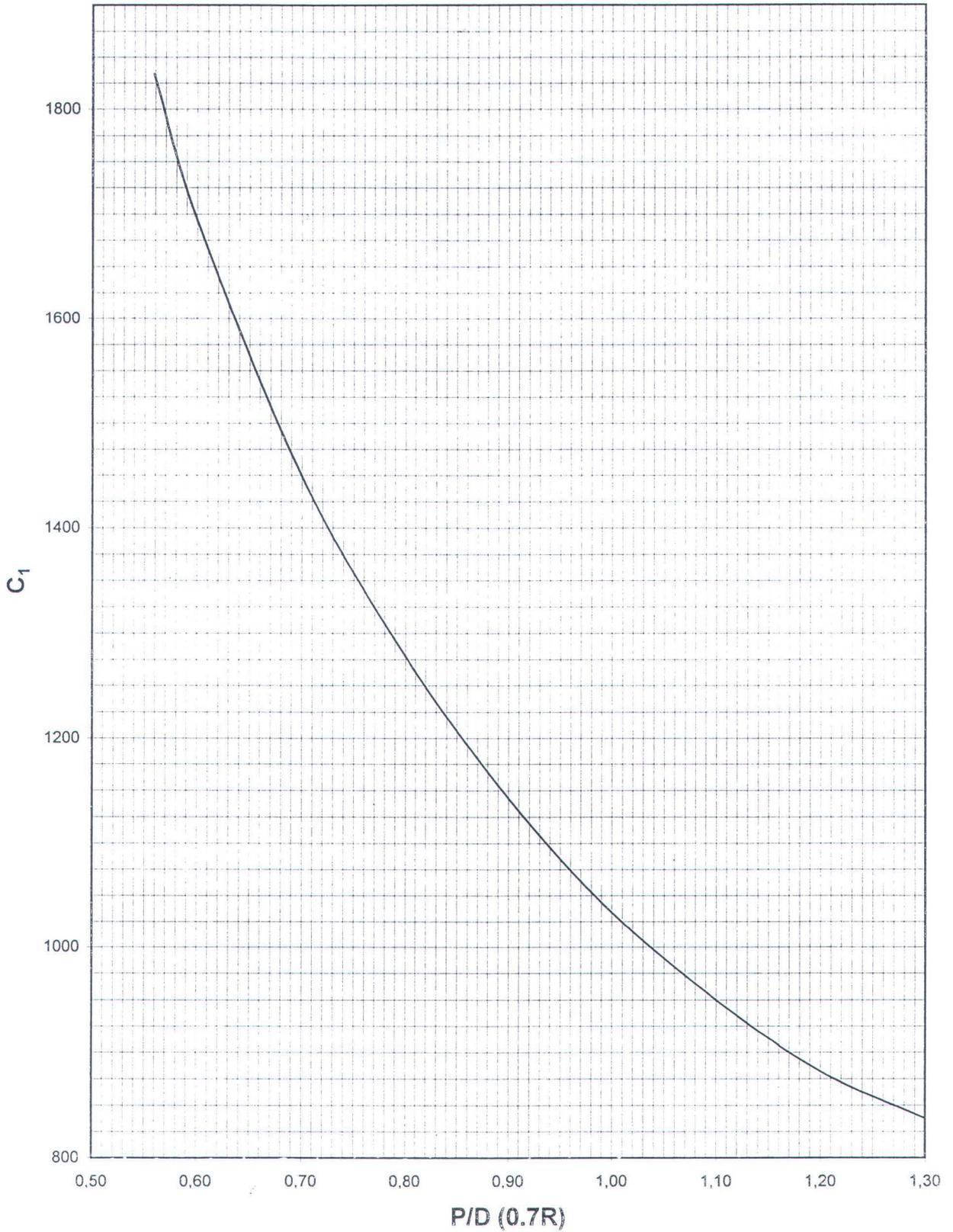
Lampiran 4

Camber Correction Coefficient (k_2)

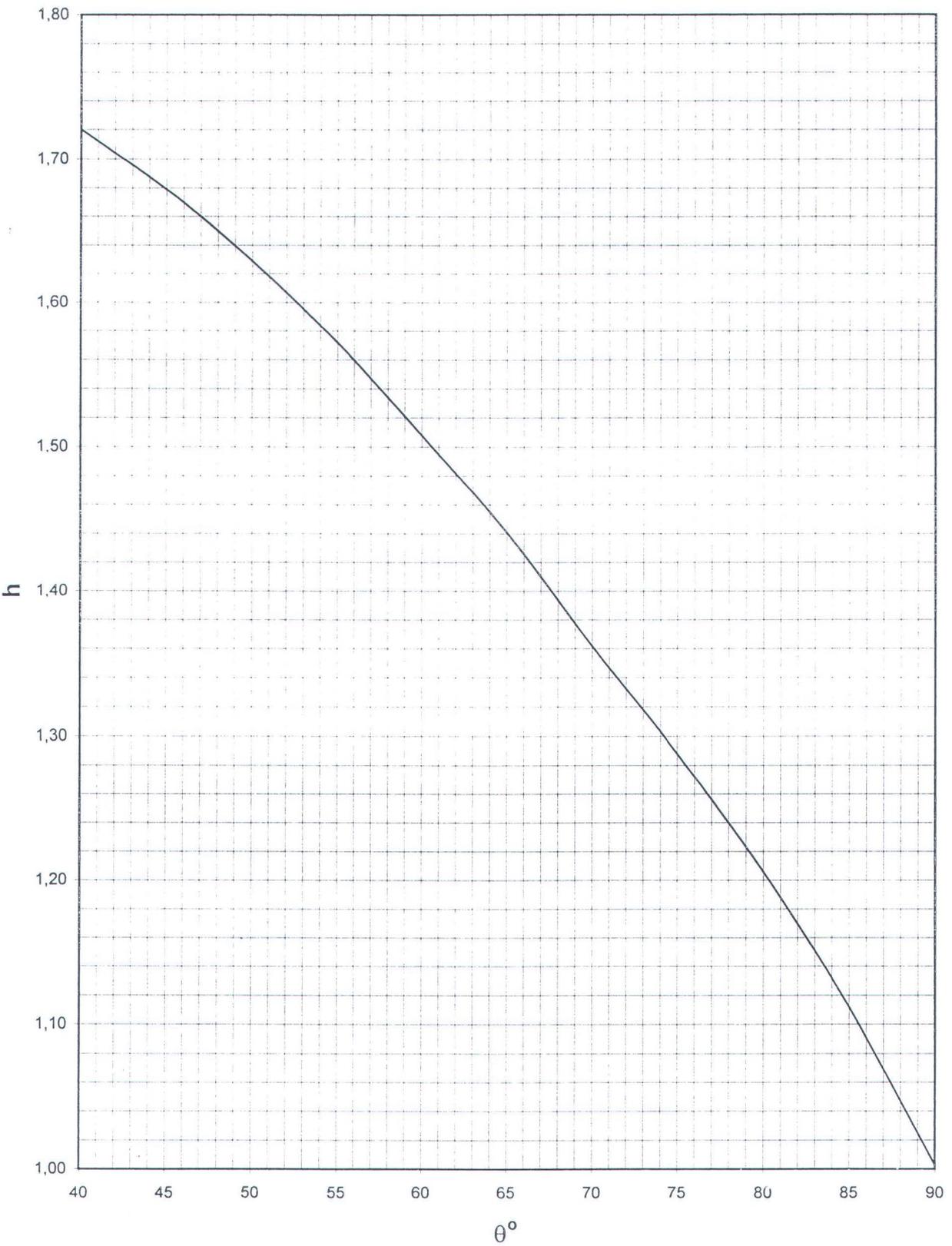


Lampiran 5

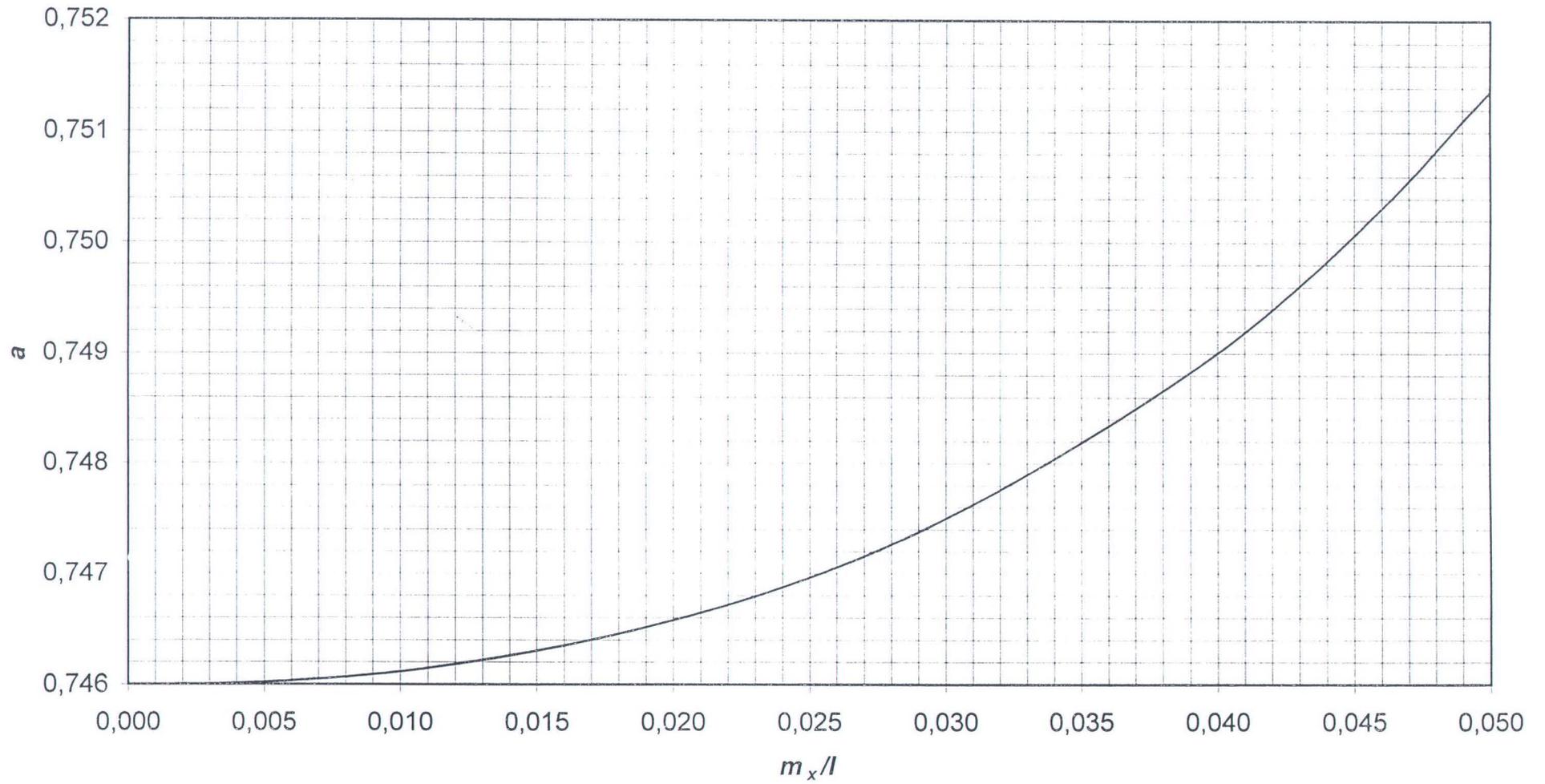
Coefficient for Estimating Blade Thickness



