

KETAKSTABILAN MEMANJANG KAPAL BERSAYAP SEBELUM TINGGAL PERMUKAAN

Dany H.Priatno, Iskendar

Pusat Teknologi Industri dan Sistem Transportasi

Deputi TIRBR – BPPT

Abstract

Wing in Surface Effect (WiSE) craft or winged ship is a peripatetic transportation floating to surface by exploiting dynamic cushion because surface effect influence and form of the means wing. This craft adopted high speed planing hull for its fuselage hullform design, the lateral and longitudinal instability always occurs during planing mode operations. In this paper the study and investigate both theoretical and experimentals of longitudinal dynamic instability done, especially the porpoising phenomena of the high speed craft in the water territory. Porpoising is the effect as a self-sustained coupled motion of pitching and heaving.

Kata Kunci : WiSE craft, planing hull, dynamic instability, heaving, pitching, porpoising.

1. PENDAHULUAN

Kapal bersayap atau sering disebut dengan *wing in surface effect craft (WiSE Craft)* merupakan salah satu wahana transportasi yang sedang di kembangkan oleh negara – negara maritim di dunia karena memiliki karakteristik yang unik dan menguntungkan dari segi kecepatan dan efisiensi bahan bakarnya.

Sebagai wahana dengan kecepatan tinggi yang beroperasi di wilayah perairan, kapal bersayap dikategorikan sebagai kapal cepat (*high speed craft*). Dalam desainnya kapal ini memiliki bentuk lambung (*fuselage*) bentuk *planing* lambung tunggal (*planing monohull*), bentuk lambung seperti ini diaplikasikan karena memiliki kelebihan yaitu dapat menimbulkan gaya angkat (*planning lift*) yang cukup besar dengan gaya hambat relative kecil, gaya hambat akan semakin berkurang pada kecepatan tertentu dengan penerapan desain step hull di sekitar titik berat kapal.

Kapal cepat *monohull* memiliki karakteristik yang berbeda dibanding dengan kapal – kapal displasemen maupun *multihull*. Secara umum kapal – kapal cepat lambung tunggal ketika beroperasi pada kecepatan tinggi ($F_n > 1$) memiliki permasalahan yang sangat penting untuk diperhatikan, meski beroperasi di air tenang (jika tak ada gaya eksitasi akibat gelombang), permasalahan tersebut berupa kondisi ketakstabilan kapal secara melintang (*transverse instability*) dan ketakstabilan

secara memanjang (*longitudinal instability*). *Transverse instability* dapat menyebabkan kapal oleng secara tiba – tiba dengan sudut oleng yang cukup besar (*sudden large heel*), kehilangan control arah gerakan (*loss of course-keeping ability*), dan kondisi “*chine walking*” di mana kapal meluncur pada salah satu sisi “*chine*”nya. *Longitudinal instability* dapat menyebabkan fenomena “*porpoising*” yaitu gerakan anggukan periode pendek karena kopling gerakan heave dan pitch kapal, akibat lainnya adalah tenggelamnya daerah buritan (*bow drop*).

Dalam tulisan ini pembahasan masalah difokuskan pada ketakstabilan memanjang khususnya gejala *porpoising* saat kapal berada pada *regim planing* sebelum tinggal permukaan (*take off*).

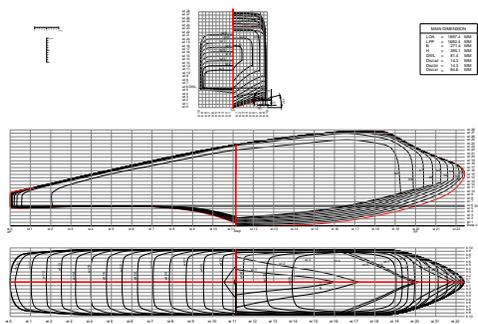
Kajian mengenai hal ini dianggap perlu karena kapal bersayap akan terbang dengan *surface effect* sebagai sarana transportasi cepat yang mengangkut manusia sehingga membutuhkan keamanan dan kenyamanan dalam perjalanannya.

