

# RAMALAN GERAK MANUVER KAPAL PENYELIDIKAN "DISCOVERY" DI PERAIRAN TENANG

Fitriadhy A.<sup>1\*</sup>, Wan Nik W.B.<sup>1</sup>, Anuar A.B.<sup>1</sup> and Shamsul A.A.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universiti Malaysia Terengganu, 21030 Kuala Terengganu, Malaysia

\*Email:a.fitriadhy@umt.edu.my

## ABSTRAK

Makalah ini membentangkan sebuah analisis yang tidak linear daripada perilaku gerak manuver kapal penyelidikan "Discovery" di perairan tenang. Kajian ini menyediakan maklumat yang sangat berharga pada peringkat awal reka bentuk kapal untuk memastikan operasi yang selamat. Dua model penyelakuan; gerak manuver dan gerak zig-zag kapal tersebut adalah dibahas secara menyeluruh. Secara umum, prestasi gerak manuver kapal penyelidikan "Discovery" boleh diterima, dimana ianya mematuhi piawaian gerak manuver yang ditetapkan oleh *International Maritime Organization* (IMO) terutamanya pada sudut kemudi 25° dan 35°.

**Kata kunci:** Gerak manuver, sudut kemudi kapal, diameter maju, diameter taktikal, gerak zig-zag

## 1. PENDAHULUAN

Universiti Malaysia Terengganu (UMT) adalah salah satu Institut Pengajian Tinggi Awam (IPTA) di Malaysia yang diperakui khusus untuk menjalankan kajian atau penyelidikan di bidang maritim. Untuk mencapai skop dan matlamat penyelidikan ini, UMT telah dilengkapi dengan sebuah infrastruk-



Gambarajah 1: Majlis Pelancaran Kapal Penyelidikan "Discovery" di Kuala Terengganu

tur penyelidikan yang khusus iaitu sebuah kapal penyelidikan "Discovery" yang kemudiannya disingkat dengan nama RVD (sila lihat Gambarajah 1). Biasanya, kapal ini dioperasikan bagi para pelajar, pemsyarah dan penyelidik UMT sama ada untuk menjalankan kursus praktikal yang berkaitan atau

aktiviti cari gali di Laut Cina Selatan. Disebabkan kerana adanya sifat tuntutan kerja serta senantiasanya memastikan operasi yang selamat dengan mengelakkan pelanggaran dengan kapal lain atau menghindari berlakunya kapal terbalik/ karam khususnya semasa manuver, oleh itu penyelidikan ke atas kemampuan gerak manuver daripada RVD adalah diperlukan.

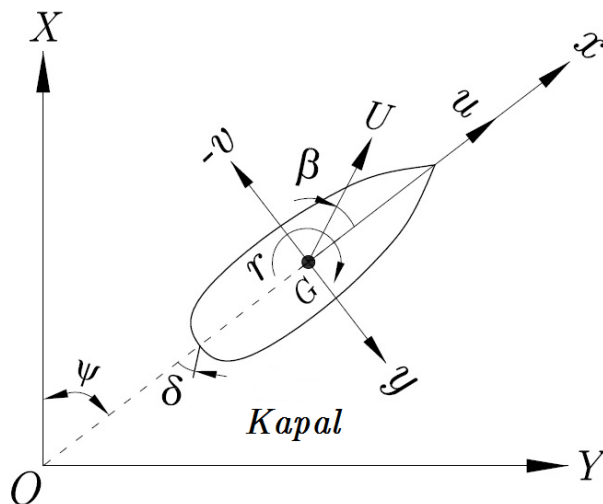
Beberapa kajian saintifik untuk meramalkan prestasi gerak manuver kapal telahpun dilakukan oleh para penyelidik sebelum ini baik melalui kajian program simulasi berangka atau model uji kaji sama ada di tanki percubaan atau di laut. Dengan melakukan pendekatan kaedah program berangka, [1] dan [2] telah meramalkan karakteristik gerak manuver kapal dalam keadaan stabil. Sementara itu, [3] telah mengesahkan analisis berangka dalam meramalkan prestasi gerak manuver kapal di perairan tenang melalui pendekatan uji kaji di makmal. Walaubagaimanapun, dengan peningkatan dalam keupayaan komputer yang boleh menjimatkan masa dan jauh lebih murah dalam meramalkan prestasi gerak manuver kapal terutama di peringkat awal reka bentuk kapal. Oleh kerana itu, kajian melalui program berangka adalah disyorkan, dimana ianya boleh dan sangat mungkin memperoleh sebuah kajian yang munasabah sebagaimana dibandingkan dengan kajian-kajian melalui uji kaji model.