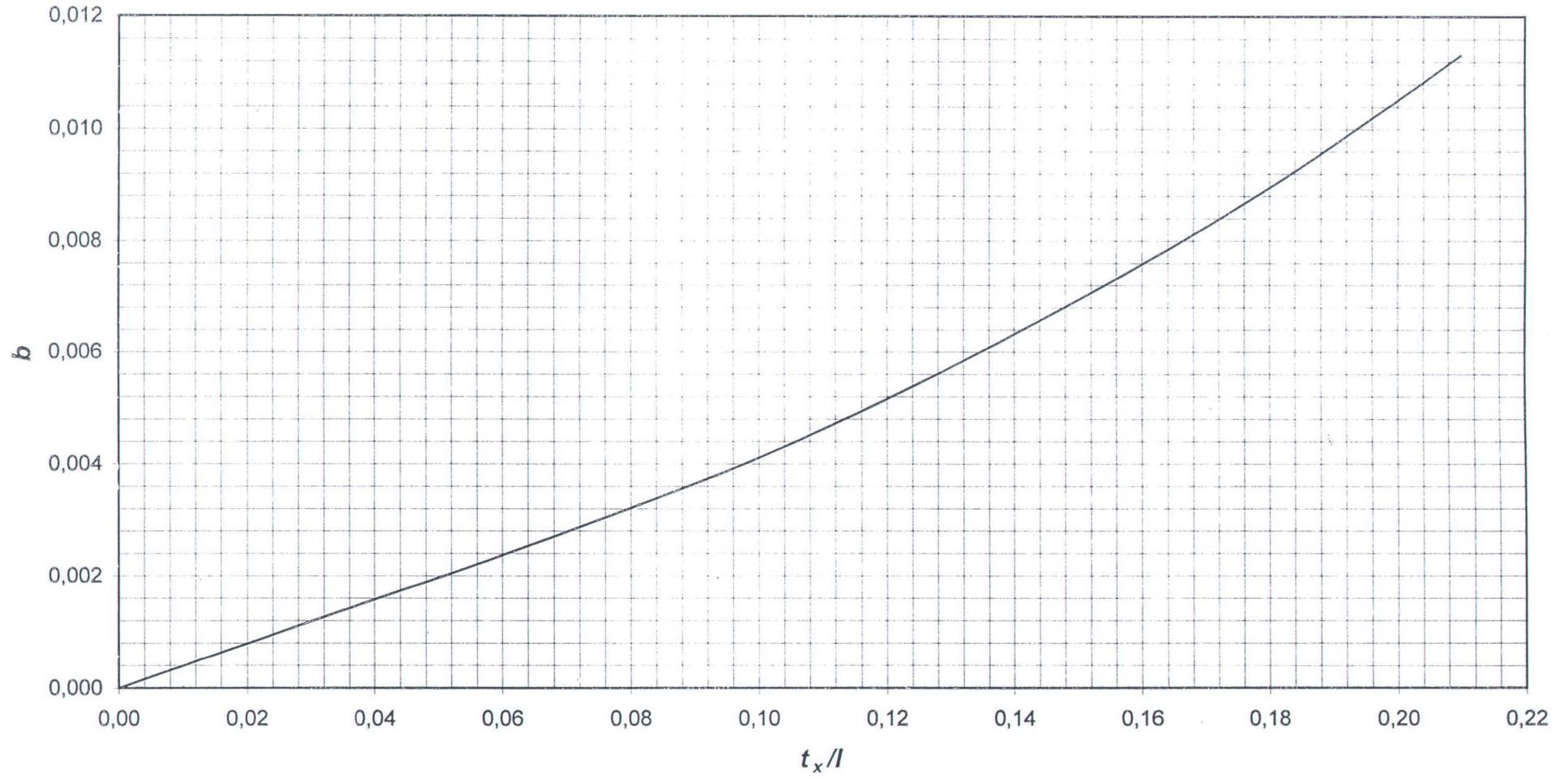
Lampiran 6
Pitch Correction Coefficient (h) For $r/R = 0.7$



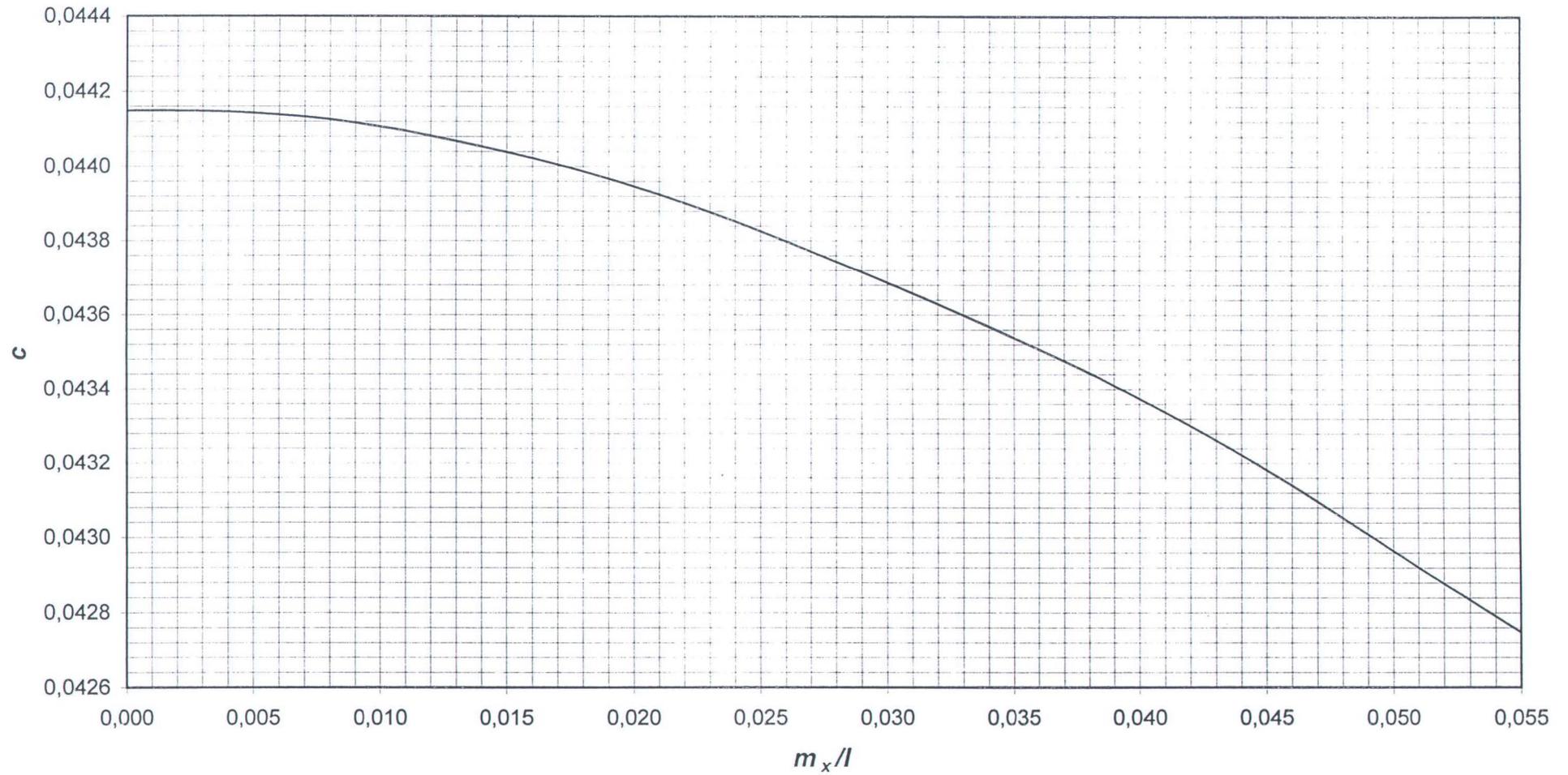
Lampiran 7
Coefficient of Blade Section Area (a)



Lampiran 7
Coefficient for I_{x_0} of Blade Section (b)



Lampiran 7
Coefficient for I_{y0} of Blade Section (c)