2. BAHAN DAN METODE

Dalam perkembangannya, desain kapal bersayap yang dikembangkan oleh Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi (BPPT) menerapkan desain lambung kapal *planing* dengan step tinggi dan sudut β (*deadrise*) kecil pada *fuselage*-nya. Hal ini bertujuan untuk meningkatkan efisiensi lambung,

mengurangi gaya hambat total (*total resistance - Rt*) kapal dan memberikan kemudahan dalam desain konstruksi bawah kapal.

Sesuai dengan operasionalnya, kapal bersayap dikategorikan sebagai kapal cepat, dengan definisi antara lain; memiliki kecepatan operasi maksimum lebih dari 30 knots, atau mode operasi dengan *Froude Number (Fn)* lebih dari 1 (Faltinsen, 1990). Secara umum gambar rencana garis (*lines plan*) kapal bersayap *Wing in Surface Effect (WiSE) craft* BPPT untuk tipe 10-20 penumpang adalah seperti pada gambar berikut.



Gambar 1. Rencana Garis *WiSE Planing Hull Craft*

Masih dalam tahap pengembangan desain, telah dilakukan beberapa kali pengujian kapal bersayap *WiSE craft* model dengan remote control tipe ini di perairan dengan gelombang yang cukup kecil (*calm water*), dan tekanan angin yang juga relatif kecil (moderat). Dari pengamatan secara visual diperoleh hasil bahwa selama masa pra-tinggal permukaan, pada mode kecepatan tertentu pergerakan memanjang dari model memperlihatkan gerakan anggukan dengan periode pendek (*porpoising*).

Hal ini sejalan dengan data visual yang didapatkan dari hasil pengujian model dengan skala lebih kecil pada saat pengujian gaya hambat (*resistance test*) yang dilakukan di kolam pengujian hidrodinamika BPPH-BPPT, Surabaya.

Porpoising sebagai akibat instabilitas dinamik merupakan permasalahan yang sering muncul dalam desain kapal – kapal cepat dengan lambung tunggal.



Gambar 2. Pengujian Tinggal Permukaan RC model *WiSE craft*



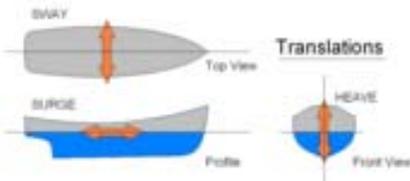
Gambar 3. Pengujian *Captive Test* model *WiSE Craft*

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

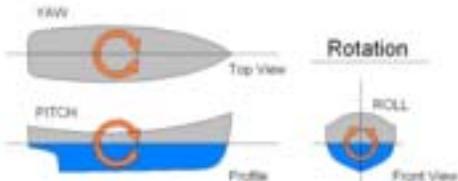
Dalam teori dinamika kapal terbagi menjadi 2 komponen tinjauan dinamika yaitu : tinjauan kemampuan olah gerak (*maneuver*) kapal di perairan tenang, dan kemampuan gerak respon kapal (*seakeeping*) di perairan tenang dan bergelombang.

Pada tinjauan gerak kapal, kapal dianggap sebagai suatu massa tunggal yang memiliki 6 derajat kebebasan (dof) yang pusat sumbu kordinat gerakan berada pada titik beratnya.

Gerakan kapal terbagi menjadi 2, pertama, gerakan secara translasional yakni gerakan naik turun (*heave*); gerakan maju mundur (*surge*) dan gerakan menyamping (*sway*); kedua, gerakan rotational adalah gerakan mengangguk (*pitch*); gerakan olengan (*roll*); dan gerakan putar kiri-kanan (*yaw*).



Gambar 4. Gerakan translasi pada kapal



Gambar 5. Gerakan rotasi pada kapal

Untuk menganalisa gerakan kapal, sebagai gerakan respon dari adanya gangguan gaya luar (gaya eksitasi) atau gelombang, gerakan kapal dapat diidentikkan dengan sistem gaya yang bekerja pada pegas (*forced damped – spring - mass system*), sedangkan persamaan matematika dapat dituliskan sebagai berikut, (Salvensen et al, 1970; Faltinsen, 1990)

$$\sum_{k=1}^6 [M_{ik} + A_{ik}] \ddot{\eta}_k + B_{ik} \dot{\eta}_k + C_{ik} \eta_k = F \cos \omega t \quad (1)$$

untuk $i=1, \dots, 6$

Di mana M_{ik} adalah koefisien massa (*rigid body*), A_{ik} adalah koefisien *added mass*, B_{ik} adalah koefisien redaman (*damping*), dan C_{ik} adalah koefisien gaya pengembali (*restoring force*), F adalah gaya eksitasi. Notasi η menunjukkan gerakan kapal.