Di dalam makalah ini, upaya meramalkan prestasi gerak manuver RVD di perairan tenang dilakukan melalui pendekatan kaedah program berangka dengan domain waktu. Analisis gerak ini dijalankan dalam tiga darjah kebebasan gerak satah mengufuk iaitu gerak *surge*, *sway* dan *yaw*. Kesan sudut kemudi ( $\delta$ ) yang berbeza-beza terhadap prestasi gerak manuver RVD telah diambil kira.

## 2. PEMODELAN MATEMATIK

### 2.1 Sistem Koordinat Kapal

Untuk menggambarkan manuver kapal, kami memperkenalkan dua sistem koordinat seperti yang ditunjukkan dalam Gambarajah 2. Sistem koordinat  $O - XY$  adalah tetap pada sistem koordinat bumi. Sistem koordinat  $G - xy$  adalah tetap, dimana ianya relatif terhadap pusat graviti kapal, paksi  $x$  menunjukkan arah ke hadapan, paksi  $y$  menunjukkan arah ke sisi kanan kapal. Sudut utama kehadapan kapal (*heading angle*)  $\psi$  adalah merujuk kepada arah paksi membujur kapal  $x$  yang berhubung melalui paksi  $X$ . Kelajuan serta-merta kapal  $U$  boleh diuraikan menjadi halaju arah ke hadapan  $u$  dan halaju arah melintang  $v$ . Sudut antara  $U$  dan paksi  $x$  adalah sebagai sudut hanyut (*drift angle*)  $\beta$ .



Gambarajah 2: Sistem koordinat pada kapal

## 2.2 Persamaan gerak Kapal

Persamaan gerak kapal telah diperoleh seperti berikut:

$$M_x \dot{u} - M_y v \dot{\psi} = F_x \quad (1)$$

$$M_y \dot{v} + M_x u \dot{\psi} = F_y \quad (2)$$

$$I_z \ddot{\psi} = M_z \quad (3)$$

$M_x = (m + m_x)$  dan  $M_y = (m + m_y)$  mewakili komponen massa maya yang merujuk pada masing-masing arah iaitu arah paksi  $x$  dan paksi  $y$ .  $I_z = (I + J)$  adalah momen inersia maya.  $F_x$ ,  $F_y$  dan  $M_z$  menandakan masing-masing gaya dan momen iaitu gaya *surge*, gaya *sway* dan momen *yaw* yang berpusat pada graviti kapal. Apabila gerak manuver kapal yang mantap telah tercapai, halaju sudut kapal adalah malar. Ini bermakna bahawa pecutan kapal sama dengan sifar.

## 2.3 Gaya dan momen yang bertindak pada kapal

Gaya hidrodinamik dan momen yang bertindak pada kapal yang mempunyai kelajuan dan arah gerakan yang malar boleh diungkapkan sebagai fungsi halaju, sudut kemudi dan kipas *rpm* (*revolution per minutes*). Sebagaimana di tulis pada persamaan Eq.(4), gaya-gaya dan momen-momen  $F_x$ ,  $F_y$  dan  $M_z$  boleh diungkapkan berdasarkan model MMG (*Maneuvering Motion Group*) [4] dan [5], yang ditentukan oleh sumber masing-masing gaya dan momen iaitu pada badan kapal ( $X_H, Y_H, N_H$ ), pada kipas ( $X_P$ ) dan pada kemudi ( $X_R, Y_R, N_R$ ). Pemodelan dengan menggunakan MMG ini, ianya boleh mengesan interaksi-interaksi daripada gaya-gaya dan momen-momen berlaku diantara mereka.