Lampiran 8
NACA Section & Mean Lines

x_1/l	16	66	M.L. $\alpha = 1.0$	M.L. $\alpha = 0.8$
	y/t_x	y/t_x	m/m_x	m/m_x
0,0000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
0,0125	0,10770	0,11550	0,09700	0,09100
0,0250	0,15040	0,15300	0,16900	0,15900
0,0500	0,20910	0,20950	0,28700	0,27100
0,0750	0,25270	0,25400	0,38400	0,36600
0,1000	0,28810	0,29200	0,46900	0,44800
0,2000	0,38870	0,40020	0,72200	0,69900
0,3000	0,45140	0,46370	0,88100	0,86300
0,4000	0,48790	0,49520	0,97100	0,96100
0,4500	0,49600	0,50000	0,99300	0,98800
0,5000	0,50000	0,49620	1,00000	1,00000
0,6000	0,48620	0,46530	0,97100	0,97800
0,7000	0,43910	0,40350	0,88100	0,88900
0,8000	0,34990	0,31100	0,72200	0,70300
0,9000	0,20980	0,18770	0,46900	0,35900
0,9500	0,11790	0,11430	0,28700	0,17100
1,0000	0,01000	0,03330	0,00000	0,00000

Lampiran 9

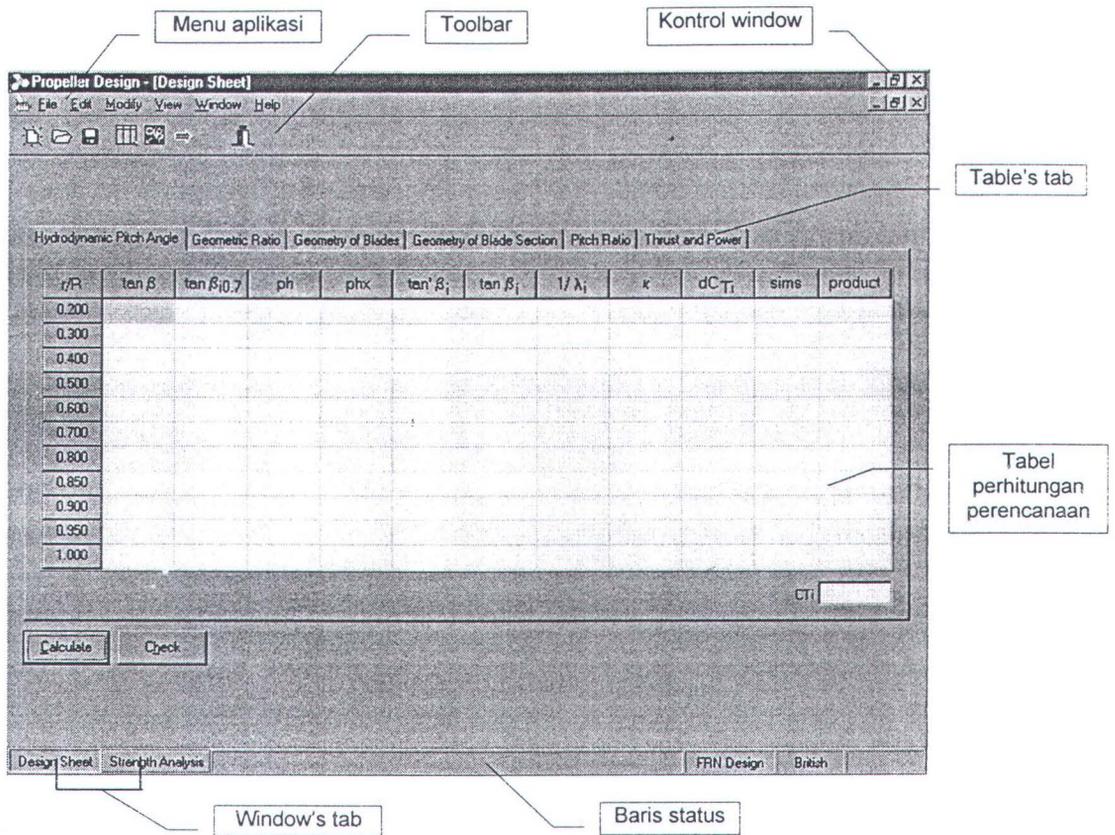
MANUAL APLIKASI

Pada bagian ini akan dibahas mengenai petunjuk penggunaan aplikasi perencanaan baling-baling kapal. Untuk menjalankan aplikasi perencanaan baling-baling kapal dilakukan dengan menekan *icon* DPROP pada layar *Desktop* atau melalui *Windows Explorer*. DPROP adalah *Executable file* dari aplikasi perencanaan baling-baling kapal yang merupakan hasil kompilasi dari seluruh program perencanaan yang disusun dengan kompiler Borland Delphi 4.0.

A. TAMPILAN UTAMA

Tampilan jendela utama dari aplikasi perencanaan baling-baling kapal dapat dilihat pada gambar 1. Bagian-bagian dari layar utama dapat dijelaskan sebagai berikut:

- Menu aplikasi, berisi perintah-perintah dalam mengelola aplikasi perencanaan baling-baling kapal.
- Kontrol *window*, berupa *icon* proses untuk mengatur layar, antara lain:
 - a.  (Restore) : untuk mengembalikan posisi dan ukuran window semula
 - b.  (Minimize) : untuk meminimalkan tampilannya (menampilkan *window* dalam bentuk *icon*).
 - c.  (Maximize) : untuk memaksimalkan tampilannya (menampilkan *window* dalam satu tampilan layar penuh)
 - d.  (Close) : untuk menutup pemakaian suatu window.



Gambar 1 : Layar utama aplikasi perencanaan baling-baling

- o Toolbar, baris perintah yang berisi tombol-tombol *icon* untuk menjalankan beberapa aplikasi, antara lain:

- a.  (New) : menginputkan data baru
- b.  (Open) : membuka data yang tersimpan
- c.  (Save) : menyimpan data
- d.  (Design Data) : menampilkan kotak dialog “Input Data”
- e.  (Design Coefficient) : menampilkan kotak dialog yang berisi informasi perhitungan koefisien-koefisien awal.

- f.  (Calculate) : melakukan proses perhitungan perencanaan baling-baling kapal.
- g.  (Exit) : keluar dari aplikasi
- o *Window's tab*, digunakan untuk pindah antar jendela “Design Sheet” (jendela untuk mengamati perhitungan perencanaan baling-baling kapal) dan “Strength Analysis” (jendela untuk mengamati analisa kekuatan daun baling-baling).
- o Baris status, memberikan informasi mengenai komponen-komponen pada aplikasi, jenis penampang yang digunakan, dan metode perencanaan baling-baling.
- o Tabel perhitungan perencanaan, memberikan informasi tahap-tahap perhitungan perencanaan baling-baling kapal dalam bentuk tabel,
- o *Table's tab*, digunakan untuk pindah antar tabel hasil perhitungan dari tahap-tahap perencanaan.

B. STRUKTUR MENU

Menu aplikasi disusun berdasarkan fungsinya, dengan pengelompokan sebagai berikut:

1. File, berisi fasilitas-fasilitas yang mendukung pengoperasian aplikasi perencanaan baling-baling kapal, yang mencakup:

- New : Perintah untuk menginputkan data baru
- Open : Perintah untuk membuka data yang tersimpan.
- Close : Menutup Data perhitungan yang diproses pada saat itu.
- Save : Menyimpan data

Save As : Menyimpan data baru

Exit : Keluar Aplikasi

2. Modify, berisi fasilitas-fasilitas untuk melakukan perubahan dari variabel-variabel dalam perencanaan baling-baling, yang mencakup:

Design data : Melakukan perubahan-perubahan terhadap input data yang diberikan.

Foil : Melakukan perubahan tipe aerofoil yang digunakan.

Mean Line : Melakukan perubahan terhadap tipe *mean line* yang digunakan.

3. View, berisi fasilitas-fasilitas untuk menampilkan informasi tentang koefisien dan bentuk geometri dari baling-baling, yang mencakup:

Design coefficient : Informasi tentang koefisien-koefisien yang diperhitungkan dalam perencanaan.

Toolbar : Mengaktifkan toolbar.

Status Line : Mengaktifkan baris status.

Chord curve : Menampilkan grafik dari panjang setiap penampang baling-baling.

Pitch curve : Menampilkan kurva *pitch*.

Expanded : Menampilkan gambar *expanded outline* dari baling-baling.

4. Window, fasilitas untuk mengatur penampilan dari program, yang mencakup:

Tile : Atur berjajar

Cascade : Atur bertumpuk

Arrange All : Atur icon

Design sheet : Menampilkan layar design sheet

Strength Analysis : Menampilkan layar strength analysis

5. About, menampilkan tentang aplikasi

Berikut ini akan dijelaskan mengenai petunjuk penggunaan aplikasi perencanaan baling-baling kapal, dengan urutan sesuai menu aplikasi.

B.1. Menu File

Menu ini berisikan fasilitas-fasilitas yang mendukung pengoperasian aplikasi perencanaan baling-baling kapal.