Pada kasus kopling gerakan *heave* dan *pitch*, persamaan gerakan kapal adalah :

$$\begin{bmatrix} I_{33} & I_{35} \\ I_{53} & I_{55} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\eta}_3 \\ \ddot{\eta}_5 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{33} & B_{35} \\ B_{53} & B_{55} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\eta}_3 \\ \dot{\eta}_5 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{33} & C_{35} \\ C_{53} & C_{55} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \eta_3 \\ \eta_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_3 \\ F_5 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Di mana komponen I adalah koefisien inersia massa termasuk *added mass*, subskrip 3 dan 5 menunjukkan arah gerakan, 3 adalah gerakan *heave*, dan 5 gerakan *pitch*. Beberapa koefisien tidak selalu bernilai konstan pada gerakan kapal cepat, relatif tergantung pada gerakan *heave* dan *pitch* (Ikeda, 2000).

3.1. Instabilitas Dinamik

a. Porpoising

Porpoising didefinisikan sebagai ketakstabilan dinamik karena kopling gerakan *heave* dan *pitch* dari kapal, porpoising tergantung pada besarnya F_n dan sudut trim, dengan *deadrise* lambung tertentu.

Permasalahan *porpoising* selalu muncul dalam desain lambung kapal cepat, atau *water-based aircraft*. Perring dan Glauert dari Inggris pernah mengembangkan teori porpoising untuk mengatasi permasalahan dalam desain *seaplane*, namun belum bisa memberikan solusi yang signifikan, karena membutuhkan data – data yang berasal dari pengujian hidrodinamika. Pada tahun 1942, Sottorf, dari Jerman, menghubungkan studi yang dilakukan dengan model secara sistematis pada batasan stabilitas dari tiap – tiap model yang didesain sebagai *pontoon* dari untuk *seaplane*. Eksperimen Sottorf menunjukkan bahwa batasan terjadinya porpoising dapat diprediksi dalam hubungannya dengan parameter C_v , C_L , dan τ .

Di Amerika, Davidson, dan Locke, Benson, Parkinson juga mendapatkan hasil dari eksperimen yang mereka lakukan terhadap model *water-based aircraft* sejalan dengan eksperimen Sottorf, bahwa gejala porpoising dapat diprediksi dan berhubungan erat dengan koefisien C_v dan C_L , serta sudut trim.

Kriteria porpoising menurut Savitsky (Savitsky, 1965), sesuai dengan hasil eksperimen di Davidson Laboratory-USA, yang dilakukan pada model kapal cepat antara lain;

- Parameter yang berpengaruh adalah sudut trim (τ), *deadrise* (β), dan koefisien gaya angkat hidrodinamik ($C_{L\beta}$). Kombinasi antara τ dan $C_{L\beta}$ berhubungan dengan besarnya F_n .
- Pengurangan sudut trim kapal sangat berpengaruh untuk menghindari porpoising atau dapat menstabilkan kapal jika porpoising terjadi. Hal seperti ini dapat dilakukan dengan menggunakan pengatur trim (*trim-tabs*) atau dengan menggeser titik berat kapal (LCG) kedepan. Pada kasus kapal bersayap tindakan tersebut tidak bisa dilakukan saat operasional karena bisa mengganggu prestasi terbang dari kapal pada saat kondisi *cruising* (cenderung menambah momen *pitch* jika LCG terlalu jauh ke depan).

