

**PENGARUH LUAS DAUN KEMUDI TERHADAP HEELING MANEUVERING
KAPAL FERRY**

EFFECT OF RUDDER AREA ON HEELING MANEUVERING OF FERRY SHIP

NIDIA YUNIARSIH



**PROGRAM PASCA SARJANA
UNIVERSITAS HASANUDDIN
MAKASSAR**

2012

PENGARUH LUAS DAUN KEMUDI TERHADAP HEELING MANEUVERING

KAPAL FERRY

Tesis

Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar Magister

Program Studi

Teknik Perkapalan

Disusun dan diajukan oleh

NIDIA YUNIARSIH

Kepada

PROGRAM PASCA SARJANA

UNIVERSITAS HASANUDDIN

MAKASSAR

2012

BAB I

PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Indonesia sebagai negara kepulauan, menuntut kebutuhan sarana penyeberangan dalam jumlah besar dan keragaman bentuk / typenya untuk menghubungkan seluruh pulau yang berada di dalamnya yang memacu pertumbuhan ekonomi nasional.

Salah satu jenis angkutan penyeberangan yang banyak digunakan di negara-negara yang memiliki perairan yang diantarai oleh banyak pulau adalah kapal dari jenis ferry. Dioperasikannya kapal ini karena dipandang lebih sesuai dengan kondisi perairan serta operasionalnya, juga lebih ekonomis dan dapat mengangkut penumpang, kendaraan dan barang-barang lainnya.

Dalam pembangunan kapal ferry, sejak pendesainan awal hingga kapal selesai dibangun, sejumlah pengujian mutlak dilakukan, khususnya yang berhubungan dengan kemampuan operasi kapal. Pengujian tersebut diantaranya adalah pengujian kecepatan kapal dan pengujian kemampuan olah gerak kapal (manuver kapal).

Manuver adalah hal yang sangat penting untuk dapat memastikan kapal bisa dioperasikan dalam situasi dan kondisi yang ditentukan. Kemampuan manuver juga menjadi aspek yang sangat kritis khususnya di pelabuhan untuk menghindari tabrakan dan terjadinya kandas (Noor,

2009), sehingga manuver merupakan karakteristik penting yang harus diprediksi/diperhitungkan selama desain awal (*preliminary design*) kapal. Simulasi manuver kapal sekarang ini telah berkembang cukup baik dan sangat berguna untuk mendesain peralatan arsitektur perkapalan (Muhammad, 2007).

Kemampuan manuver kapal juga secara langsung berhubungan dengan keselamatan navigasi dan ekonomi. Pada beberapa keadaan lingkungan/perairan terbatas, kecelakaan laut bisa saja terjadi jika kemampuan manuver kapal tidak memadai. Di sisi lain, kapal dengan stabilitas dinamis yang buruk tentu saja hanya bisa mempertahankan posisinya dengan menggunakan *control device* sesering mungkin, akibatnya untuk sebuah kapal seperti ini tidak hanya pelayaran menjadi lebih lama dari yang direncanakan, tetapi juga lebih banyak energi yang dikonsumsi oleh *control device* (Zaojian,2006).

Banyak kecelakaan kapal laut disebabkan oleh kualitas manuver yang buruk, hal ini disebabkan oleh trend pembangunannya yang pada umumnya mempertimbangkan manuver bukan sebagai masalah utama, konsekuensinya, kurangnya kriteria yang diinginkan, dimana hasilnya beberapa kapal yang dibangun memiliki kualitas manuver yang rendah (Viviani et al, 2003).

Dalam menghitung/memprediksi kemampuan manuver kapal, perlu memperhatikan peraturan-peraturan yang ada, baik nasional maupun internasional. Pada tahun 2002, *International Maritime Organization* (IMO)

telah mengeluarkan *Resolution MSC.137 (76) "Standars for Ship Maneuverability"*. Standar ini untuk mengembangkan keselamatan pelayaran dan untuk memastikan keselamatan operasional kapal saat di laut.

Secara prinsip manuver kapal sangat dipengaruhi oleh perancangan badan kapal, sistem propulsi, dan sistem kemudi. Sejumlah elemen tersebut secara langsung memberi pengaruh yang signifikan terhadap gaya dan momen hidrodinamika saat kapal manuver (Maimun, 2004).

Insel (2000) menjelaskan bahwa dengan system *propeller* dan kemudi yang sesuai sangat memungkinkan kinerja kapal dapat lebih optimal, sebagaimana perbandingan sejumlah sistem *propeller* dan kemudi yang telah dianalisa olehnya, menunjukkan bahwa penggunaan *conventional propeller* dan kemudi sangat baik digunakan terhadap *directional stability* kapal dibandingkan kinerja kapal pada saat manuver, namun sebaliknya pada penggunaan system propulsi *cycloidal propeller*, system ini sangat baik digunakan pada saat kapal bermanuver.

Ketika kapal berbelok, ada gaya sentrifugal yang bekerja dan menambah tekanan hidrodinamis di sekitar lambung sehingga menimbulkan momen *rolling* kapal.. Momen ini akan membuat kapal bergerak ke arah dalam (*inward*) atau ke arah luar (*outward*) dengan jalan memutar tergantung pada pusat massa. Untuk kapal yang memiliki koefisien prismatic yang kecil, akan kurang menghasilkan gaya pengembali, akibatnya sudut *heeling* kapal lebih besar. Di sisi lain, momen

heeling yang disebabkan oleh *yaw* dan *sway* dengan kecepatan operasional yang tinggi, akan menjadi lebih besar (Maimun et al., 2004), sebagai konsekuensinya, gerak rolling kapal tidak dapat diabaikan saat manuver.