- o New

Digunakan untuk menginputkan data perencanaan baru, dapat dilakukan dengan cara:

1. Pilih perintah “New” pada menu “File”, maka akan tampil kotak dialog Input Data.

Free-Running Nonoptimum Propeller Design	
Number of blades [z]	5
Optimum diameter [D]	12.5 feet
Density of water [ρ]	1.988 lb/ft ³
Ship speed [Vs]	35 knots
Specific weight of water [γ]	64.4
RPM	300
Max. allowable stress [Sc]	12500 psi
Shaft horsepower [Ps]	32600
Atmospheric pressure in deep of water [pa]	33 feet
Resistance of ship [Rs]	200000 lb
Hydrostatic pressure at section in deep of water [p]	12 feet
Thrust deduction fraction [t]	0.05
Effective wake fraction [wo]	0
Type of blade section	NACA_16
Type of mean line	a=0.8

Buttons: Save... OK Cancel

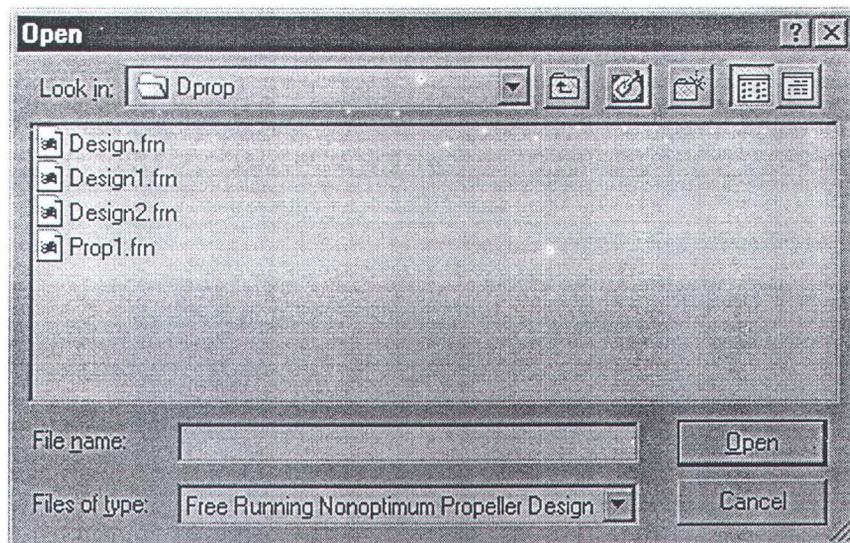
Gambar 2 : Kotak dialog input data

2. Setelah kotak dialog Input Data muncul, isikan data-data perencanaan yang diinginkan, meliputi:

- Number of blade $[z]$: jumlah daun baling-baling
- Optimum diameter : ukuran diameter baling-baling (ft)
- Density of water $[\rho]$: massa jenis air (lb/ft³)
- Specific weight of water $[\gamma]$: specific weight air.
- Max. allowable stress $[Sc]$: maksimum tegangan yang diijinkan untuk bahan yang digunakan pada daun baling-baling (psi).
- Atmospheric pressure in deep of water $[pa]$: kedalaman air diukur pada tekanan atmosfer (ft).
- Hydrostatic pressure in deep of water $[p]$: kedalaman air diukur dari poros baling-baling.
- Ship speed (v_s) : kecepatan kapal yang direncanakan (knot)
- RPM : putaran mesin setiap menit
- Shaft horsepower $[Ps]$: besarnya tenaga penggerak yang ditransmisikan pada poros baling-baling.
- Resistance of ships $[Rs]$: besarnya tahanan kapal yang direncanakan.
- Thrust deduction fraction $[t]$: besarnya koefisien *thrust deduction fraction* baling-baling.
- Effective wake fraction $[w_0]$: besarnya koefisien *effective wake fraction* baling-baling.
- Type of blade section : tipe bentuk penampang baling-baling yang digunakan.

- Type of mean line : bentuk mean line yang digunakan untuk membentuk penampang daun baling-baling.
 - 3. Setelah data-data perencanaan diisikan, dapat disimpan dengan perintah Save. Jika data tersebut belum mempunyai nama, maka akan tampil kotak dialog Save As seperti pada gambar 6.4.
 - 4. Perintah OK digunakan untuk menerima data yang diisikan sebelumnya, dan siap untuk diproses.
 - 5. Perintah Cancel digunakan untuk membatalkan pengisian data, dan kembali ke tampilan utama.
- o Open

Digunakan untuk membuka file data yang tersimpan. Perintah ini akan menampilkan kotak dialog Open File, seperti pada gambar 6.3.



Gambar 3 : Kotak dialog Open

Untuk membuka salah satu file data dapat dilakukan dengan memilih file data tersebut, atau dengan menuliskan nama file data pada bagian File name. Tipe data yang digunakan pada perencanaan ini adalah data text

yang mempunyai extension FRN. Setelah itu tekan tombol Open untuk membuka atau tombol Cancel untuk membatalkannya.

- Close

Perintah ini digunakan untuk menutup data yang aktif pada saat itu.

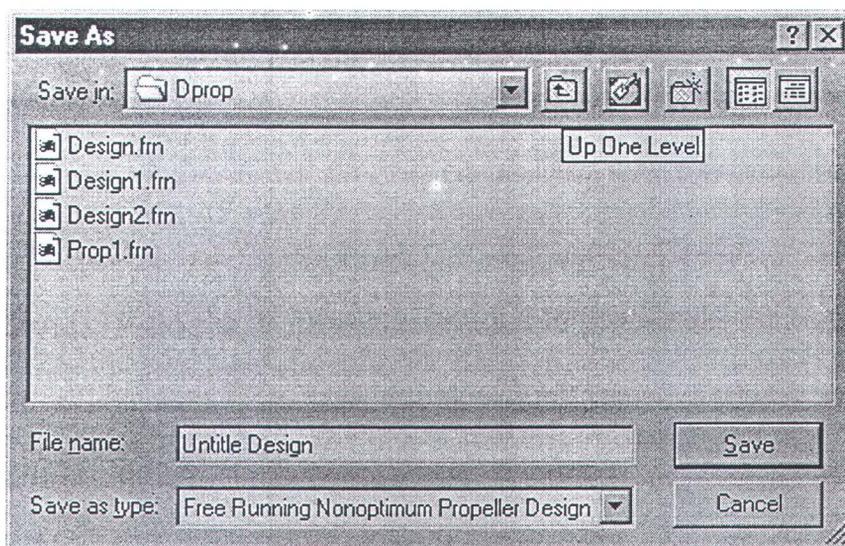
- Save

Perintah ini digunakan untuk menyimpan perubahan data yang aktif pada saat itu. Jika data belum mempunyai nama file, maka perintah ini berfungsi sama dengan perintah Save As, yang akan menampilkan kotak dialog Save As, seperti pada gambar 6.4.

- Save As...

Perintah ini digunakan untuk menyimpan data dengan nama tertentu.

Tekan perintah tersebut, maka akan tampil kotak dialog Save As, seperti pada gambar berikut:



Gambar 4 : Kotak dialog Save As

Penyimpanan dapat dilakukan dengan mengetikkan nama file pada bagian File name, dengan terlebih dahulu menentukan letak *directory* pada bagian

Save in. Proses penyimpanan dapat dilakukan dengan menekan tombol Save atau untuk membatalkannya tekan tombol Cancel.

- Exit

Digunakan untuk keluar aplikasi.

B.2. Menu Modify

Menu ini berisikan fasilitas-fasilitas dalam melakukan perubahan terhadap input data atau bentuk dari penampang daun baling-baling yang direncanakan. Perintah-perintah yang terdapat pada menu ini antara lain:

- Design Data

Melakukan perubahan terhadap input data perencanaan. Perubahan data ini dapat dilakukan dengan memilih menu “Design Data” pada menu “Modify” atau dengan cara meng-klik tombol  (Design data) pada Toolbar, dan akan tampil kotak dialog Modify input data seperti gambar 6.2. Langkah-langkah perubahan data sama dengan proses meng-inputkan data perencanaan seperti diuraikan sebelumnya.

- Foil

Perintah ini dilakukan jika hanya ingin mengadakan perubahan terhadap bentuk aerofoil yang digunakan dalam perencanaan. Bentuk aerofoil yang disediakan dalam perencanaan ini adalah NACA seri 16 dan 66. Perubahan ini dapat dilakukan dengan memilih bentuk aerofoil yang diinginkan pada bagian “Foil” di menu “Modify”.

- Mean Line

Perintah ini berfungsi sama dengan menu Foil, tetapi perubahan yang dilakukan terhadap bentuk garis rata-rata (*mean line*) dari penampang daun

baling-baling yang diinginkan. Bentuk *mean line* yang disediakan pada perencanaan ini adalah *mean line* $a = 0,8$ dan $a = 1,0$.

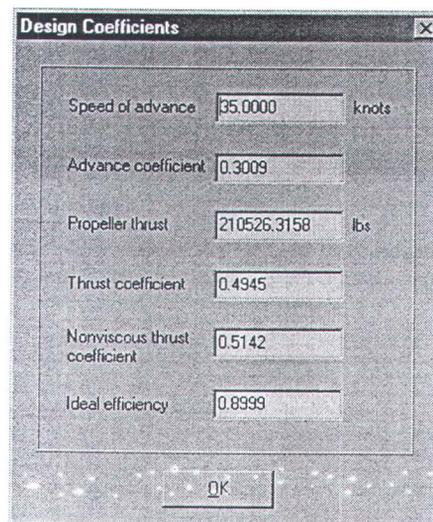
B.3. Menu View

Menu ini berisi fasilitas-fasilitas untuk menampilkan informasi tentang koefisien dan bentuk geometri dari baling-baling. Perintah-perintah dalam menu ini antara lain:

- o Design Coefficient

Memberikan informasi tentang koefisien-koefisien yang diperhitungkan dalam perencanaan. Informasi yang diberikan dapat dilihat pada gambar 5, antara lain:

- Speed of Advance (V_A)
- Advance Coefficient (λ)
- Propeller Thrust (T)
- Thrust Coefficient (C_T)
- Nonviscous Thrust Coefficient (C_{Ti})
- Ideal Efficiency (η_i)



Gambar 5 : Kotak informasi Design Coefficient

- Toolbar

Mematikan/ menghidupkan fasilitas toolbar. Fasilitas toolbar akan hidup jika menu “Toolbar” pada “View” terdapat tanda cek (✓). Untuk memmatikannya, klik menu tersebut sampai tanda cek hilang. Fasilitas-fasilitas toolbar dapat dilihat pada gambar 6.6. Fungsi dari tombol-tombol *icon* pada toolbar telah dijelaskan sebelumnya.



