

## Penentuan *Added Mass Hycat* Akibat Gerakan *Couple Heaving Pitching* pada Gelombang *Reguler*

Mas Murtedjo<sup>1)</sup>

### Abstrak

Untuk menentukan besarnya *added mass* pada model *HYCAT* akibat gerakan *couple heaving-pitching* telah dilakukan studi eksperimental di Laboratorium Hidrodinamika Indonesia. Penelitian ini dilakukan pada kondisi sarat air 0,278 m, tinggi gelombang 0,1 m, tiga variasi kecepatan model 4,432 m/dt, 4,77 m/dt dan 5,144 m/dt masing-masing dengan rentang periode gelombang 0,8 ~ 1,4 detik. Dari percobaan tersebut di atas diperoleh hasil pada kecepatan 4,432 m/dt untuk *heaving* rentang *added mass* berkisar antara 24,67 ~ 46,68 kg, dan untuk *pitching* rentang *added mass* 5,98 ~ 20,35 kg, pada kecepatan 4,77 m/dt rentang *added mass* untuk *heaving* 18,72 ~ 41,31 kg, dan rentang *added mass* untuk *pitching* 4,68 ~ 17,54 kg. Pada kecepatan 5,144 m/dt rentang *added mass* untuk *heaving* 15,51 ~ 35,28 kg dan rentang *added mass* untuk *pitching* 3,17 ~ 15,72 kg. Keseluruhan hasil percobaan tersebut selanjutnya diverifikasi dengan hasil perhitungan teoritis menggunakan teori strip. Hasil verifikasi menunjukkan bahwa hasil percobaan dan perhitungan teoritis memberikan trend grafik yang sama, yaitu terjadi kenaikan nilai *added mass* seiring dengan naiknya periode gelombang. Disisi lain dengan naiknya kecepatan model, terjadi penurunan besaran *added mass*.

**Kata-kata kunci :** *HYCAT, Added Mass, Heaving, Pitching, Teori Strip.*

### Abstract

An experimental study has been performed at the Indonesia Hydrodynamics Laboratory to measure the *added mass* of a *HYCAT* model due to *couple heave-pitch* mode of motion. A series of tests were conducted by setting the model draft at 0,278 m, in the 0,1 m wave height, three different model speed of 4.432 m/sec, 4.77 m/sec, and 5.144 m/sec, with variation in wave period ranging from 0.8 to 1.4 sec, for each model speed. Results of the experiment show that at 4.432 m/sec model speed, the *added mass* for *heave* ranges between 24.67 ~ 46.68 kgs and the *added mass* for *pitch* ranges between 5.98 ~ 20.35 kgs. At 4.77 m/sec model speed, the *added mass* for *heave* ranges between 18.72 ~ 41.31 kgs and the *added mass* for *pitch* ranges between 4.68 ~ 17.54 kgs. Whereas at 5.144 m/sec model speed, the *added mass* for *heave* ranges between 15.51 ~ 35.28 kgs and the *added mass* for *pitch* ranges between 3.17 ~ 15.72 kg. These experimental results were further verified by the data predicted through the application of the *Strip theory*. Both the experimental and theoretical results show similar trend, in which the *added mass* is increasing in proportion to the increasing of wave period. In contrast to this, the *added mass* eventually decreases along with increase in model speed

**Keywords :** *HYCAT, Added Mass, Heaving, Pitching, Strip Theory.*

## 1. Pendahuluan

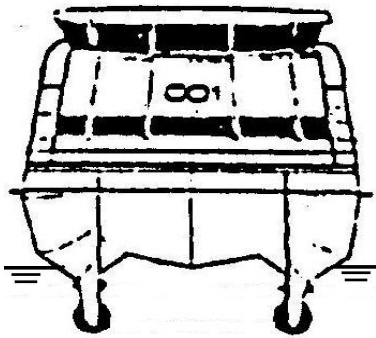
Penggunaan jenis transportasi laut non konvensional atau *Advanced Marine Vehicles* (AMVs) yang mempunyai karakteristik kecepatan dan kenyamanan lebih tinggi dari pada jenis konvensional, akan menjadi alternatif kebutuhan jenis transportasi laut di masa mendatang. *Hybrid Hydrofoil Catamaran* (HYCAT) sebagai salah satu jenis AMVs mempunyai bentuk konstruksi kombinasi dari lambung catamaran dengan

dua buah *fully submerged hydrofoil* seperti ditunjukkan pada Gambar 1 (Arii et al., 1993).