$$\left. \begin{aligned} F_x &= X_H + X_P + X_R \\ F_y &= Y_H + Y_R \\ M_z &= N_H + N_R \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

### 2.3.1 Badan Kapal

Gaya-gaya dan momen yang bertindak pada badan kapal (*surge*, *sway*, *yaw*) boleh diungkapkan sebagaimana berikut:

$$X_H = \frac{1}{2} \rho L d U^2 \left( X'_{uu} u'^2 + X'_{vv} v'^2 + X'_{vr} v' r' + X'_{rr} r'^2 \right) \quad (5)$$

$$Y_H = \frac{1}{2} \rho L d U^2 \left( Y'_v v' + Y'_r r' + Y'_{vvv} v'^3 + Y'_{vvr} v'^2 r' + Y'_{vrr} v' r'^2 + Y'_{rrr} r'^3 \right) \quad (6)$$

$$N_H = \frac{1}{2} \rho L^2 d U^2 \left( N'_v v' + N'_r r' + N'_{vvv} v'^3 + N'_{vvr} v'^2 r' + N'_{vrr} v' r'^2 + N'_{rrr} r'^3 \right) \quad (7)$$

$L$  adalah panjang kapal,  $d$  adalah drauf kapal,  $U = \sqrt{u^2 + v^2}$  adalah kelajuan kapal.  $u' = u/U$  dan  $v'_i = v/U$  adalah persamaan tak berdimensi daripada masing-masing halaju *surge* dan *sway*.  $r' = \psi L/U$  adalah persamaan tak berdimensi daripada kadar *yaw*.  $Y'_v, Y'_r, N'_v, N'_r \dots$  dan seterusnya adalah pekali hidrodinamik gerak manuver kapal.  $-X'_{uu}$  adalah pekali rintangan kapal.

### 2.3.2 Kipas

Dalam program simulasi, sebuah kipas dengan kemudi dimodelkan bekerja secara bersamaan. Tujahan

kipas digambarkan sebagai tujahan daripada *surge* kapal:

$$X_P = (1 - t)T_P = \rho(1 - t)D_P^4 n^2 K_T \quad (8)$$

$D_P$  adalah diameter kipas,  $n$  adalah revolusi kipas,  $T_P$  adalah jumlah tujahan kipas, dan  $t$  adalah faktor pengurangan tujahan kipas.  $K_T$  adalah karakteristik "open-water" daripada tujahan kipas.

### 2.3.3 Kemudi

Penjumlahan gaya kemudi  $X_R$  dan  $Y_R$  masing-masing dalam paksi  $x$  dan paksi  $y$ , dan momen *yaw*  $N_R$ , sambil mempertimbangkan interaksi kemudi ke atas badan kapal, dikira seperti berikut:

$$\begin{aligned} X_R &= -(1 - t_R) F_N \sin \delta \\ Y_R &= -(1 + a_H) F_N \cos \delta \\ N_R &= -(x_R + a_H x_H) F_N \cos \delta \end{aligned} \quad (9)$$

$\delta$  adalah sudut kemudi,  $a_H$ ,  $x_H$  dan  $t_R$ , adalah ukuran kemudi dan parameter interaksi antara kemudi dan badan kapal.  $x_R$  adalah titik paksi- $x$  dimana gaya kemudi  $Y_R$  bertindak. Gaya normal kemudi  $F_N$  diungkapkan sebagai berikut:

$$F_N = \frac{1}{2} \rho A_R U_R^2 f_\alpha \sin(\alpha_R) \quad (10)$$

$A_R$  menandakan luasan daripada kemudi,  $f_\alpha$  kecerunan pekali gaya angkat daripada kemudi,  $U_R$  adalah kemasukan kelajuan purata pada kemudi dan  $\alpha_R$  adalah kesan kemudi yang disebabkan adanya sudut aliran masuk:

$$U_R = \sqrt{u_R^2 + v_R^2} \quad (11)$$

$$\alpha_R = \delta - \tan^{-1} \left( \frac{v_R}{u_R} \right) \quad (12)$$

$u_R$  dan  $v_R$  menandakan komponen-komponen halaju aliran masuk:

$$v_R = U \gamma_R \beta_R \quad (13)$$

$v_R$  dipengaruhi oleh sudut masuk aliran kemudi  $\beta_R$  ( $\equiv \beta - \ell'_R r'$ ).  $\gamma_R$  adalah pekali aliran pelurus pada kemudi.  $\ell'_R$  adalah koordinat kemasukan kesan aliran tak berdimensi pada kemudi kapal.  $u_R$  boleh dikira, [6]:

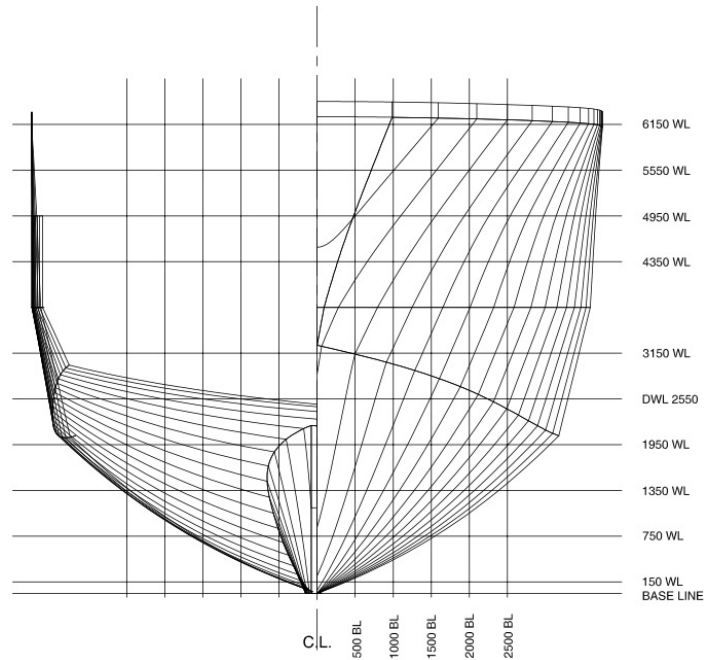
$$u_R = \frac{\varepsilon u (1 - w_p)}{1 - s} \sqrt{1 - 2(1 - \eta \kappa) s + 1 - \eta \kappa (2 - \kappa) s^2} \quad (14)$$

$w_p$  menandakan keberikutan pecahan berkesan pada kedudukan kipas,  $s$  adalah nisbah slip kipas,  $\eta$  nisbah diameter kipas terhadap ketinggian kemudi,  $\kappa$  faktor koreksi aliran pada kipas ( $\kappa = 0.6/\varepsilon$  adalah nilai yang biasa digunapakai), dan  $\varepsilon$  adalah pekali aliran pada kemudi terhadap lokasi kemudi tersebut.

## 3. PEMODELAN SIMULASI

### 3.1 Kapal

Ukuran utama RVD yang ditunjukkan pada Gambarajah. 3 adalah dibentangkan dalam Jadual 1. RVD mempunyai satu kipas dan satu kemudi. Kipas ini mempunyai diameter 1.56 m dan pusingannya sebesar 446.7 rpm. Tiga sudut kemudi yang berbeza ( $\delta$ ) iaitu 20°, 25° dan 35° akan disimulasikan untuk melihat kesannya terhadap prestasi gerak manuver dan gerak zig-zag RVD. Panjang *span* dan *cord* daripada kemudi masing-masing adalah 2.03 m dan 1.05 m. Dalam simulasi ini, kelajuan stereng kemudi ditetapkan sebesar 2.0°/detik.



Gambarajah 3: Rencana garis daripada RVD

Jadual 1: Ukuran Utama RVD

Simbol	Ukuran
Panjang keseluruhan kapal, $L_{OA}$ (m)	34.8
Panjang perentas kapal, $L_{BP}$ (m)	32.46
Lebar kapal, $B$ (m)	7.60
Tinggi kapal, $D$ (m)	3.95
Drauf kapal, $d$ (m)	2.55
Kelajuan kapal, $V_s$ (knots)	12
Sudut kemudi, $\delta$ (darjah)	20, 25 dan 35
$k_{zz}/L$	0.25
$L/B$	4.27