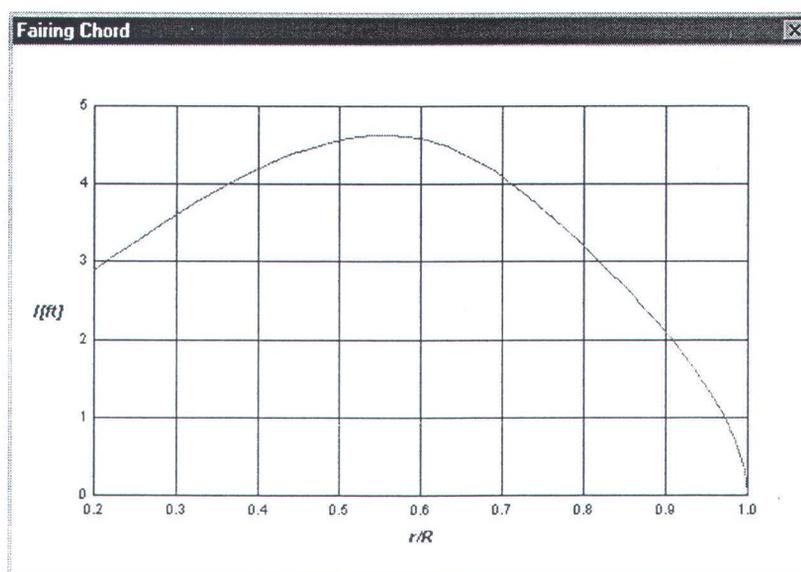
Gambar 6 : Tombol-tombol icon pada toolbar

- Status Bar

Mematikan/ menghidupkan fasilitas baris status. Bagian ini telah dijelaskan sebelumnya.

- Chord Curve

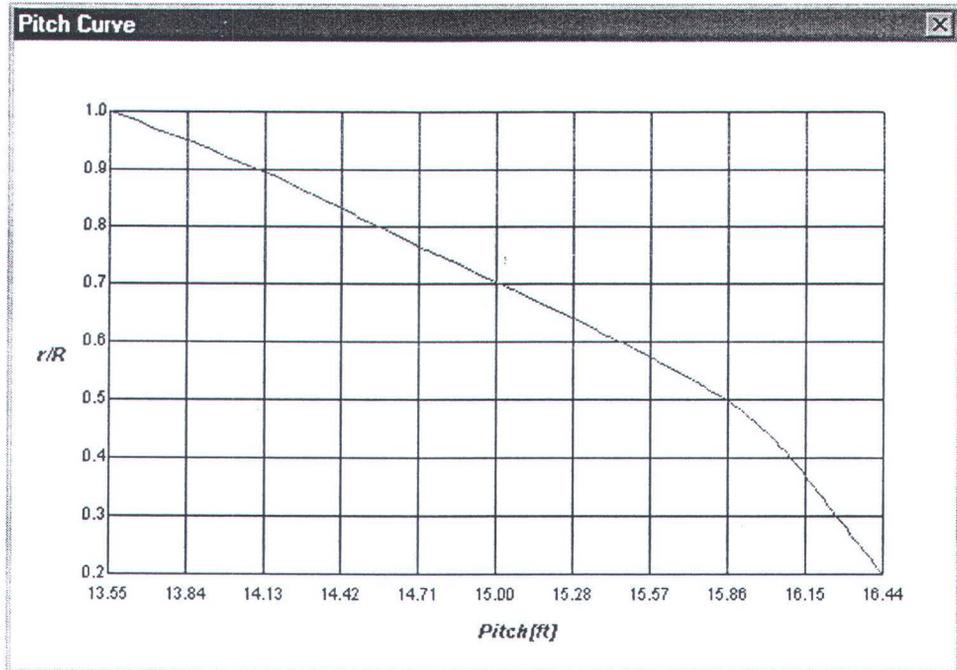
Memberikan grafik *radius fraction* (r/R) terhadap panjang setiap penampang baling-baling (*chord*). Grafik ini menunjukkan hasil *fairing* dari *chord* setelah dikoreksi dengan analisa kekuatan daun baling-baling.



Gambar 7 : Fairing chords

- Pitch Curve

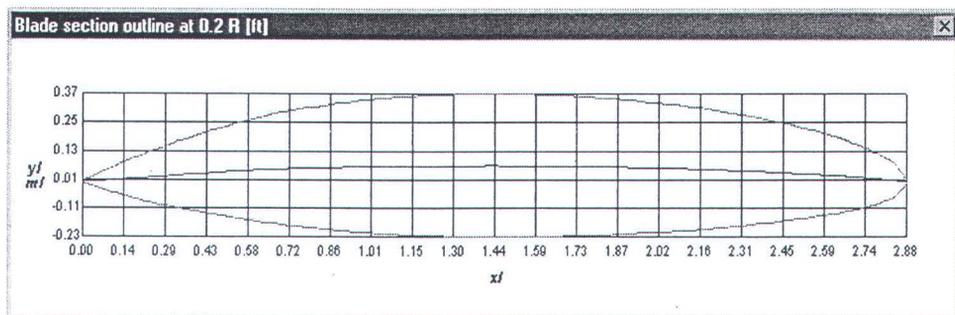
Memberikan grafik harga *pitch* setiap penampang daun baling-baling terhadap *radius fraction* (r/R). Bentuk dari grafik ini adalah:



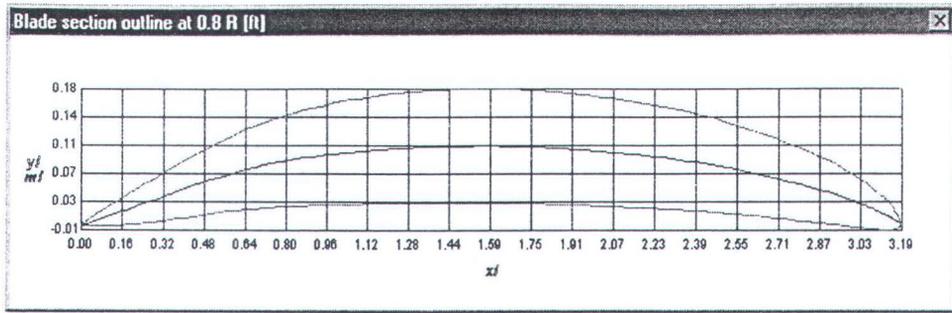
Gambar 8 : Pitch curve

- Blade Section Outline

Memberikan bentuk kurva aerofoil penampang daun baling-baling. Bentuk yang ditampilkan dalam aplikasi ini disesuaikan dengan perhitungan pada setiap *radius fraction*. Berikut ini akan ditampilkan beberapa bentuk penampang daun baling-baling.



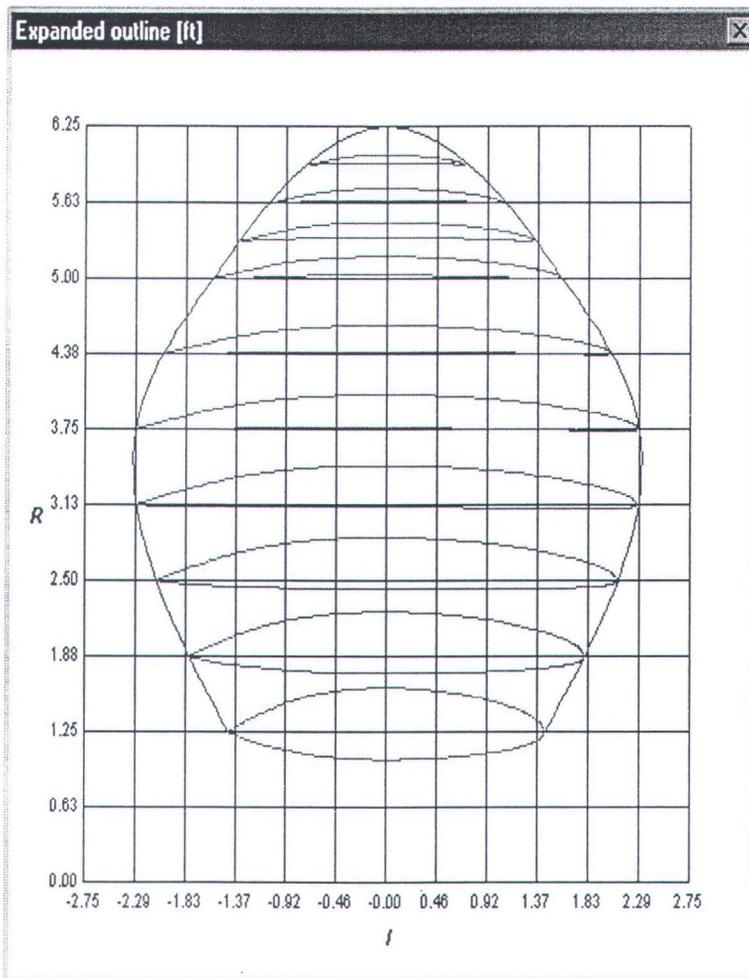
Gambar 9 : Bentuk penampang pada 0.2 R



Gambar 10 : Bentuk penampang pada 0.8 R

o Expanded Outline

Menampilkan gambar *expanded outline* dari baling-baling yang direncanakan. Bentuk baling-baling yang dipilih pada perencanaan ini adalah bentuk simetris. Sehingga bentuk *expanded* yang dihasilkan adalah:



Gambar 11 : Expanded Outline

B.4. Menu Window

Menu ini berisi fasilitas untuk mengatur penampilan program, antara lain:

- Tile (atur berjajar)

The screenshot shows the 'Propeller Design' application window. The 'Strength Analysis' sub-window is active, displaying two calculation tables side-by-side. The first table is for 'Calculation 1' and the second for 'Calculation 2'. Below them, the 'Design Sheet' window is also visible, showing a table of hydrodynamic parameters.

r/R	a	A	x_1	x_2	x_3	$y_1 = y_2$	y_3	b	b_0	c	l_{y0}
0.200	0.7465	1.5391	1.6935	-1.8106	-0.0586	-0.0553	0.3121	0.0083	0.0336	0.0440	1.0675
0.300	0.7468	1.7837	2.2974	-2.4573	-0.0800	-0.0895	0.2779	0.0045	0.0293	0.0439	2.2720
0.400	0.7468	1.9439	2.9769	-3.1838	-0.1035	-0.1115	0.2439	0.0028	0.0237	0.0439	4.1595

r/R	$\tan \beta$	$\tan \beta_{0.7}$	ph	phx	$\tan \beta_i$	$\tan \beta_j$	$1/\lambda_i$	κ	dC_{T1}	$sims$	product
0.200	1.5043	1.6717	1.0900	1.1449	1.8221	1.9752	2.5313	1.1383	0.1237	1.00	0.1237
0.300	1.0029	1.1144	1.0800	1.1344	1.2036	1.3047	2.5548	1.0339	0.3072	4.00	1.2287
0.400	0.7522	0.8358	1.0700	1.1239	0.8943	0.9695	2.5787	0.9895	0.5419	2.00	1.0838
0.500	0.6017	0.6687	1.0550	1.1081	0.7054	0.7647	2.6153	0.9653	0.7728	4.00	3.0911