Akibat beban gelombang, khususnya untuk struktur HYCAT, keandalan operasi tidak saja diukur dari kecepatan tinggi, namun juga karakteristik gerakan yang lebih baik. Saat berlayar di laut yang bergelombang struktur HYCAT akan mengalami 6 (enam) macam gerakan osilasi, yaitu : *pitching*, *rolling*, *swaying*, *heaving*, *surging* dan *yawing*.

1) Departemen Teknik Kelautan, FTK, ITS, Surabaya

**Catatan :** Usulan makalah dikirimkan pada tanggal 25 September 2002 dan dinilai oleh peer reviewer pada tanggal 25 Oktober 2002–16 Desember 2002. Revisi penulisan dilakukan antara tanggal 25 Nopember 2002 hingga 7 Januari 2003.



Gambar 1. Pandangan depan HYCAT

HYCAT yang memiliki dua badan (*double hull*) yang ramping dengan luasan bidang garis air yang relatif kecil akan mengurangi besaran tekanan air, sehingga akan memberikan karakteristik gerakan yang lebih stabil.

Selanjutnya beban total yang bekerja pada struktur bangunan apung yang mengalami 6 (enam) macam gerakan osilasi akan sangat dipengaruhi salah satunya oleh besaran faktor added mass. Sedangkan besaran added mass tersebut dipengaruhi oleh bentuk benda, macam gerakan dan frekuensi.

Dalam perancangan bangunan lepas pantai telah dilakukan beberapa penelitian penentuan *added mass*, tetapi kebanyakan untuk bentuk-bentuk mono-hull dan catamaran biasa. Dari pemikiran diatas, maka dilakukan penelitian untuk mengetahui besarnya added mass dari *hydrofoil* catamaran terhadap fungsi frekuensi atau periode dalam arah gerakan *couple heave-pitch* akibat beban gelombang.

## 2. Studi Kepustakaan

Seperti diuraikan dalam konsep added mass, bahwa suatu struktur yang dipercepat gerakannya di dalam fluida akan memiliki gaya yang lebih besar dari massa struktur dikalikan percepatannya. Hal ini disebabkan adanya gaya tambahan yang dibutuhkan selain untuk menggerakkan struktur juga untuk menggerakkan fluida di sekeliling struktur. Fluida di sekeliling struktur inilah disebut sebagai added mass (Le Mehaute, 1976).

Hasil penelitian yang telah dilakukan oleh Callisal dan Sabuncu (1989) pada silinder vertikal tunggal yang bergerak heaving dengan rentang frekuensi 0,5 ~ 2,5 Hz, menghasilkan rentang besaran koefisien added mass berkisar 0,3 ~ 0,6.

Pada model silinder vertikal gabungan berbentuk silang yang bergerak heaving dengan rentang frekuensi 0,25 ~ 2,5 Hz, rentang besaran koefisien

*added mass* yang diperoleh berkisar 0,01~0,25 (Mikkelsen and Callisal, 1993).

Selanjutnya penelitian model silinder vertikal berbentuk T yang bergerak heaving dengan rentang periode 0,5 ~ 1,3 detik, rentang besaran koefisien *added mass* yang diperoleh berkisar 0,27 ~ 1,38 (Murtedjo, 1997).

Terlihat bahwa dari ketiga eksperimen model silinder tersebut diatas memberikan hasil bahwa nilai koefisien added mass akan meningkat seiring dengan kenaikan frekuensi/ periode.

Struktur HYCAT di bawah permukaan air mempunyai bentuk catamaran / dua lambung yang ramping, sehingga luasan bidang yang terendam air relatif kecil (Gambar 1). Hal ini akan mengurangi besaran tahanan air yang bekerja pada lambung, sehingga menjadikan HYCAT sebagai salah satu jenis *Advance Marine Vehicles* yang mempunyai karakteristik kecepatan tinggi (Arii et al., 1993). Kondisi ini dapat dipahami mengingat bentuk struktur lambung HYCAT seperti tersebut diatas akan memperkecil *added resistance/ total resistance* (Murtedjo, 2002).

Untuk melengkapi studi-studi yang telah dilakukan terdahulu, perlu studi lanjut yang menyangkut aspek hidrodinamis khususnya mengenai karakteristik gerakan HYCAT mengingat keandalan operasi tidak hanya diukur dari kecepatan tinggi namun juga karakteristik gerakan yang lebih baik.