b. Porpoising Dinamik

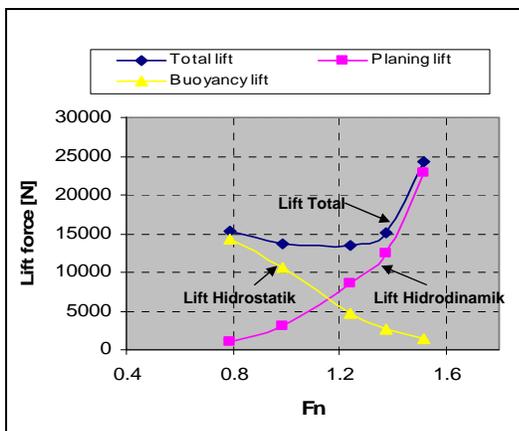
Seperti telah diuraikan sebelumnya bahwa persamaan kopling gerakan heave dan pitch seperti pada persamaan (2). Jika kondisi system adalah linear, homogen, maka pada persamaan (2) harga $F_3 = F_5 = 0$. dan solusi umum persamaan tersebut adalah, (Faltinsen, 1990)

$$\eta_j = \eta_{ja} \cdot e^{st}, j = 3,5 \quad (3)$$

dengan, $s = \alpha + i\omega$

instabilitas terjadi jika harga $\alpha > 0$, dalam hal ini untuk permukaan planing (planing surface) $\alpha = \tau$.

Dalam penentuan koefisien gaya pengembali (restoring force coefficients) kapal planing hull berbeda dengan kapal konvensional, penentuan restoring forces tidak hanya memperhitungkan gaya tekanan hidrostatik namun juga komponen gaya tekan hidrodinamik.



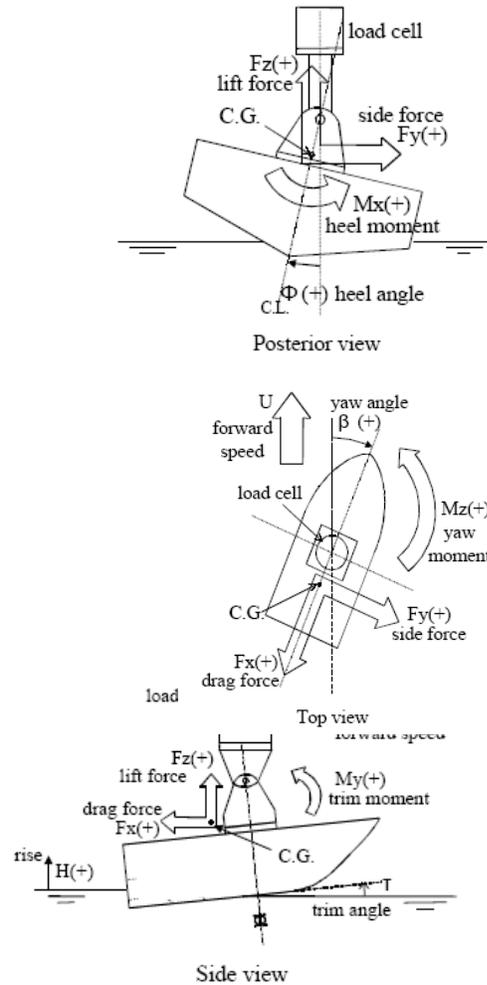
Gambar 6. Perbandingan planing lift dan buoyancy lift terhadap Fn

Pada mode planing ($Fn > 1$) komponen gaya tekan hidrodinamik sangat dominan sementara komponen gaya tekan hidrostatik berkurang secara signifikan. Seperti diperlihatkan pada grafik Gambar 6 di atas yang merupakan hasil uji model hidrodinamik.

c. Komponen Persamaan Gerak

Gaya pengembali (restoring force) merupakan salah satu parameter penting dalam teori gerakan kapal, di samping dengan experiment model (captive test) di laboratorium, skema pengujian captive test pada gambar berikut. Captive test

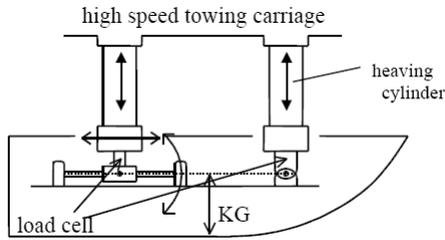
dilakukan untuk mendapatkan data tahanan kapal, gaya angkat hidrodinamik, dan momen trim.



Gambar 7. Skema captive test (Katayama, 2000)

Kalkulasi dapat dilakukan secara analitik numerik dengan strip teori, dan analitik empirical dengan formula dari Savitsky (Faltinsen, 1990).