### 3.2 Derivatif hidrodinamik pada gerak manuver kapal

Derivatif hidrodinamik pada gerak manuver RVD, termasuk pekali rintangan dalam skala penuh ( $X'_{uu}$ ) diperoleh dengan menggunakan formula anggaran yang dicadangkan oleh [7], di mana formula ini adalah merupakan fungsi daripada  $L_{BP}$ ,  $B$ ,  $d$ ,  $C_b$  dan nisbah aspek daripada badan kapal ( $k = 2d/L$ ). Nilai-nilai daripada derivatif hidrodinamik ini dibentangkan dalam Jadual 2. Pekali penambahan massa ( $m'_x, m'_y, J'_z$ ) telah dikira menggunakan kaedah panel dengan keadan tegar permukaan-bebas (*panel method with rigid free-surface condition*).

Jadual 2: Pekali rintangan kapal, derivatif hydrodinamik daripada gerak manuver kapal dan pekali penambahan massa

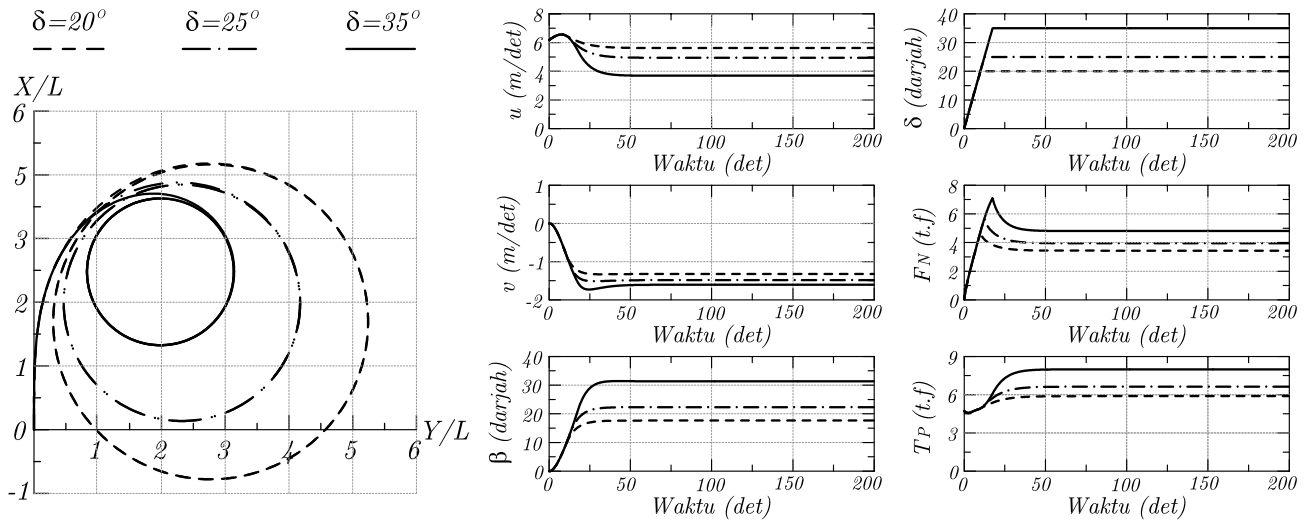
Simbol	Nilai	Simbol	Nilai
$X'_{uu}$	-0.0169	$m'_x$	0.014
$Y'_v$	-0.223	$m'_y$	0.199
$Y'_r$	0.051	$J'_z$	0.003
$N'_v$	-0.078	$Y'_\delta$	-0.05
$N'_r$	-0.0669	$N'_\delta$	0.025