## 3. Metodologi Penelitian

Penelitian ini diawali dengan studi literatur, dilanjutkan dengan pembuatan model *hydrofoil catamaran* yang terbuat dari kayu. Setelah itu dilakukan kalibrasi peralatan ukur, yaitu *loadcell* sebagai alat ukur beban gelombang, *displacement transducer* sebagai alat ukur simpangan model dan *wave probe* sebagai alat ukur tinggi gelombang. Kemudian dilakukan percobaan untuk mengetahui besarnya *added mass* pada suatu model HYCAT akibat gerakan *couple heaving-pitching* di Laboratorium Hidrodinamika Indonesia (LHI). Penelitian ini dilaksanakan pada kondisi sarat air 0,278 m, satu variasi tinggi gelombang 0,1 m, tiga variasi kecepatan model 4,432 m/dt, 4,77 m/dt dan 5,144 m/dt dengan rentang periode 0,8 ~ 1,4 detik.

Pada tiap kali percobaan dilakukan pengambilan data menggunakan data acquisition system. Di dalam analisa diperlukan pembatasan masalah/anggapan yaitu jenis gelombang sinusoidal dengan variasi tinggi dan periode harus memenuhi batasan untuk dominasi

beban inersia, sehingga beban damping yang timbul adalah kecil sekali dan dapat diabaikan. Kedalaman perairan masuk dalam *range deep water* dengan arah gelombang adalah head sea dan sejajar dengan garis sumbu silinder horisontal.

Hasil percobaan tersebut kemudian dianalisa satu-persatu dan dibuat grafik berabsis periode dan berkoordinat added mass. Dari analisa data hasil percobaan kemudian dilakukan verifikasi dengan hasil perhitungan teoritis menggunakan teori Strip.

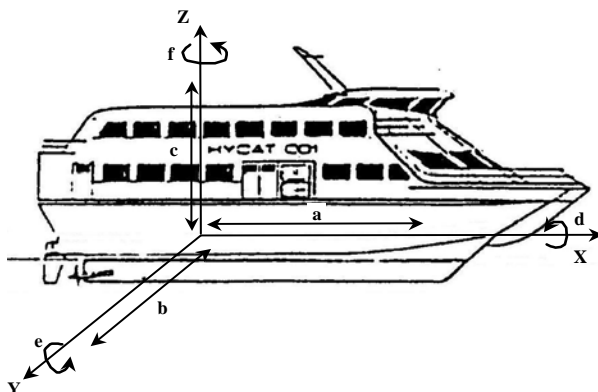
## 4. Teori

### 4.1 Gerakan struktur terapung

Setiap struktur terapung yang bergerak di atas permukaan laut selalu mengalami gerakan osilasi. Gerakan osilasi ini terdiri dari 6 macam gerakan, yaitu 3 macam gerakan lateral dan 3 macam gerakan rotasional dalam 3 arah sumbu yang ditunjukkan dalam Gambar 2. Macam gerakan itu meliputi :

- Surging* : Gerakan osilasi lateral pada sumbu -x.
- Swaying* : Gerakan osilasi lateral pada sumbu -y.
- Heaving* : Gerakan osilasi lateral pada sumbu -z.
- Rolling* : Gerakan osilasi rotasional terhadap sumbu -x.
- Pitching* : Gerakan osilasi rotasional terhadap sumbu -y.
- Yawing* : Gerakan osilasi rotasional terhadap sumbu -z.

Hanya 3 macam gerakan merupakan gerakan osilasi murni yaitu *heaving*, *rolling* dan *pitching*, karena



Gambar 2. Enam derajat kebebasan gerakan struktur catamaran

gerakan ini bekerja dibawah gaya atau momen pengembali ketika struktur itu terganggu dari posisi kesetimbangannya. Untuk gerakan *surging*, *swaying* dan *yawing* struktur tidak kembali menuju posisi kesetimbangannya semula kalau diganggu, kecuali ada gaya atau momen pengembali yang menyebabkannya bekerja dalam arah berlawanan.