B. Rumusan Masalah

KMP Sultan Murhum NB.178, merupakan salah satu jenis kapal ferry yang saat ini sedang direparasi di PT. IKI (Industri Kapal Indonesia) Makassar. Masalah yang terjadi pada KMP. SULTAN MURHUM yaitu ketidaksesuaian antara luas daun kemudi dengan kemampuan manuver yang telah ditetapkan, sehingga pada saat kapal melakukan manuver, badan kapal akan berputar melebihi batas kelayakan dari manuver kapal itu sendiri. Dari hasil pengujian gerak melingkar (*turning circle*), menunjukkan nilai *tactical diameter* sebesar 46,5 m atau sebesar 1,5L (panjang kapal), sedangkan nilai yang direkomendasikan IMO (*International Maritime Organization*) adalah $<5L$.

Kondisi tersebut tentunya mempengaruhi *heeling* kapal saat manuver yang dapat mengganggu kestabilan kapal. Berdasarkan hal tersebut, maka permasalahan yang akan dikaji dalam penelitian ini adalah bagaimana pengaruh luas daun kemudi terhadap *heeling maneuvering* kapal.

C. Tujuan Penelitian

Adapun tujuan yang ingin dicapai melalui penelitian ini adalah mengetahui :

1. Pengaruh luas daun kemudi terhadap *heeling* manuver kapal.
2. Respon gerak oleng kapal saat manuver, khususnya saat *turning circle*.

D. Kegunaan Penelitian

Tesis ini diharapkan memberikan kegunaan antara lain :

1. Kepada institusi dan perusahaan atau pihak-pihak terkait digunakan sebagai bahan acuan dalam memprediksi kemampuan manuver kapal.
2. Untuk mahasiswa digunakan sebagai masukan dan acuan dalam menganalisis manuver kapal, khususnya berkaitan dengan *heeling* yang terjadi ketika kapal manuver.

E. Batasan Penelitian

Batasan masalah dalam penelitian ini sebagai berikut :

1. Kapal yang diteliti terbatas pada kapal Penyeberangan (Ferry) KMP Sultan Nurhum.

2. Analisis manuver kapal pada kondisi air tenang.
3. Penentuan koefisien hidrodinamik dari data bentuk lambung, kemudi dan propulsi menggunakan formula semi-empirik.
4. Persamaan gerak kapal dibatasi pada 4 derajat kebebasan yaitu *surge, sway, yaw dan roll*.
5. Tinjauan manuver kapal dibatasi pada *turning circle* dan *zig-zag* manuver.
6. Pengembangan program simulasi numerik menggunakan Matlab[®] Simulink Software

F. Defenisi dan Istilah

Adapun beberapa defenisi istilah-istilah yang terdapat dalam penelitian ini sebagai berikut:

- a. *Manuverability* adalah kemampuan gerakan kapal untuk berbelok atau berputar.
- b. *Heeling due to turning* adalah kemiringan kapal saat berputar yang diakibatkan oleh adanya dua gaya yang mempengaruhi keseimbangan kapal.
- c. *Turning Circle* adalah jalur belok kapal yang berbentuk lingkaran. Dimana jalur ini ditandai dengan adanya 4 ukuran yaitu *advance* merupakan jarak dari pelaksanaan awal ke sumbu x pada kapal ketika telah berbelok 90°, *transfer* merupakan jarak dari jalur ke awal mula

kapal ketika sumbu x pada kapal telah berbelok 90° , *tactical diameter* merupakan jarak dari jalur awal ke sumbu x pada kapal ketika kapal telah berbelok 180° .

- d. *Surge* adalah salah satu gerak translasi kapal dimana kapal mengalami perpindahan pada sumbu x (berpindah arah sumbu x), pada gerak ini tidak terjadi perubahan massa kapal dan titik *bouyancy* sehingga tidak ada gaya pengembali.
- e. *Sway* adalah salah satu gerak translasi kapal yang mengalami perpindahan pada sumbu y (berpindah ke samping), pada gerak ini titik berat kapal tidak berubah atau tetap sehingga tidak terjadi perubahan massa kapal dan titik *bouyancy* juga tidak berpindah dan tidak ada gaya pengembali.
- f. *Yaw* adalah salah satu gerak rotasi kapal yang bergerak berputar pada sumbu z sehingga jika diamati dari atas maka dapat dilihat kapal bergerak berputar.
- g. *Roll* adalah gerak oleng yang merupakan gerak rotasi kapal pada sumbu x.

G. Sistematika Penulisan

Guna memudahkan penyusunan Tesis ini serta untuk memudahkan pembaca memahami uraian dan makna secara sistematis, maka Tesis ini disusun berpedoman pada pola sebagai berikut;

- Bab I : Pendahuluan yang terdiri atas latar belakang, rumusan masalah, tujuan penelitian dan kegunaan penelitian, batasan masalah, defenisi dan istilah dan sistematika penulisan.
- Bab II : Tinjauan pustaka yang terdiri atas kemudi, kemiringan kapal, manuver kapal, standar manuver kapal, persamaan matematika, gaya dan momen yang ditimbulkan lambung, gaya dan momen yang ditimbulkan propeller dan kemudi, dan koefisien hidrodinamika.
- Bab III : Metodologi penelitian yang terdiri atas metode pengambilan data, metode analisis data, kerangka penelitian dan program simulasi.
- Bab IV : Hasil dan pembahasan yang meliputi penyajian data, analisis data dan evaluasi yang dilakukan sesuai dengan masalah yang ditetapkan serta hasil dari penelitian.
- Bab V : Bab ini menjelaskan kesimpulan dan saran dari hasil penelitian yang telah dilakukan, serta rekomendasi dan saran untuk penelitian selanjutnya.