#### 4. HASIL SIMULASI DAN PERBINCANGAN

##### 4.1 Karakteristik diameter maju dan diameter taktikal daripada RVD

Prestasi gerak manuver RVD telah diuji melalui pendekatan analysis yang tidak linear, Gambarajah 4. Berdasarkan hasil-hasil simulasi, RVD memenuhi piawaian daripada piawaian IMO iaitu untuk diameter maju dan taktikalnya kecuali untuk sudut kemudi  $\delta = 20^\circ$  (nilai diameter taktikal) sebagaimana dibentangkan secara lengkap di dalam Jadual 3. Seiring dengan naiknya nilai  $\delta$  daripada  $20^\circ$  sehingga  $25^\circ$  dan kemudian  $35^\circ$  menyebabkan berkurangnya masing-masing diameter maju daripada RVD kira-kira sebesar 7% dan 11%. Kecenderungan yang sama menunjukkan bahawa masing-masing diameter taktikal juga berkurangan kira-kira sebesar 20% dan 41%. Ianya boleh disimpulkan bahawa peningkatan nilai  $\delta$  mempunyai kesan yang lebih besar kepada magnitud diameter taktikal daripada diameter majunya.

Dalam fasa perubahan yang stabil, peningkatan secara beransur-ansur nilai  $\delta$  daripada  $20^\circ$ ,  $25^\circ$  dan  $35^\circ$  adalah sebanding dengan peningkatan halaju *sway* ( $v$ ), sudut hanyut ( $\beta$ ) dan kadar *yaw* ( $r$ ) (sila lihat Jadual 4), dimana keadaan ini mengakibatkan pengurangan baik dalam diameter maju mahupun diameter taktikalnya. Sementara itu, gaya normal kemudi ( $F_N$ ) juga meningkat sebagaimana secara analitis diungkapkan dalam persamaan (4). Meskipun halaju kedepan kapal ( $u$ ) secara beransur-



Gambarajah 4: Trajektori gerak manuver RVD pada sudut kemudi yang berbeza

ansur menurun kira-kira sebesar 12% dan 34% disebabkan berubahnya nilai masing-masing  $\delta$  daripada  $20^\circ$  ke  $25^\circ$  dan daripada  $20^\circ$  ke  $35^\circ$ ; walaubagaimanapun, hal ini menyebabkan  $F_N$  meningkat sekitar

18% dan 29%. Akibatnya, jumlah rintangan kapalpun meningkat, dimana ianya menghasilkan tujuh kipas yang lebih besar ( $T_P$ ).

Jadual 3: Karakteristik diameter maju dan diameter taktikal daripada RVD dengan sudut kemudi yang berbeza-beza

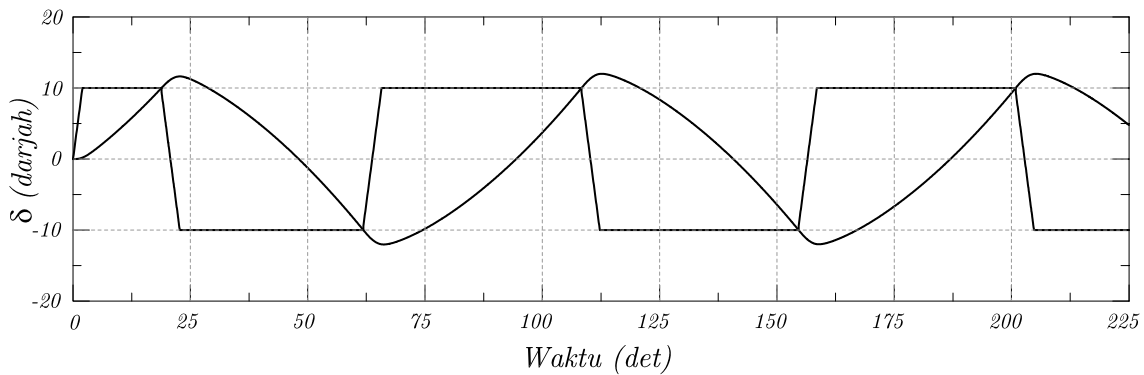
$\delta$ (deg)	Diameter Maju (m)	Piawaian IMO	Diameter Taktikal (m)	Piawaian IMO
20	<b>4.12L</b> < 4.5L	Ya	<b>5.12L</b> > 5.0L <sub>BP</sub>	Tidak
25	<b>3.81L</b> < 4.5L	Ya	<b>4.10L</b> < 5.0L <sub>BP</sub>	Ya
35	<b>3.63L</b> < 4.5L	Ya	<b>3.04L</b> < 5.0L <sub>BP</sub>	Ya