Pada penelitian ini akan dibahas struktur terapung yang bergerak dua derajat kebebasan dalam arah gerakan *couple heave-pitch* akibat gelombang dalam arah head sea. Seperti diketahui gaya osilasi teredam memiliki empat faktor penting (Bhattacharya, 1978) sebagai berikut :

- Gaya inersia :  $F_a = a \ddot{z}$
- Gaya redaman :  $F_b = b \dot{z}$
- Gaya pengembali :  $F_c = c z$
- Gaya eksitasi :  $F = F_0 \cos \omega_e t$

Berdasarkan hukum Newton II maka semua gaya yang bekerja pada sebuah benda (strip) adalah sama dengan perkalian antara massa strip terhadap percepatannya.

Berdasarkan hukum Newton II maka semua gaya yang bekerja pada sebuah benda (strip) adalah sama dengan perkalian antara massa strip terhadap percepatannya.

Persamaan untuk *heaving* :

$$m \cdot \ddot{z} = \Sigma F \quad (1)$$

Persamaan untuk *pitching* :

$$I \cdot \ddot{\theta} = \Sigma M \quad (2)$$

dimana:

$\Sigma F$  = jumlah gaya fluida

$\Sigma M$  = jumlah momen gaya yang bekerja pada strip akibat gerak relatif terhadap gelombang.

Persamaan dasar I untuk gerakan translasi *heaving* pada kopel *heaving* dan *pitching*, yaitu :

$$F(t) = (M + m) \ddot{z} + b \dot{z} + cz + d \ddot{\theta} + e \dot{\theta} + h \theta \quad (3)$$

Persamaan dasar II untuk perilaku gerakan *pitching* akibat gerakan kopel *heaving* dan *pitching*, yaitu:

$$M(t) = (I_{yy} + A_{yy}) \ddot{\theta} + B \dot{\theta} + C \theta + D \ddot{z} + E \dot{z} + H z \quad (4)$$

Untuk menghitung elevasi bangunan apung terhadap *mean water level* (MWL) akibat kopel *heaving* dan *pitching* akan digunakan teori strip, dimana sebuah benda terapung dibagi secara transversal menjadi beberapa bagian yang selanjutnya disebut sebagai strip.

#### 4.2 Teori strip

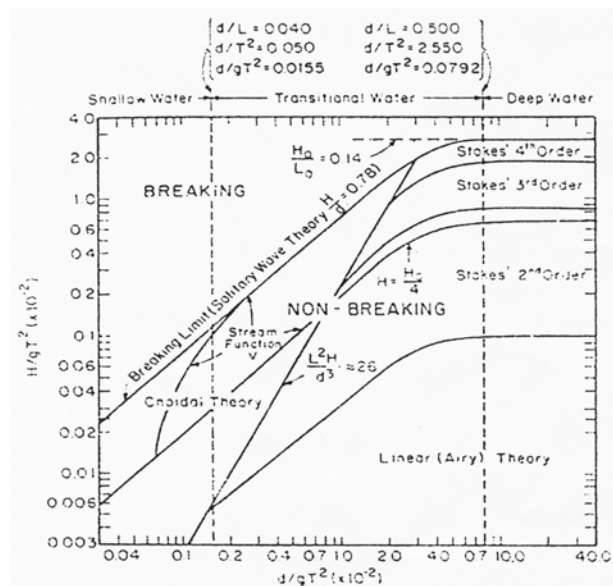
Teori strip merupakan salah satu metode yang dipergunakan dalam menurunkan persamaan matematika dari gerakan benda apung. Teori ini dinamakan teori strip karena merupakan penjabaran dua dimensi dari struktur dalam irisan-irisan atau strip-strip. Tiap strip memiliki karakteristik lokal hidrodinamik seperti koefisien added mass, koefisien redaman dan koefisien pengembali yang merupakan penyusun lengkap suatu persamaan gerak dinamis struktur terapung. Demikian juga gaya eksitasi yang bekerja pada struktur tersusun dari sumbu seluruh strip.

Untuk memperjelas masalah dan membatasi ruang lingkup dari pembahasan perhitungan *added mass* dengan menggunakan teori strip diambil batasan masalah dan asumsi-asumsi sebagai berikut :

- Eksperimen dilakukan dengan menggunakan *regular wave* dengan arah datang gelombang dari depan (*head sea*) menggunakan variasi periode dan kecepatan model sesuai dengan kemampuan kolam uji Laboratorium Hidrodinamika Indonesia (LHI).
- Model HYCAT dianggap hanya mengalami gerakan *heave* dan *pitch* saja.
- Gesekan antara roda dengan rel yang membatasi gerakan model HYCAT dianggap kecil dan diabaikan.
- Efek tiga dimensi seperti interferensi antara strip atau hubungan antara elemen-elemen yang berdekatan diabaikan.
- Sistem aliran fluida dianggap 2-D (dua dimensi) dan bersifat *inviscid*.