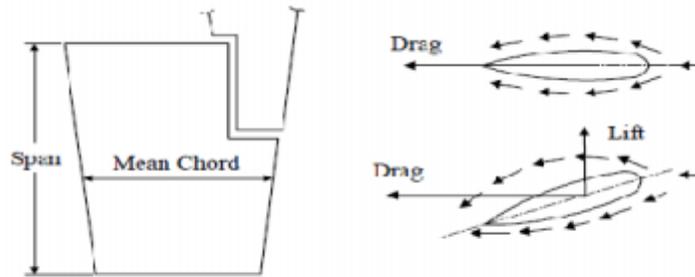
BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

H. Kemudi

Kemudi adalah alat untuk mengolah gerak dan mengemudikan kapal. Tugas terpenting kemudi adalah memberikan balance pada kapal baik dalam putaran maupun arah gerak lurus. Mesin kemudi harus mampu menggerakkan kemudi di laut tenang dengan sudut 35° *port* hingga 35° *starboard* atau sebaliknya pada kecepatan kapal sesuai rancangan (IMO, *Resolution 137(76)*, 2002).

Permukaan daun kemudi terangkat karena kekuatan kemudi yang terdiri dari dua komponen yaitu *drag* dan *lift*. *Drag* yang arahnya sepanjang *chord* kemudi sedangkan *lift* tegak lurus pada longitudinal axis. *Drag* pada kemudi sama dengan *drag* pada lambung secara keseluruhan, terkecuali tahanan gelombang. Gaya angkat (*lift*) disebabkan oleh perbedaan tekanan hidrodinamis, yang timbul akibat perbedaan kecepatan aliran pada dua sisi kemudi ketika kemudi dibelokkan, seperti terlihat pada gambar 1. Oleh karena itu *lift* hanya ada pada kemudi yang dibelokkan, karena tepat saat kemudi dibelokkan, ada momen terjadi yang ditimbulkan oleh gaya angkat kemudi. Momen inilah yang membuat kapal menyimpang/keluar dari jalur awalnya (ABS, 2006)



Gambar 1. Geometri dan gaya kemudi (ABS, 2006)

Menurut Soekarsono (1989), luas daun kemudi adalah luasan yang dibatasi oleh bagian daun kemudi atau garis luar dari daun kemudi pada bidang profil simetri. Luas daun kemudi dalam perhitungan adalah jumlah luas proyeksi pada bidang pertengahan dari sayap kemudi dan bagian *rudder post* yang aktif. Semua luas daun kemudi dan bagian poros yang terletak dimuka dari sumbu putar dinamakan luas bagian balansir.

Luas daun kemudi (AR) yang diperlukan berbeda tiap kapal. Itu tergantung dari tipe dan ukuran kapal serta kemampuan *meneuver* kapal yang diinginkan. Dalam perencanaan kapal, secara umum boleh menggunakan batasan rumus-rumus yang ada.

Berdasarkan ketentuan dari (*Biro Klasifikasi Indonesia, 2004*), diberikan formula :

$$A = C_1 \cdot C_2 \cdot C_3 \cdot C_4 \cdot \frac{1,75 \cdot L \cdot T}{100} \text{ (m}^2\text{)}.$$

Dimana :

- C_1 = Faktor untuk type kapal.
- = 1,0 umum
- = 0,9 untuk kapal curah dan kapal tangki.

	=	1,7	untuk kapal tunda.
c_2	=		Faktor untuk type daun kemudi.
	=	1,0	umum.
	=	0,9	untuk daun kemudi semi menggantung.
	=	0,7	untuk daun kemudi daya angkat tinggi.
c_3	=		Faktor profil daun kemudi.
	=	1,0	untuk daun kemudi pelat.
	=	0,8	untuk bentuk cekung dan bentuk campuran.
c_4	=		Faktor perencanaan / penempatan daun kemudi.
	=	1,0	untuk daun kemudi di dalam pancaran baling-baling.
	=	1,5	untuk daun kemudi di luar pancaran baling-baling.
L	=		Panjang kapal (m).
T	=		Sarat Kapal (m).

I. Kemiringan Kapal (Heel)

Saat kapal berbelok ada kecendrungan kapal untuk miring akibat gaya dan momen yang bekerja pada kapal. Sudut kemiringan kapal (*heel angle*) sangat penting dalam perhitungan, sudut miring kapal sampai

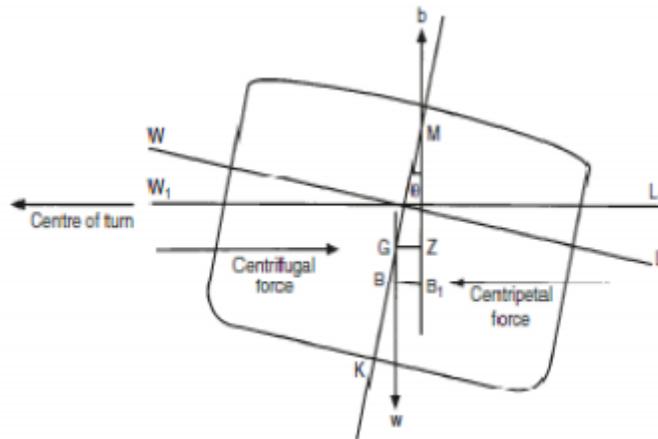
dengan 15° dapat mengakibatkan ketenggelaman atau air laut masuk ke dalam kapal.