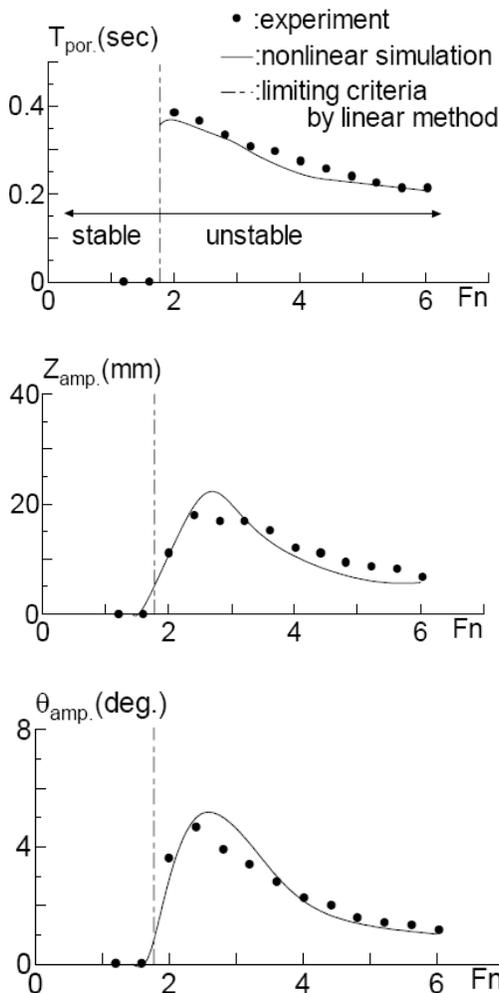
Tambahan massa (added mass) dan gaya redaman (damping) dapat diperoleh dari hasil pengujian gerakan dengan gaya luar/forced motion test (Ikeda, Katayama, 1997), dan juga dengan analitik numerik (strip teori). Forced motion test dilakukan dengan skema pengujian seperti gambar berikut.



Gambar 8. Skema forced motion test (Katayama, 2000).

3.2. Diskusi Dan Analisa

Hasil pengujian *captive test* dan *forced motion test* yang dilakukan oleh Ikeda (1997) memberikan hasil yang sejalan dengan hasil kalkulasi (non linear), contoh hasil pengujian pada gambar berikut.



Gambar 9. Perbandingan hasil eksperimen dan perhitungan pada gerakan heave dan pitch (Katayama, 2000).

Dari hasil pengujian yang telah dilakukan oleh Ikeda (1997), menunjukkan bahwa ketakstabilan memanjang terjadi pada daerah $F_n > 1\sim 2$, dan hasil tersebut menunjukkan trend yang sama antara hasil eksperimen dan perhitungan dengan persamaan gerak kopling *heave* dan *pitch*.

Selain dengan eksperimen, untuk mengkalkulasi dan prediksi stabilitas kapal berdasarkan gerakan *heave* dan *pitch*, penyelesaian terhadap persamaan gerak kopling gerakan *heave* dan *pitch* dilakukan sesuai dengan solusi umum dari persamaan gerak (2) yang telah disebutkan di atas, persamaan gerak kopling *heave* dan *pitch* dapat dituliskan sebagai berikut,

$$\begin{aligned} & \left[s^2 (M + A_{33}) + sB_{33} + C_{33} \right] \eta_{3a} + \\ & \left[s^2 A_{35} + sB_{35} + C_{35} \right] \eta_{5a} = 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \left[s^2 A_{53} + sB_{53} + C_{53} \right] \eta_{3a} + \\ & \left[s^2 (I_{55} + A_{55}) + sB_{55} + C_{55} \right] \eta_{5a} = 0 \end{aligned}$$

untuk solusi (η_{3a} η_{5a}), determinan dari koefisien harus nol, sehingga didapatkan persamaan polinomial dalam s (orde 4).

$$A' s^4 + B' s^3 + C' s^2 + D' s + E' = 0$$

di mana koefisien dari polinomial didapatkan dari determinan pada sistem persamaan aljabar dalam (η_{3a} η_{5a}) diatas.