Gambar 12 : Atur berjajar

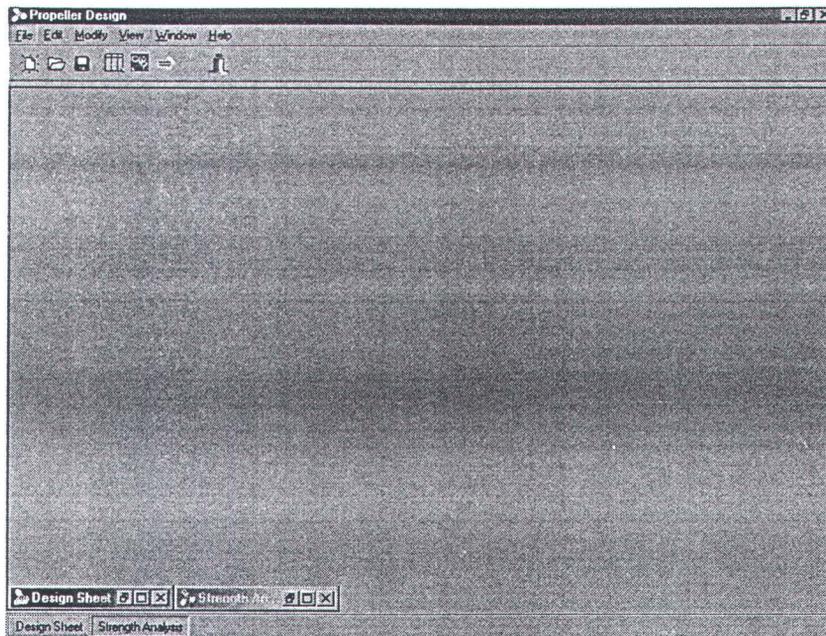
- Cascade (atur bertumpuk)

The screenshot shows the 'Propeller Design' application window. The 'Design Sheet' sub-window is active, displaying a table of hydrodynamic parameters in a cascaded view.

r/R	c_L / VD	l	c_L	σ	bx/l	mx/l	m_{xy}
0.200	0.0605	2.8821	0.2625	0.5711	0.2070	0.0178	0.
0.300	0.0809	3.6069	0.2804	0.4082	0.1412	0.0190	0.
0.400	0.0870	4.2024	0.2589	0.2895	0.1020	0.0176	0.
0.500	0.0823	4.5614	0.2254	0.2092	0.0771	0.0153	0.
0.600	0.0688	4.5821	0.1878	0.1551	0.0599	0.0128	0.
0.700	0.0526	4.0909	0.1606	0.1182	0.0527	0.0109	0.
0.800	0.0364	3.1893	0.1427	0.0923	0.0478	0.0097	0.
0.850	0.0285	2.6720	0.1333	0.0822	0.0464	0.0091	0.

Gambar 13 : Atur bertumpuk

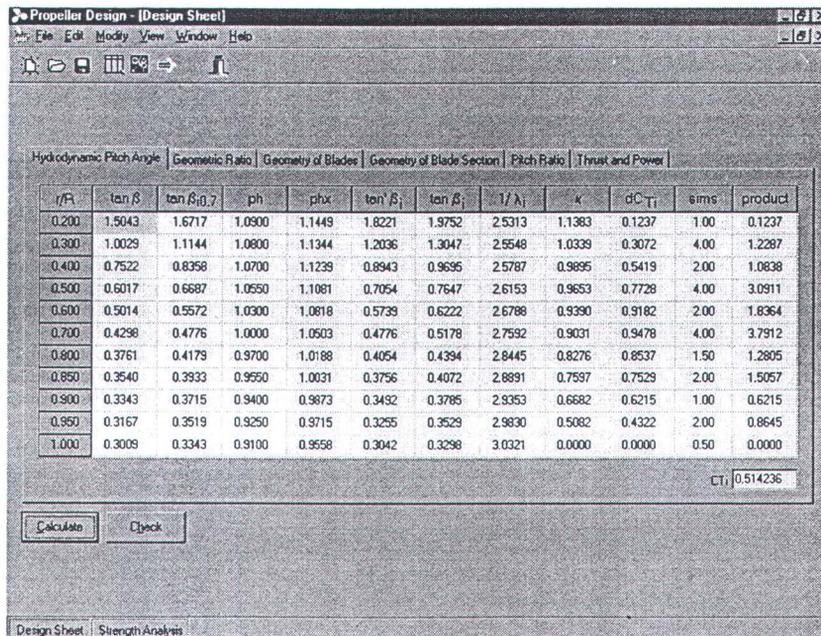
- Arrange All (atur icon)



Gambar 14 : Atur icon

- Design Sheet

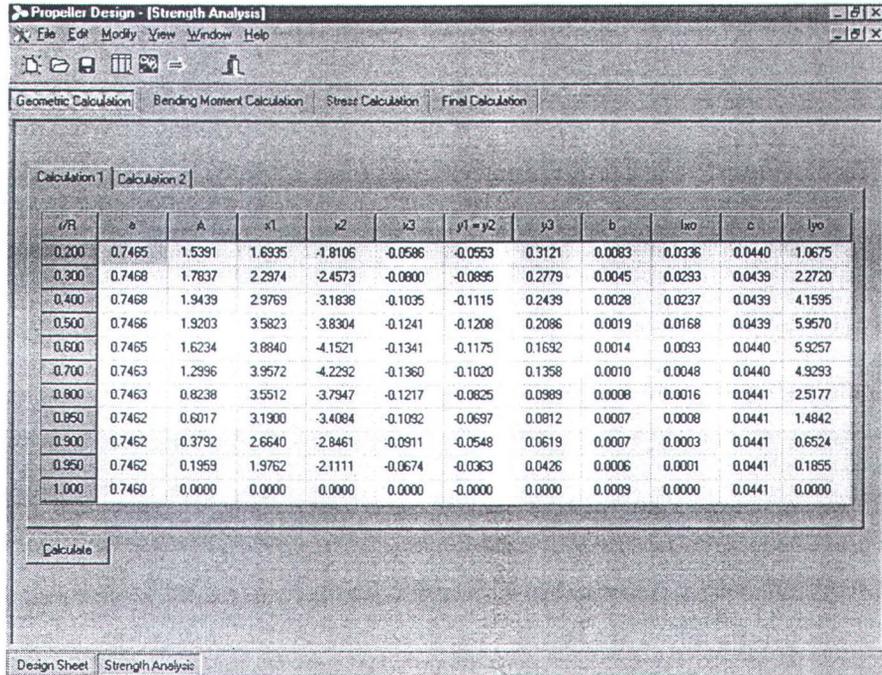
Menampilkan jendela “Design Sheet”. Tampilan dari Jendela “Design Sheet” adalah:



Gambar 15 : Design Sheet

- o Strength Analysis

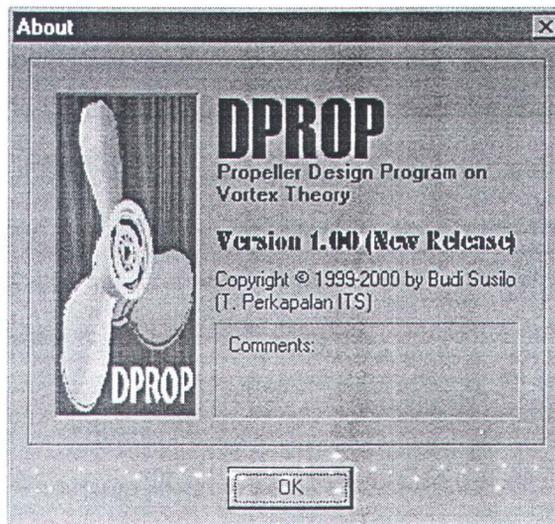
Menampilkan jendela “Strength Analysis”. Tampilan dari Jendela “Strength Analysis” adalah:



Gambar 16 : Strength Analysis

B.5. Menu About

Menampilkan tentang aplikasi. Aplikasi perencanaan baling-baling kapal ini disusun oleh Budi Susilo, Jurusan Teknik Perkapalan FTK-ITS.



Gambar 17 : Tentang Aplikasi

C. TAMPILAN HASIL PERHITUNGAN PROGRAM

Berikut ini akan dijelaskan mengenai tampilan hasil perhitungan perencanaan baling-baling kapal dan analisa kekuatan daun baling-baling. Aplikasi perencanaan baling-baling kapal dibagi dalam dua jendela perhitungan, yaitu:

1. "Design Sheet", jendela yang berisi tabel-tabel perhitungan perencanaan baling-baling kapal.
2. "Strength Analysis", jendela yang berisi tabel-tabel perhitungan analisa kekuatan daun baling-baling kapal.

C.1. Jendela "Design Sheet"

Tabel-tabel perhitungan yang terdapat pada jendela ini antara lain:

1. *Hydrodynamic pitch angle*

Tabel ini berisikan perhitungan *hydrodynamic pitch angle* (β_i) dan koreksinya terhadap besarnya *nonviscous thrust coefficient* (C_T). Pada bagian ini juga dilakukan pembacaan diagram distribusi *pitch* (ph) dan Goldstein Factor (κ).