Menurut Barras dan Derret (2006), saat kapal bergerak melingkar, ada percepatan yang arahnya ke pusat lingkaran yang besarnya v^2/r , dimana v adalah kecepatan kapal, dan r merupakan radius lingkaran putar. Oleh karena itu dibutuhkan massa yang menghasilkan percepatan yang disebut gaya sentripetal yang besarnya adalah:

$$F_{\text{sentripetal}} = \frac{Mv^2}{r} \quad (2)$$

dimana : m adalah massa kapal.

Untuk menyeimbangkan gaya sentripetal, harus ada gaya yang berlawanan yang disebut gaya sentrifugal yang bekerja pada titik berat kapal (G). Akibat dari gaya sentrifugal, kapal akan bergerak menjauh dari pusat sumbu lingkaran. Gerak tersebut akan ditahan oleh air laut yang resultannya bekerja pada titik tekan kapal (B). Karena titik berat dan titik tekan kapal tidak berada pada posisi yang sama maka akan menimbulkan momen kopel yang cenderung membuat kapal miring dan jauh dari pusat sumbu lingkaran seperti terlihat pada gambar 1.



Gambar 2. Kemiringan kapal saat berbelok (Barras dan Derret, 2006)

Persamaan momen yang ditimbulkan akibat dua gaya tersebut digambarkan sebagai berikut :

$$\text{Heeling couple} = Mv^2/r.B_1Z \quad (3)$$

Keseimbangan gaya diperoleh dari momen pengembali $W \times GZ$, dimana W adalah berat kapal yang diperoleh dari $M.g$. Maka :

$$M.g.GZ = Mv^2 . B_1Z/r \quad (4)$$

$$GZ = v^2 . B_1Z/g.r \quad (5)$$

Untuk sudut kemiringan yang kecil :

$$GZ = GM . \sin \varnothing \quad (6)$$

$$B_1Z = BG . \cos \varnothing \quad (7)$$

$$\text{Jadi, } GM . \sin \varnothing = v^2 . BG . \cos \varnothing / g.r \quad (8)$$

$$\text{Tan } \varnothing = v^2 . BG / g.r.GM \quad (9)$$

$$\varnothing = \text{arc tan } (v^2 . BG/g.r.GM) \quad (10)$$

Dimana :

V = kecepatan kapal (knot)

g = gaya gravitasi

r = radius berputar

ϕ = sudut kemiringan kapal saat berputar

J. Manuver Kapal

Maneuverability kapal adalah kemampuan kapal berbelok maupun berputar di perairan. ini penting dimiliki oleh sebuah kapal agar terhindar dari bahaya tabrakan terutama saat beroperasi di wilayah pelayaran terbatas.

Manuver kapal berhubungan langsung dengan keselamatan dan ekonomis dari suatu pelayaran. Kapal akan mudah mengalami kecelakaan bila kapal tersebut memiliki karakteristik manuver yang buruk terutama pada kondisi cuaca yang buruk atau berlayar pada perairan yang terbatas. Sebagai contoh, kapal dengan karakteristik yang buruk (kemampuan berputar yang rendah) akan mudah mengalami tabrakan dengan benda-benda yang berada di depannya atau dengan tepi perairan (Noor, 2009).

Perubahan posisi dan kecepatan kapal dalam pengoperasian kapal kerap kali terjadi, hal tersebut umumnya dikarenakan oleh sejumlah faktor diantaranya: angin, gelombang, arus dan kedalaman perairan. Dan untuk

mengembalikan kapal pada posisi semula, diperlukan sejumlah peralatan kendali / pengarah kapal diantaranya kemudi.

Kemampuan manuver kapal adalah performa hidrodinamis yang sangat penting yang berhubungan dengan keselamatan navigasi. Sebuah kapal harus memiliki kemampuan manuver yang memadai untuk memastikan keselamatan navigasi. Untuk merancang kapal dengan kemampuan manuver yang baik diperlukan standar manuver sehingga kualitas dari evaluasi manuver kapal dapat ditentukan. (Zaojian, 2006).

Sehubungan dengan hal tersebut IMO (*International Maritime Organisation*) telah mensyaratkan sejumlah kriteria standar keselamatan yang harus dipenuhi oleh sebuah kapal, diantaranya adalah *turning ability, initial turning ability, stopping ability, course-keeping and yaw cheeking ability* (IMO, *Resolution 137(76)*, 2002).

Leeuwen dan Journée (1972) menggunakan pengujian model untuk menentukan model matematis koefisien non linear untuk memprediksi jumlah standar manuver yang ditunjukkan oleh kapal *full-scale* (skala sebenarnya). Perbandingan prediksi manuver dengan data kapal *full-scale* menunjukkan hal yang baik. Bagaimanapun, ditemukan bahwa efek skala karena jumlah *Reynold number* yang kecil, seperti 0,10 memiliki pengaruh terhadap koefisien hidrodinamis yang mesti dipertimbangkan lagi dibandingkan dengan *Reynold number* yang lebih besar, seperti 0,3 atau lebih dari itu.