Jadual 4: Karakteristik gerak manuver RVD yang stabil dengan sudut kemudi yang berbeza-beza

$\delta$ (darjah)	$u$ (m/det)	$v$ (m/det)	$\beta$ (darjah)	$r$ (darjah/det)	$F_N$ (t.f)	$T_P$ (t.f)
20	5.62	-1.322	13.24	4.12	3.43	5.89
25	4.94	-1.48	16.71	4.91	3.95	6.63
35	3.69	-1.60	23.49	6.17	4.81	7.98

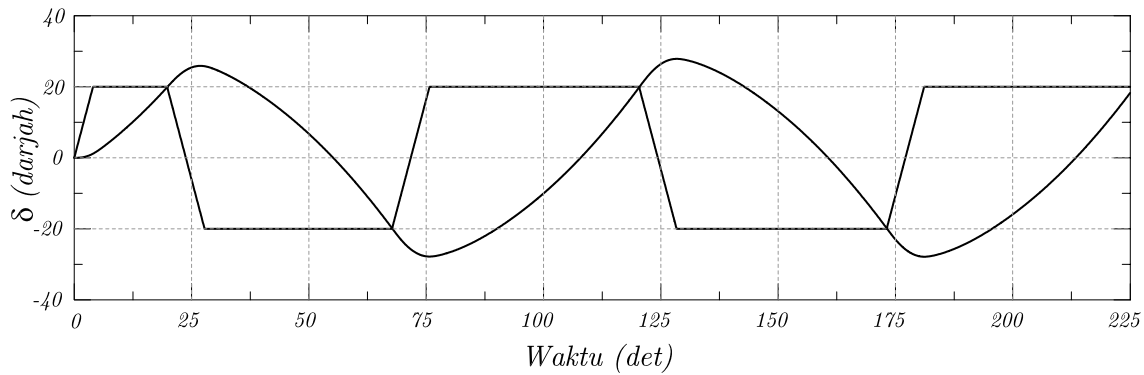
#### 4.2 Karakteristik Zig-Zag RVD

Di dalam makalah ini, gerak manuver zig-zag telah dijalankan untuk tujuan memeriksa keupayaan *yaw* yang mewakili keberkesanan kemudi dalam membuat perubahan arah sudut utama kehadapan kapal. Pada mulanya, penulis menetapkan sudut kemudi, dimana sudutnya akan berubah daripada sisi kiri (*port*)  $10^\circ$  sehingga sisi kanan (*starboard*)  $10^\circ$  dengan halaju sebesar 12 knot sebagaimana di tunjukan dalam Gambarajah 5. Sepertimana yang diukur dalam simulasi zig-zag  $10^\circ/10^\circ$ , sudut terlajak pertama dilihat agak kecil iaitu sekitar  $1.6^\circ$ . Ini bermakna bahawa hasil simulasi daripada gerak manuver ini mematuhi piawaian IMO, di mana sudut terlajak pertama hendaklah tidak melebihi  $10^\circ$  jika  $L/U \leq 10$  detik, dimana  $L$  adalah panjang kapal dengan unit meter dan  $U$  adalah kelajuan kapal dalam unit meter/detik [8]. Untuk sudut terlajak kedua diperolehi sebesar  $2.1^\circ$ , yang juga ianya



Gambarajah 5: Gerak zig-zag RVD  $10^\circ/10^\circ$  terhadap fungsi waktu

mematuhi piawaian IMO (tidak melebihi nilai  $L/U \leq 25$  detik) [8]. Di samping itu, waktu pemeriksaan *yaw* untuk sudut terlajak pertama dan kedua masing-masing adalah 3.9 detik dan 4.2 detik. Dalam kes  $20^\circ/20^\circ$  simulasi gerak zig-zag, ianya menunjukkan bahawa masing-masing sudut terlajak pertama dan keduanya mematuhi piawaian IMO iaitu  $5.9^\circ$  dan  $7.8^\circ$  dengan waktu pemeriksaaan *yaw* masing-masing adalah 7.1 detik dan 7.8 detik. Pada umumnya, keupayaan gerak zig-zag RVD  $10^\circ/10^\circ$  dan  $20^\circ/20^\circ$  adalah boleh diterima mengikuti piawaian IMO tentang gerak manuver kapal.