Sistem pada kondisi stabil jika akar – akar riil dari persamaan tersebut bernilai negatif. Kondisi untuk bagian riil negatif seperti diberikan oleh kriteria Routh-Hurwitz (Faltinsen, 1990) berikut,

$$\begin{aligned} & \frac{B'}{A'} > 0, \frac{D'}{A'} > 0, \frac{E'}{A'} > 0, \\ & \frac{B' C' D' - A' D'^2 - B^2 E'}{A'} > 0 \end{aligned}$$

Pada persamaan tersebut terlihat bahwa porpoising merupakan efek dari variasi parameter stabilitas suatu kapal. Demikian juga efek dari posisi titik berat kapal. Untuk itu parameter terhadap timbulnya porpoising dapat di tentukan atau dapat dikontrol.

4. KESIMPULAN

Pada desain kapal bersayap yang merupakan salah satu tipe kapal cepat, masalah ketakstabilan dinamik memanjang sangat penting untuk dipertimbangkan, terutama terhadap parameter – parameter yang bisa mempengaruhi ketakstabilan ini.

Koefisien lambung kapal cepat yang berpengaruh terhadap ketakstabilan dinamik memanjang adalah sudut trim (τ), *deadrise* (β), dan koefisien gaya angkat hidrodinamik ($C_{L\beta}$).

Porpoising terjadi pada $F_n > 1$, dan akan berpengaruh pada tahanan total kapal, yaitu cenderung menambah tahanan.

Untuk menghindari atau mengurangi efek porpoising secara umum yaitu pengaturan posisi titik berat (LCG) kapal dan pada kecepatan kapal.

Eksperimen pada model perlu dilakukan untuk mendapatkan komponen persamaan gerak kapal sebagai validasi terhadap hasil perhitungan yang telah dilakukan.

DAFTAR PUSTAKA

- Bhattacharyya, R., *"Dynamics of Marine Vehicles"*, John Wiley & Sons, New York, USA, 1972.
- Clayton, B.R., and Bishop, R.E.D., *"Mechanics of Marine Vehicles"*, E. & F. N. Spon Ltd, London, England, 1982.
- Faltinsen, O.M., and Sun, H., *"The Influence of Gravity on the Performance of Planing Vessels in Calm Water"*, CESOS, NTNU, Norway, 1990.
- Ikeda, Y., Katayama, T. & Tajima, S. *"A Prediction Method of Vertical Lift Component of the Roll and Heave Damping"*, Journal of Kansai Society of Naval Architects, No.229, Japan, 1998, 105-110.
- Ikeda, Y & Katayama, T. *"Porpoising Oscillations of Very-High-Speed Marine Craft"*, Journal of Royal Society of London, Series A, Vol. 358 No.1771, pp.1905-1915, London, 2000.
- Katayama, T. & Ikeda, Y. *"A Study on Coupled Pitch and Heave Porpoising Instability of Planing Craft (1st Report)"*, Journal of Kansai Society of Naval Architect, No.226, Japan, 1996, 127-134.
- Katayama, T. & Ikeda, Y. *"A Study on Coupled Pitch and Heave Porpoising Instability of Planing Craft (2nd Report)"*, Journal of Kansai Society of Naval Architect, No.227, Japan, 1997, 71-78.
- Katayama, T. & Ikeda, Y. *"A Study on Coupled Pitch and Heave Porpoising Instability of Planing Craft (3rd Report)"*, Journal of Kansai Society of Naval Architect, No.228, Japan, 1997, 149-156.
- Lewandowski, E.M., *"The Dynamics of Marine Craft"*, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., Singapore, 2004.
- Lewis, E., V., *"Principles of Naval Architecture"*, Volume III, SNAME, Jersey City, 1989.
- Savitsky, D. *"Hydrodynamic Design of Planing Hulls"*, Marine Technology, 1, 1, 1964, 71-95.
- Savitsky, D., and Brown, P. Ward *"Procedures for Hydrodynamic Evaluation of Planing Hulls in Smooth and Rough Water"*, Marine Technology, 13, 4, 1976, 381-400.
- Sottorf, W., *"Experiments with planning surfaces"*, NACA TM 661, 1932.
- Sottorf, W., *"Experiments with planning surfaces"*, NACA TM 739, 1934.
- Perez, T., Fossen, T., and Sorensen, A., *"A Discussion About Seakeeping and Manoeuvring Models For Surface Vessels"*, Technical Report, CESOS, Norwegian University of Science and Technology NTNU, Norway, 2004.