Manurut Handayani (2011), kemampuan manuver kapal menggunakan *Azimuth Podded* pada *turning circle test* lebih baik

dibandingkan propulsi konvensional sekitar 28%. Sebaliknya pada pengujian *zig-zag* manuver, propulsi konvensional memiliki hasil yang lebih baik dibandingkan propulsi *Azimuth Podded* sekitar 11% hanya pada *even keel condition*.

Kemampuan manuver kapal merupakan karakteristik penting yang harus diprediksi/diperhitungkan selama desain awal (*preliminary design*) kapal. Simulasi manuver kapal sekarang ini telah berkembang cukup baik dan sangat berguna untuk mendesain peralatan arsitektur perkapalan (Muhammad dan Paroka, 2007).

Subjek utama dalam desain manuver yaitu bagaimana memilih dan menentukan parameter dari bentuk lambung dan kemudi yang menghasilkan kemampuan manuver yang disyaratkan oleh kriteria manuver. Hal yang perlu diperhatikan adalah mengenai konfigurasi *stern bulb* yang sekarang menjadi gaya bentuk lambung modern (Yamada dalam Muhiddin, 2009).

Spesifikasi penting untuk manuver kapal antara lain: kapal dapat tetap berjalan lurus dalam mode otomatis atau manual dalam kondisi berbagai arus/angin kapal dapat merapat tanpa bantuan, dan sebagainya.

Setelah melakukan pengembangan program simulasi manuver domain waktu pada model *Planing hull* (kapal patroli) maka diperoleh hasil bahwa *tactical diameters* (DT) dan *advances* (AD) pada *turning circle* manuver untuk *planing hull* adalah lebih besar dari yang disyaratkan oleh IMO. Alasannya yaitu pengaruh dari kecepatan awal kapal. Sedangkan

Sudut pada manuver zig-zag 10° dan 20° adalah kurang dari persyaratan IMO. Pada hasil simulasi menunjukkan bahwa dimensi propeller dan kemudi memiliki efek signifikan terhadap manuver *turning circle* dan *zig-zag* pada *planing hull*. Pengembangan software Simulasi domain waktu dapat digunakan untuk menunjukkan pengaruh karakteristik manuver *planing hull* (Muhammad dan Paroka, 2007).

K. Standar Manuver Kapal

Standar IMO untuk manuver kapal mengidentifikasi kualitas yang signifikan untuk evaluasi karakteristik manuver kapal, yaitu :

1. *Course keeping ability.*
2. *Initial turning/course-changing ability.*
3. *Yaw checking ability.*
4. *Turning ability.*
5. *Stopping ability.*

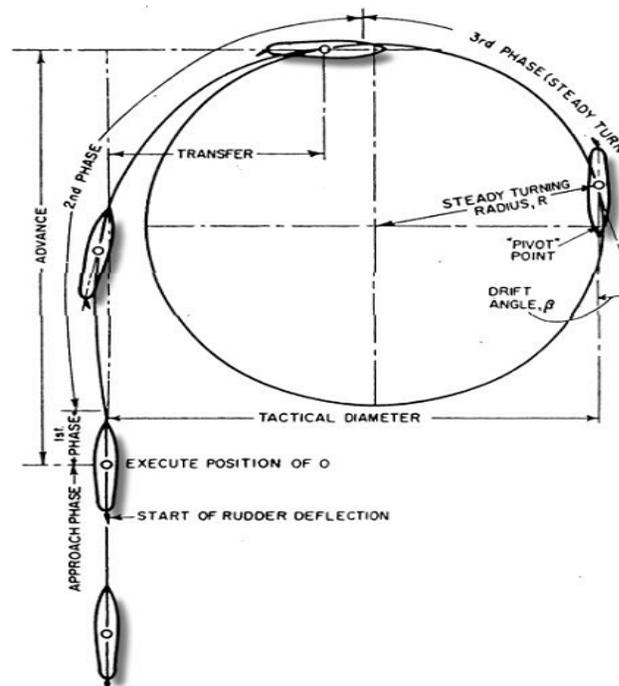
IMO telah merekomendasikan beberapa kriteria standar untuk manuver kapal. Kriteria tersebut harus dipenuhi oleh sebuah kapal saat beroperasi baik di perairan yang dalam (*deep water*) maupun di perairan terbatas atau beroperasi di sekitar pelabuhan atau di perairan yang dangkal (*restricted and shallow water*). Kriteria tersebut diantaranya: *turning ability*, *course-keeping* dan *yaw-checking ability* serta *stopping ability*.

Tabel 1. Standar manuver kapal oleh IMO (Resolusi MSC 137 (76) 2002)

Ability	Test	Criteria
Turning ability	Turning test with max. Rudder angle (35 deg.)	Advance $<4,5L$ Tactical Diameter $<5.0L$
Initial Turning Ability	10°/10° Z-test	Advance $<4,5L$ Tactical Diameter $<5.0L$
Stopping ability	Stopping test with full astern	Track reach $< 15L$
Course-keeping and yaw-checking ability	10°/10°Z-test	1st Overshoot $<10^\circ$ (L/V $<10s$) $<(5+0.5 L/V)^\circ$ (10s $<L/V<30s$) $<20^\circ$ (30s $<L/V$)
		2nd Overshoot $<25^\circ$ (L/V $<10s$) $<(17.5+0.75(L/V))^\circ$ (10s $<L/V<30s$) $<40^\circ$ (30s $<L/V$)