Hydrodynamic Pitch Angle		Geometric Ratio		Geometry of Blades		Geometry of Blade Section		Pitch Ratio		Thrust and Power	
r/R	$\tan \beta$	$\tan \beta_{j0.7}$	ph	ptux	$\tan \beta_i$	$\tan \beta_{i1}$	1/λ _i	κ	dC _T	sims	product
0.200	1.5043	1.6717	1.0900	1.1449	1.8221	1.9752	2.5313	1.1383	0.1237	1.00	0.1237
0.300	1.0029	1.1144	1.0800	1.1344	1.2036	1.3047	2.5548	1.0339	0.3072	4.00	1.2287
0.400	0.7522	0.8358	1.0700	1.1239	0.8943	0.9695	2.5787	0.9695	0.5419	2.00	1.0838
0.500	0.6017	0.6687	1.0550	1.1081	0.7054	0.7647	2.6153	0.9653	0.7728	4.00	3.0911
0.600	0.5014	0.5572	1.0300	1.0818	0.5739	0.6222	2.6788	0.9390	0.9182	2.00	1.8364
0.700	0.4298	0.4776	1.0000	1.0503	0.4776	0.5178	2.7592	0.9031	0.9478	4.00	3.7912
0.800	0.3761	0.4179	0.9700	1.0188	0.4054	0.4394	2.8445	0.8276	0.8537	1.50	1.2805
0.850	0.3540	0.3933	0.9550	1.0031	0.3756	0.4072	2.8891	0.7597	0.7529	2.00	1.5057
0.900	0.3343	0.3715	0.9400	0.9873	0.3492	0.3785	2.9353	0.6682	0.6215	1.00	0.6215
0.950	0.3167	0.3519	0.9250	0.9715	0.3255	0.3529	2.9830	0.5082	0.4322	2.00	0.8645
1.000	0.3009	0.3343	0.9100	0.9558	0.3042	0.3298	3.0321	0.0000	0.0000	0.50	0.0000

Gambar 18 : Tabel *hydrodynamic pitch angle*

2. Geometric Ratio

Tabel ini berisikan perhitungan rasio *camber* (m_x/l) dan rasio ketebalan daun baling-baling (t_x/l) terhadap panjang penampang daun baling-baling (l). Di sini juga dilakukan perhitungan besarnya kavitasi (σ) setiap penampang daun baling-baling, *lift coefficient* (c_L) dan *expanded blade area ratio* (Ae/Ao).

Hydrodynamic Pitch Angle		Geometric Ratio		Geometry of Blades			Geometry of Blade Section			Pitch Ratio		Thrust and Power		
r/R	Gn	c_L/D	t_n	t_x/D	c_L/t_x	$\rho \cdot p \cdot a$	σ	m_x/l	t_x/l	c_L	l/D	$F(l/D)$	Ae/Ao	
0.200	0.0115	0.0605	0.7880	0.0477	1.2680	43.7500	0.5711	0.0147	0.1703	0.2159	0.2803	0.2803		
0.300	0.0180	0.0809	0.6650	0.0408	1.9852	43.1250	0.4082	0.0144	0.1071	0.2127	0.3804	1.5215		
0.400	0.0229	0.0870	0.5510	0.0343	2.5386	42.5000	0.2895	0.0120	0.0696	0.1766	0.4329	0.9857		
0.500	0.0252	0.0823	0.4430	0.0282	2.9218	41.8750	0.2092	0.0094	0.0475	0.1387	0.5930	2.3721		
0.600	0.0243	0.0698	0.3339	0.0220	3.1350	41.2500	0.1551	0.0073	0.0342	0.1071	0.6429	1.2858		
0.700	0.0211	0.0526	0.2511	0.0173	3.0452	40.6250	0.1182	0.0054	0.0264	0.0802	0.6549	2.6197		
0.800	0.0164	0.0364	0.1619	0.0122	2.9858	40.0000	0.0923	0.0042	0.0207	0.0619	0.5877	0.8815		
0.850	0.0136	0.0295	0.1218	0.0099	2.8738	39.6875	0.0822	0.0037	0.0188	0.0540	0.5279	1.0557		
0.900	0.0105	0.0210	0.0790	0.0075	2.8085	39.3750	0.0736	0.0032	0.0170	0.0477	0.4408	0.4408		
0.950	0.0069	0.0131	0.0389	0.0052	2.5218	39.0625	0.0662	0.0027	0.0159	0.0402	0.3270	0.6540		
1.000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0030	0.0000	38.7500	0.0597	0.0000	0.0235	0.0000	0.0000	0.0000		

Gambar 19 : Tabel Geometric Ratio

3. Geometry of Blades

Perhitungan yang dilakukan oleh tabel ini adalah koreksi *camber ratio* (m_x/l) dan penentuan geometri utama dari setiap penampang daun baling-baling, yaitu panjang (l), tebal (t_x), dan *camber* (m_x). Geometri ini juga telah dikoreksi dengan analisa kekuatan daun baling-baling.

Hydrodynamic Pitch Angle		Geometric Ratio		Geometry of Blades			Geometry of Blade Section			Pitch Ratio		Thrust and Power		
Camber Correction				Geometry of blades										
r/R	k1	k2	(m_x/l)	r/R	l	l	t_x/l	m_x/l	t_x	m_x				
0.200	0.9343	1.3500	0.0197	0.200	3.5041	2.8821	0.2070	0.0239	0.5967	0.0630				
0.300	0.9901	1.6569	0.0237	0.300	4.7547	3.6069	0.1412	0.0312	0.5094	0.1126				
0.400	0.9868	1.9381	0.0229	0.400	6.1608	4.2024	0.1020	0.0336	0.4285	0.1411				
0.500	0.9794	2.2436	0.0207	0.500	7.4127	4.5614	0.0771	0.0336	0.3519	0.1534				
0.600	0.9686	2.6412	0.0186	0.600	8.0360	4.5821	0.0599	0.0326	0.2745	0.1495				
0.700	0.9555	3.0482	0.0159	0.700	8.1864	4.0909	0.0527	0.0318	0.2157	0.1299				
0.800	0.9422	3.6133	0.0143	0.800	7.3459	3.1893	0.0478	0.0330	0.1524	0.1052				
0.850	0.9356	3.9303	0.0135	0.850	6.5983	2.6720	0.0464	0.0333	0.1239	0.0889				
0.900	0.9288	4.2229	0.0127	0.900	5.5101	2.0956	0.0446	0.0334	0.0935	0.0700				
0.950	0.9220	4.5000	0.0113	0.950	4.0873	1.3959	0.0467	0.0332	0.0651	0.0463				
1.000	0.9153	0.0000	0.0000	1.000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000				

Gambar 20 : Tabel Geometry of Blades

4. Geometry of Blade Section

Pada tabel ini ditampilkan geometri dari setiap penampang daun baling, sesuai dengan pembagian radius fraction yang digunakan dalam perhitungan. Geometri ini bergantung dari bentuk aerofoil yang digunakan dalam perencanaan.

		Hydrodynamic Pitch Angle	Geometric Ratio	Geometry of Blades			Geometry of Blade Section			Pitch Ratio	Thrust and Power	
0.2 R	TE	α	0.0000	0.1441	0.2882	0.5764	0.8646	1.1529	1.4411	1.5852	1.7293	2.0175
		β	0.0060	0.0704	0.1252	0.2088	0.2620	0.2901	0.2984	0.2960	0.2911	0.2694
		m	0.0000	0.0118	0.0248	0.0485	0.0613	0.0674	0.0690	0.0681	0.0663	0.0595
0.3 R	TE	α	0.0000	0.1803	0.3607	0.7214	1.0821	1.4428	1.8034	1.9838	2.1641	2.5248
		β	0.0051	0.0601	0.1069	0.1783	0.2237	0.2477	0.2547	0.2527	0.2486	0.2300
		m	0.0000	0.0193	0.0404	0.0792	0.1001	0.1102	0.1126	0.1113	0.1083	0.0972
0.4 R	TE	α	0.0000	0.2101	0.4202	0.8405	1.2607	1.6810	2.1012	2.3113	2.5215	2.9417
		β	0.0043	0.0505	0.0899	0.1499	0.1882	0.2083	0.2143	0.2125	0.2091	0.1934
		m	0.0000	0.0241	0.0507	0.0992	0.1255	0.1380	0.1411	0.1394	0.1356	0.1218
1.0 R	TE	α	0.0000	0.2281	0.4561	0.9123	1.3684	1.8246	2.2807	2.5088	2.7368	3.1930
		β	0.0035	0.0415	0.0738	0.1231	0.1545	0.1711	0.1760	0.1745	0.1717	0.1588

Gambar 21 : Tabel Geometry of Blade Section

5. Pitch Ratio

Pada tabel ini ditampilkan perhitungan *pitch ratio* (P/D) dan koreksinya terhadap teori gaya angkat.

		Hydrodynamic Pitch Angle	Geometric Ratio	Geometry of Blades			Geometry of Blade Section			Pitch Ratio	Thrust and Power	
r/R	β	α_1	$(P/R)^3$	α_{ms}	$G/(P/R)^3$	$F[G/(P/R)^3]$	P/D					
0.200	63.1463	0.3019	0.2134	1.00	0.0538	0.0538	1.3154					
0.300	52.5322	0.3225	0.1380	4.00	0.1306	0.5225	1.3014					
0.400	44.1126	0.2977	0.0875	2.00	0.2613	0.5225	1.2877					
0.500	37.4058	0.2592	0.0564	4.00	0.4473	1.7890	1.2684					
0.600	31.8886	0.2160	0.0401	2.00	0.6073	1.2147	1.2371					
0.700	27.3731	0.1847	0.0351	4.00	0.6027	2.4109	1.2005					
0.800	23.7228	0.1641	0.0401	1.50	0.4101	0.6152	1.1643					
0.850	22.1570	0.1533	0.0467	2.00	0.2910	0.5819	1.1462					
0.900	20.7335	0.1442	0.0564	1.00	0.1868	0.1868	1.1281					
0.950	19.4369	0.1353	0.0698	2.00	0.0991	0.1982	1.1100					
1.000	18.2531	0.0000	0.0875	0.50	0.0000	0.0000	1.0839					

Gambar 22 : Tabel Pitch Ratio

6. Thrust and Power

Tahap akhir dari perhitungan adalah melakukan cek ulang terhadap besarnya thrust (T) dan power (P) dari baling-baling kapal. Dari

kedua komponen ini dapat diketahui besarnya efisiensi (η) dari baling-baling kapal tersebut.