Gambarajah 6: Gerak zig-zag RVD 20°/20° terhadap fungsi waktu

## 5. KESIMPULAN

Berdasarkan pendekatan program simulasi berangka yang tidak linear, beberapa kesimpulan mengenai ramalan prestasi gerak manuver kapal penyelidikan "Discovery" adalah sebagai berikut;

- Magnitud diameter maju RVD, dimana sudut kemudi 20°, adalah tidak mematuhi piawaian yang ditetapkan oleh IMO.
- Magnitud diameter maju dan diameter taktikal RVD, dimana sudut kemudi 25° dan 35°, adalah mematuhi piawaian yang ditetapkan oleh IMO.
- Dari hasil simulasi berangka, ianya menunjukkan bahawa gerak zig-zag RVD boleh diterima kerana mematuhi piawaian yang ditetapkan oleh IMO.

## 6. RUJUKAN

- [1] Lin, R.Q., Hughes, M. and Smith, T. (2010). **Prediction of ship steering capabilities with a fully nonlinear ship motion model**. Part 1: maneuvering in calm water. *Journal of Marine Science and Technology*, Vol. 15, No. 2, pp. 131-142.
- [2] Hirano, M., Takashina, J., Takeshi, K. and Saruta, T. (1980). **Ship turning trajectory in regular waves**. *Transactions of West-Japan Society of Naval Architects*, Vol. 60, pp. 17-31.
- [3] Yen, T.G., Zhang, S., Weems, K., and Lin, W.M., (2010). **Development and validation of numerical simulations for ship maneuvering in calm water and in waves**. *Proceedings of the 28<sup>th</sup> Symposium on Naval Hydrodynamics*, pp. 12-17.
- [4] Ogawa, A., Kasai, H. (1978). **On the mathematical model of manoeuvring Motion of ship**. *International Shipbuilding Progress*, Vol. 25, No. 292, pp. 306-319.
- [5] Kose, K., Yumuro, A. and Yoshimura, Y. (1981). **Concrete of mathematical model for ship manoeuvrability**. *3<sup>rd</sup> Symposium on ship manoeuvrability*, Society Naval Architect of Japan, pp. 27-80 (in Japanese).



- [6] Yoshimura, Y. and Nomoto, K. (1978). **Modeling of maneuvering behaviour of ships with a propeller idling, boosting and reversing (Japanese)**. Journal of the Society of Naval Architecture of Japan, Vol. 144, pp. 57-69.
- [7] K. Kijima et al. (1990). **On a numerical simulation for predicting of ship maneuvering performance**. Proceedings 19<sup>th</sup> International Towing Tanks Conference, Vol. 2.
- [8] International Maritime Organization (IMO, 2002a). **Resolution:Standards for ship maneuverability**. MSC. 137.

## NOMENCLATURE

$A_R$	Luasan kemudi
$B$	Lebar kapal (m)
$d$	Drauf kapal (m)
$\delta$	Sudut pesongan-kemudi (darjah)
$f_\alpha$	Kecerunan pekali angkat kemudi
$F_N$	Gaya normal kemudi (tan)
$F_x, F_y$	Gaya <i>gurge</i> dan <i>sway</i> disekitar kapal
$G$	Pusat graviti kapal
$I_z$	Pekali inersia masa maya kapal
$J'_z$	Penambahan momen pekali inersia kapal
$K_T$	Karakteristik <i>open-water</i> daripada tolakan kipas
$k_{zz}$	Jejari legaran kapal
$L_{BP}$	Panjang antara perentas (m)
$L_{OA}$	Panjang keseluruhan (m)
$m'_x, m'_y$	Pekali penambahan massa untuk gerak <i>surge</i> dan <i>sway</i>
$\psi$	Sudut utama kehadapan kapal (darjah)
$r'$	Kadar <i>yaw</i> kapal
$u, v$	Halaju memanjang dan melintang kapal (m/det)
$U$	Kelajuan kapal
$t$	Faktor pengurangan tujahan kipas
$T_P$	Jumlah tujahan kipas (t.f)