Standar pengujian yang diperlukan dalam manuver kapal disyaratkan dalam IMO Resolusi MSC 137 (76) (2002) antara lain:

1. *Turning circle test*, mulai dari gerak lurus dengan laju konstan, kemudi dihidupkan dengan kecepatan maksimum ke sudut δ (sudut kemudi maksimum) dan tetap pada sudut tersebut, sampai kapal telah melakukan *turning circle* paling kurang 540° . percobaan dilakukan untuk bagian *port* dan *starboard*. Informasi penting yang diperoleh dari manuver tersebut umumnya dengan menggunakan GPS yang terdiri atas (Gambar 3):



Gambar 3. *Turning circle* manuver (IMO Resolusi MSC 137 (76) 2002)

Menurut Journee dan pinkster (2002), beberapa parameter yang digunakan untuk mendefenisikan kinerja kapal pada saat berputar adalah:

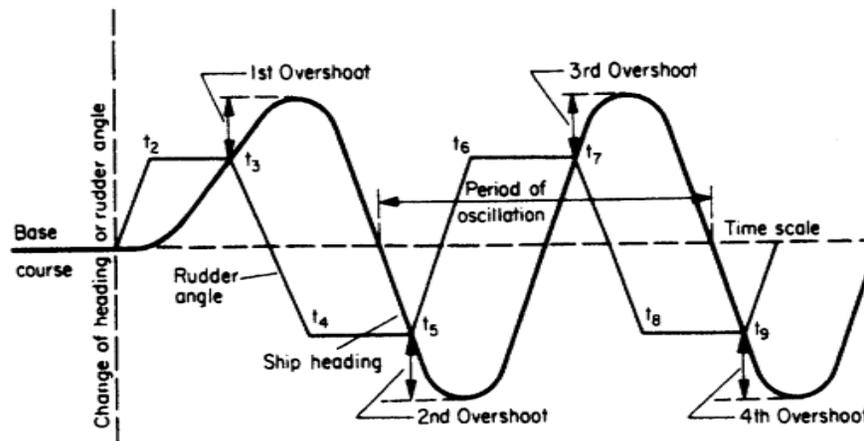
- a. *Drift angle* (sudut *drift*), adalah sudut antara haluan kapal dan arah gerakan. Sudut tersebut bervariasi sepanjang kapal.
- b. *Advance*, merupakan jarak dari pelaksanaan awal ke sumbu x pada kapal ketika telah berbelok 90° .
- c. *The transfer*, merupakan jarak dari jalur ke awal mula kapal ketika sumbu x pada kapal telah berbelok 90° .
- d. *The tactical diameter*, merupakan jarak dari jalur awal ke sumbu x pada kapal ketika kapal telah berbelok 180° .
- e. *The diameter of the steady turning circle*, diameter dari lingkaran yang terus-menerus berputar. Kondisi tetap biasanya dihubungkan pada beberapa titik antara perubahan 90° dan 180° dari perubahan pos.

Nilai-nilai khas adalah *tactical diameter* dari 4,5-7L untuk yang ramping, 2,4-4L untuk kapal pendek dan kapal yang penuh. Menentukan rasio yang ramping $L^3\sqrt{\nabla}$, dimana ∇ adalah volume displacement.

Turning circle manuver harus dilakukan pada kedua bagian sisi kapal dengan 30° atau sudut maksimum kemudi yang diperbolehkan pada tes kecepatan.

Informasi penting yang akan diperoleh dari manuver ini adalah *tactical diameter*, *advance*, dan *transfer*.

2. Zigzag manuver test.



Gambar 4. Zig-zag manuver (IMO Resolusi MSC 137 (76) 2002)

Menurut Journee dan pinkster (2002), Beberapa pengukuran penting dari *Zig-zag* manuver ini antara lain:

- Overshoot angle* adalah jumlah dari pertambahan *heading* setelah kemudi berbalik. Sudut yang besar akan membuat juru mudi mengalami kesulitan dalam memutuskan kapan akan menggunakan kemudi untuk memeriksa putaran. Sudut tersebut tidak bergantung pada panjang kapal.
- Waktu untuk membalikkan kemudi pertama dan perubahan maksimal *heading* pertama. Waktu akan proporsional terhadap panjang.
- Sudut *overshoot* yang tetap dan periode berputar sekali dalam kondisi stabil dapat tercapai.

Sebuah tes *zig-zag* harus dimulai untuk kedua bagian *starboard* dan *port* dan dengan menerapkan sudut kemudi.

Dua jenis tes *zig-zag* standar, yaitu $10^{\circ}/10^{\circ}$ dan $20^{\circ}/20^{\circ}$. Tes *zig-zag* $10^{\circ}/10^{\circ}$ menggunakan sudut kemudi 10° pada kedua sisi dengan *heading* 10° . Sedangkan tes *zig-zag* $20^{\circ}/20^{\circ}$ menggunakan sudut kemudi 20° pada *heading* 20° .