r/R	β_i	ϵ	dC_T	σ_{ms}	$F(C_T)$	dC_P	$F(C_P)$
0.200	63.1483	0.0305	0.1163	1.0000	0.1163	0.1650	0.1650
0.300	52.5322	0.0285	0.2957	4.0000	1.1830	0.4084	1.6335
0.400	44.1126	0.0309	0.5257	2.0000	1.0513	0.7208	1.4415
0.500	37.4058	0.0355	0.7518	4.0000	3.0072	1.0277	4.1107
0.600	31.8886	0.0426	0.8939	2.0000	1.7877	1.2173	2.4345
0.700	27.3731	0.0498	0.9234	4.0000	3.6934	1.2516	5.0065
0.800	23.7228	0.0561	0.8326	1.5000	1.2489	1.1248	1.6871
0.850	22.1570	0.0600	0.7345	2.0000	1.4689	0.9338	1.9876
0.900	20.7335	0.0638	0.6064	1.0000	0.6064	0.8223	0.8223
0.950	19.4369	0.0680	0.4219	2.0000	0.8437	0.5744	1.1488
1.000	18.2531	0.0000	0.0000	0.5000	0.0000	0.0000	0.0000

Coefficient	
Thrust Coefficient	0.5002
Power Coefficient	0.6813
Shaft horse power	31157.6632
Propeller efficiency	0.7343

Gambar 23 : Tabel *Thrust and Power*

C.2. Jendela “Strength Analysis”

Tabel-tabel perhitungan yang terdapat pada jendela ini antara lain:

1. *Geometric Calculation*

Perhitungan geometri aerofoil yang digunakan dalam perencanaan baling-baling. Ilustrasi dari geometri tersebut dapat dilihat pada gambar 3.1 (Bab III).

r/R	a	A	x1	x2	x3	y1 = y2	y3	b	lwo	c	lvo
0.200	0.7465	1.5391	1.6935	-1.8106	-0.0586	-0.0553	0.3121	0.0083	0.0336	0.0440	1.0675
0.300	0.7468	1.7837	2.2974	-2.4573	-0.0800	-0.0895	0.2779	0.0045	0.0293	0.0439	2.2720
0.400	0.7468	1.9439	2.9769	-3.1838	-0.1035	-0.1115	0.2439	0.0028	0.0237	0.0439	4.1595
0.500	0.7466	1.9203	3.5823	-3.8304	-0.1241	-0.1208	0.2086	0.0019	0.0168	0.0439	5.9570
0.600	0.7465	1.6234	3.8840	-4.1521	-0.1341	-0.1175	0.1632	0.0014	0.0093	0.0440	5.9257
0.700	0.7463	1.2996	3.9572	-4.2292	-0.1360	-0.1020	0.1358	0.0010	0.0048	0.0440	4.9293
0.800	0.7463	0.8238	3.9512	-3.7947	-0.1217	-0.0825	0.0989	0.0008	0.0016	0.0441	2.5177
0.850	0.7462	0.6017	3.1900	-3.4084	-0.1092	-0.0697	0.0812	0.0007	0.0008	0.0441	1.4842
0.900	0.7462	0.3792	2.6640	-2.8461	-0.0911	-0.0548	0.0619	0.0007	0.0003	0.0441	0.6524
0.950	0.7462	0.1959	1.9762	-2.1111	-0.0674	-0.0363	0.0426	0.0006	0.0001	0.0441	0.1855
1.000	0.7460	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-0.0000	0.0000	0.0009	0.0000	0.0441	0.0000

r/R	ϵ	$\epsilon \tan \beta_i$	$1 - \epsilon \tan \beta_i$	$\tan \beta_i + \epsilon$	$d_{c-T_1} (1 - \epsilon \tan \beta_i)$	$d_{c-T_1} (\epsilon + \tan \beta_i)$
0.200	0.0370	0.0732	0.9268	2.0123	0.1147	0.2490
0.300	0.0376	0.0491	0.9509	1.3424	0.2921	0.4123
0.400	0.0453	0.0439	0.9561	1.0148	0.5181	0.5499
0.500	0.0577	0.0441	0.9559	0.8224	0.7387	0.6355
0.600	0.0747	0.0465	0.9535	0.6969	0.8755	0.6399
0.700	0.0997	0.0516	0.9484	0.6174	0.8989	0.5852
0.800	0.1291	0.0568	0.9432	0.5686	0.8052	0.4854
0.850	0.1482	0.0604	0.9396	0.5554	0.7074	0.4182
0.900	0.1678	0.0635	0.9365	0.5463	0.5820	0.3395
0.950	0.1991	0.0702	0.9298	0.5520	0.4019	0.2386
1.000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

Gambar 24 : Geometric Calculation

2. Bending Moment Calculation

Perhitungan bending momen dari daun baling-baling. Momen-momen yang bekerja pada baling-baling dijabarkan dalam dua komponen, yaitu M_{Tb} adalah momen akibat bekerjanya gaya dorong dan M_{Qb} adalah momen akibat adanya torsi pada baling-baling.

for $x_0 = 0.2$

r/R	$x - x_0$	$\frac{(x - x_0)}{d_{c-T_1}(1 - \epsilon \tan \beta_i)}$	sim's	F(M _{Tb})	$\frac{(x - x_0)}{d_{c-T_1}(\epsilon + \tan \beta_i)}$	F(M _{Qb})
0.200	0.0000	0.0000	1.00	0.0000	0.0000	0.0000
0.300	0.1000	0.0292	4.00	0.1168	0.0412	0.1649
0.400	0.2000	0.1036	2.00	0.2072	0.1100	0.2200
0.500	0.3000	0.2216	4.00	0.8864	0.1907	0.7626
0.600	0.4000	0.3502	2.00	0.7004	0.2559	0.5119
0.700	0.5000	0.4494	4.00	1.7978	0.2926	1.1704
0.800	0.6000	0.4831	1.50	0.7247	0.2912	0.4368
0.850	0.6500	0.4598	2.00	0.9196	0.2718	0.5436
0.900	0.7000	0.4074	1.00	0.4074	0.2377	0.2377
0.950	0.7500	0.3014	2.00	0.6028	0.1789	0.3579
1.000	0.8000	0.0000	0.50	0.0000	0.0000	0.0000

M_{Tb} 112886.667 M_{Qb} 78161.9434

$x_0 = 0.2$ $x_0 = 0.4$ $x_0 = 0.6$ $x_0 = 0.8$ $x_0 = 0.9$

Gambar 25 : Bending Moment Calculation

3. Stress Calculation

Tabel perhitungan tegangan pada daun baling-baling. Pada analisa ini dicari tegangan maksimum yang bekerja pada setiap penampang daun

baling-baling. Tegangan yang diperhitungkan pada analisa ini adalah tegangan yang terjadi di lokasi tebal maksimum, *leading edge* dan *trailing edge*.

Calculation 1		Calculation 2							
r/R	$\tan \phi$	$\cos \phi$	$\sin \phi$	$M_{Tb} \cos \phi$	$M_{Qb} \sin \phi$	M_{xo}	$M_{Tb} \sin \phi$	$M_{Qb} \cos \phi$	M_{yo}
0.200	2.0740	0.4343	0.9008	49028	70405	119433	101684	33947	67737
0.400	1.0180	0.7008	0.7134	44473	29262	73735	45272	28746	16526
0.600	0.6533	0.8372	0.5469	20952	8321	29274	13688	12738	950
0.800	0.4614	0.9080	0.4190	4019	1095	5114	1854	2373	-519
0.900	0.3975	0.9293	0.3694	663	156	819	263	333	-130

r/R	$\frac{y_3 M_{xo}}{b_{xo}}$	$\frac{x_3 M_{yo}}{l_{yo}}$	Stress at X	$\frac{y_1 M_{xo}}{b_{xo}}$	$\frac{x_1 M_{yo}}{l_{yo}}$	Stress at L.E.	$\frac{y_2 M_{xo}}{b_{xo}}$	$\frac{x_2 M_{yo}}{l_{yo}}$	Stress at T.E.
0.200	1108063	-3716	-1104348	-196188	107454	88734	-196188	-114885	311073
0.400	759966	-411	-759555	-347303	11828	335475	-347303	-12650	359952
0.600	530739	-21	-530717	-368347	623	367725	-368347	-666	369013
0.800	307670	25	-307696	-256702	-732	257434	-256702	782	255920
0.900	169236	18	-169254	-149983	-531	150514	-149983	567	149416

Gambar 26 : Stress Calculation

4. Final Calculation

Bagian ini merupakan tahap akhir dari analisa kekuatan daun baling-baling, di mana geometri utama dari baling-baling telah dikoreksi. Dari tabel ini perhitungan perencanaan baling-baling dilanjutkan untuk menentukan karakteristik-karakteristik baling-baling yang direncanakan.

r/R	c_L / D	l	c_L	σ	tx/l	mx/l	mx/l [cor]
0.200	0.0605	2.8821	0.2625	0.5711	0.2070	0.0178	0.0239
0.300	0.0809	3.6069	0.2804	0.4082	0.1412	0.0190	0.0312
0.400	0.0870	4.2024	0.2589	0.2895	0.1020	0.0176	0.0336
0.500	0.0823	4.5614	0.2254	0.2092	0.0771	0.0153	0.0336
0.600	0.0688	4.5821	0.1878	0.1551	0.0599	0.0128	0.0326
0.700	0.0526	4.0909	0.1606	0.1182	0.0527	0.0109	0.0318
0.800	0.0364	3.1893	0.1427	0.0923	0.0478	0.0097	0.0330
0.850	0.0285	2.6720	0.1333	0.0822	0.0464	0.0091	0.0333
0.900	0.0210	2.0956	0.1254	0.0736	0.0446	0.0085	0.0334
0.950	0.0131	1.3959	0.1177	0.0662	0.0467	0.0080	0.0332
1.000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0597	0.0000	0.0000	0.0000

Gambar 27 : Final Calculation