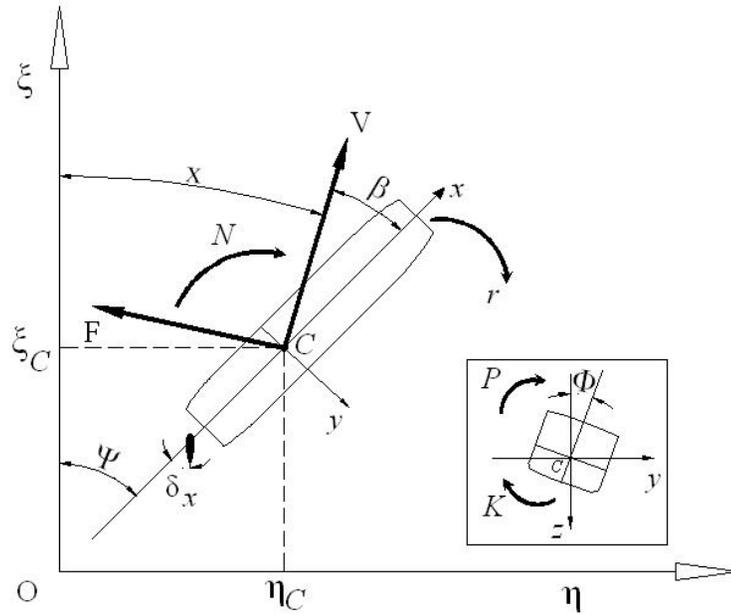
Informasi penting yang akan diperoleh dari tes ini adalah sudut *over shoot*, waktu perubahan awal ke *execute* kedua dan waktu untuk memeriksa *yaw* (Journee dan pinkster, 2002).

L. Prediksi Manuver

Sejak dikeluarkannya interim standard untuk manuver kapal oleh IMO (1930 dan final adopsi standar ini (2002), perancang kapal dihadapkan oleh kriteria manuver kapal, prosedur dan alat untuk merancang bentuk lambung yang optimal yang harus dilakukan untuk memberikan kepuasan terhadap permintaan performa propulsi kapal. Prediksi parameter performa manuver kapal seperti *advance*, *transfer*, *tactical diameter* dari *turning circle* dan *overshoots zig-zag* manuver menggunakan program simulasi, Model matematis dari manuver kapal harus dikembangkan sejalan dengan koefisien hidrodinamis (Noor,2009).

M. Model Matematis

Persamaan matematika gerak manuver kapal tersebut dapat diekspresikan sesuai sistem koordinat pada Gambar 6. di bawah ini:



Gambar 5. Sistem koordinat kapal

$$\begin{aligned}
 X &= m(\dot{u} - vr) \\
 Y &= m(\dot{v} + ur) \\
 N &= I_{zz}\dot{r} + x_G Y \\
 K &= I_{xx}\dot{p}
 \end{aligned}$$

(11)

Dimana :

X = gaya pada gerak surge

Y = gaya pada gerak *sway*

N = gaya pada gerak *yaw*

K = gaya pada gerak *roll*

m = massa kapal

I_{zz} = momen inersia pada gerak *yaw*

I_{xx} = momen inersia pada gerak *roll*

x_G = jarak dari kemudi terhadap centre of gravity (CG) pada sumbu x

Notasi dari u , v dan r adalah komponen kecepatan terhadap titik berat kapal (G), U adalah komponen resultan kecepatan kapal. selanjutnya X, Y, N dan K sebagai gaya dan momen hidrodinamika kapal. Gaya dan momen hidrodinamika tersebut dapat didefinisikan secara terpisah ke dalam berbagai fisik elemen gaya dan momen kapal sesuai dengan konsep yang dikembangkan *Model Mathematical Group* (MMG) antara lain:

$$\begin{aligned}
 X &= X_H + X_R + X_P \\
 Y &= Y_H + Y_R + Y_P \\
 N &= N_H + N_R + N_P \\
 K &= K_H + K_R + K_P
 \end{aligned}
 \tag{12}$$

Dimana, H , P dan R adalah sebagai elemen lambung (*hull*), *propeller*, dan daun kemudi.

1. Gaya dan momen yang ditimbulkan lambung

Persamaan gaya dan momen yang ditimbulkan lambung (X_H , Y_H , N_H dan K_H) pada prinsipnya adalah sebuah pendekatan dari regresi *polynomial* β dan r' . Selanjutnya koefisien dari persamaan tersebut dapat diistilahkan sebagai koefisien turunan hidrodinamika, persamaan tersebut dapat dinyatakan dengan persamaan :

$$\begin{aligned}
 X_H &= \frac{1}{2} \rho L d U^3 (X'_0 + X'_{\beta\beta} \beta^2 + (X'_{\beta} - m'_y) \beta' + X'_{rr} r'^2 + X'_{\beta\beta\beta} \beta^3) \\
 Y_H &= \frac{1}{2} \rho L d U^3 (Y'_\beta \beta + (Y'_r - m'_x) r' + Y'_{\beta\beta\beta} \beta^3 + Y'_{\beta\beta} \beta^2 r' + Y'_{\beta r} \beta r'^2 + Y'_{rrr} r'^3) \\
 N_H &= \frac{1}{2} \rho L^2 d U^2 (N'_\beta \beta + N'_r r' + N'_{\beta\beta\beta} \beta^3 + N'_{\beta\beta} \beta^2 r' + N'_{\beta r} \beta r'^2 + N'_{rrr} r'^3) \\
 K_H &= -z_H Y_H - B_{44} \dot{\phi} - C_{44} \phi
 \end{aligned} \tag{13}$$

dimana :

β : sudut belok kapal (*drift angle*)

r' : perubahan sudut putar kapal per detik (*turning rate*) tanpa dimensi

$$B_{44} : \frac{2}{\pi} \sqrt{gmGM(I_{xx} + J_{xx})}$$

$$C_{44} : gmGM$$

g : gaya gravitasi

m : massa kapal

I_{xx} : Momen inersia kapal.

J_{xx} : Momen tambahan inersia kapal

: 20% I_{xx} (Bhattacharyya, 1978).

Selanjutnya komponen β dan r' dapat diekspresikan dalam persamaan:

$$\beta = \tan^{-1}(v/u) \text{ dan } r' = r(L/U).$$

a. Gaya dan momen yang ditimbulkan propeller dan kemudi

Menurut Kijima (2003), Persamaan gaya dan momen yang ditimbulkan propeler dan kemudi kapal dapat diekspresikan berdasarkan persamaan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} X_p &= (1-t_p) \rho K_T D_p^4 n^2 \\ Y_p &= 0 \\ N_p &= 0 \\ K_p &= 0 \end{aligned} \tag{14}$$

dimana:

$$\begin{aligned} K_T(J_p) &= C_1 + C_2 J_p + C_3 J_p^2 \\ J_p &= U \cos \beta (1-w_p) / n D_p \end{aligned} \tag{15}$$

dimana:

t_p = koefisien pengurangan gaya dorong

n = putaran propeller

D_p = diameter propeller

K_T = koefisien gaya dorong propeller

w_p = koefisien fraksi arus ikut propeller efektif

J_p = koefisien angka maju

C_1, C_2, C_3 = konstanta angka maju

Selanjutnya gaya dan momen pada daun kemudi (X_R, Y_R, N_R dan K_R)

dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$X_R = -2(1-t_R)F_N \sin\delta$$

$$Y_R = -2(1+a_H)F_N \cos\delta$$

$$N_R = -(x_R + a_H x_H)F_N \cos\delta$$

$$K_R = -z_R Y_R \tag{16}$$

dimana:

δ = sudut kemiringan daun kemudi

x_R, z_R = kedudukan posisi daun kemudi ($=-L/2$)

t_p, t_R, a_H dan x_H = sejumlah koefisien gaya interaksi lambung, propeller

dan daun kemudi

Gaya yang dihasilkan daun kemudi dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$F_N = \frac{1}{2} \rho A_R f_a U_R^2 \sin \alpha_R \quad (17)$$

dimana:

A_R = luasan daun kemudi

f_a = koefisien gaya angkat daun kemudi, koefisien tersebut didefinisikan sebagai fungsi dari perbandingan *chord* dan *span* daun kemudi (Λ)

$f_a = 6,13 \Lambda / (2,25 + \Lambda)$

U_R dan α_R = kecepatan masuk aliran fluida pada daun kemudi dan sudut kemiringan daun kemudi.

Hubungan tersebut dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$U_R = \sqrt{u_R^2 + v_R^2}$$

$$\alpha_R = \delta - \tan^{-1} \left(\frac{-v_R}{u_R} \right) \quad (18)$$

Dimana:

$$u_R = \varepsilon(1-w)u \sqrt{u \left\{ 1 + k \left(\sqrt{1 + (8K_T / \pi J^2)} - 1 \right) \right\}^2 + (1-\eta)}$$

$$v_R = \gamma_R (v - r l_R)$$

ε, k, γ_R dan l_R adalah sejumlah parameter kecepatan fluida yang melewati daun kemudi. $1-w$ dan η adalah fraksi arus ikut propeller efektif dan

efisiensi efektif propeller D_p / H adalah harga perbandingan diameter propeller dan tinggi daun kemudi.

F. Koefisien Hidrodinamika

Menurut Yoshimura dan Ning Ma (2003), Adapun prediksi sejumlah koefisien turunan hidrodinamika gerak manuver kapal dilakukan berdasarkan metode semi-empirik, sebagai berikut:

X_o = tahanan kapal,

$$X'_{\beta\beta} = -0.35 + 0.8(d_{em} / B)$$

$$X'_{\beta r} - m'_y = \{-0.46 + 2.5(d_{em} / B)\} m'$$

$$X'_{rr} = 0.03 - 0.09 \tau'$$

$$X'_{\beta\beta\beta\beta} = 2.7 - 6.0(d_{em} / B)$$

dan, $d_{em} = draught + false\ keel\ depth$

$$Y'_\beta = Y'_{\beta 0} (1 + 0.6 \tau'^2)$$

$$Y'_{\beta 0} = 0.5\pi k + 1.4Cb/(L/B)$$

$$Y'_r - m'_x = (Y'_r - m'_x)_0 (0.4 + 1.8 \tau'^2)$$

$$(Y'_r - m'_x)_0 = 0.5 Cb/(L/B)$$

$$Y'_{\beta\beta\beta} = 1.2$$

$$Y'_{\beta\beta r} = -0.5 + 1.4 \tau'$$

$$Y'_{\beta rr} = 0.34 + 0.26 \tau'$$

$$Y'_{rr} = -0.04 + 0.055 \tau'$$

dimana, $\tau' = \text{trim}/d_{em}$

$$N'_{\beta} = N'_{\beta 0}(1 - 0.9 \tau')$$

$$N'_{\beta 0} = k$$

$$N'_{r} = N'_{r 0}$$

$$N'_{r 0} = -0.54k + k^2$$

$$N'_{\beta\beta} = 0.3$$

$$N'_{\beta r} = -0.33 - 0.3 \tau'$$

$$N'_{\beta rr} = 0.01 + 0.02 \tau'$$

$$N'_{rr} = -0.02 \tau'$$

$k = 2 d_{em} / L$, k (lateral aspect ratio of ship)