#### 4.3 Region of validity

Untuk menentukan teori gelombang yang paling sesuai guna menurunkan persamaan beban-beban yang diterima oleh struktur, maka digunakan grafik region of validity gelombang (Gambar 3). Sebagai absis adalah  $d/gT^2$  dan ordinatnya adalah  $H/gT^2$ , dimana  $d$  : kedalaman perairan,  $T$  : periode gelombang,  $H$  : tinggi gelombang.



Gambar 3. Grafik region of validity (Chakrabarti, S.K., 1987)

Berdasarkan data-data kedalaman perairan, periode gelombang dan tinggi gelombang, maka teori gelombang yang memenuhi syarat untuk digunakan, yaitu : teori gelombang linier/ *small amplitude wave theory*.

Teori ini pertama kali dikembangkan oleh G.B. Airy (Dawson, 1983), yang mengasumsikan, bahwa bentuk gelombang adalah sinusoidal, dimana tinggi gelombangnya adalah kecil dibandingkan panjang gelombang dan kedalaman air.

Persamaan umum yang sering dipakai dalam teori gelombang linier adalah :

Profil permukaan gelombang :

$$\eta = \frac{H}{2} \cos(kx - \omega t) \quad (5)$$

Kecepatan horisontal  $u$  dan kecepatan vertikal  $v$  dari partikel air pada posisi  $(x, y)$  dan waktu  $t$  diekspresikan sebagai berikut :

$$u = \omega H/2 \frac{\cosh ks}{\sinh kd} \cos(kx - \omega t) \quad (6)$$

$$v = \omega H/2 \frac{\sinh ks}{\sinh kd} \sin(kx - \omega t) \quad (7)$$

dimana,  $s = z + d$

$d$  = kedalaman perairan

$z$  = elevasi gelombang

Percepatan horisontal  $a_x$  dan percepatan vertikal  $a_y$  dapat diperoleh dari penurunan  $u$  dan  $v$  pada persamaan (6) dan (7) terhadap waktu, sehingga

$$a_x = \frac{du}{dt} = \omega^2 H/2 \frac{\cosh ks}{\sinh kd} \cos(kx - \omega t) \quad (8)$$

$$a_y = \frac{dv}{dt} = \omega^2 H/2 \frac{\sinh ks}{\sinh kd} \cos(kx - \omega t) \quad (9)$$

#### 4.4 Gaya-gaya yang bekerja pada strip

##### 4.4.1 Gaya inersia

Struktur yang dipercepat gerakannya di dalam media fluida akan memiliki gaya yang lebih besar dari massa struktur dikali percepatannya, karena terdapat gaya tambahan yang dibutuhkan selain untuk menggerakkan struktur juga untuk menggerakkan fluida di sekeliling struktur. Gaya yang menggerakkan fluida tambahan yang ada di sekeliling struktur itu disebut gaya *added mass* (Le Mehaute, 1976). Gaya total untuk menggerakkan struktur dan fluida disebut “gaya inersia”, adalah :

$$F_a = (M + m) \frac{d^2 z}{dt^2} = a \ddot{z} \quad (10)$$

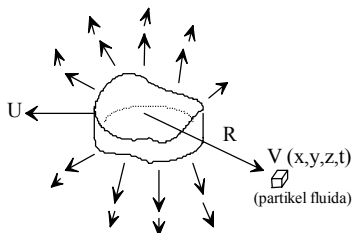
$F_a$  = Gaya untuk menggerakkan massa benda + gaya untuk menggerakkan massa fluida di sekeliling benda.

##### Konsep Added Mass

Pada saat suatu benda dengan massa  $M$  bergerak dengan kecepatan  $U$ , maka energi kinetik benda tersebut adalah sebesar  $\frac{1}{2} MU^2$ . Gerakan benda tersebut akan mempengaruhi gerakan fluida di sekelilingnya dan mempunyai perlambatan nol pada jarak tak terhingga dari benda seperti terlihat pada Gambar 4 (Le Mehaute, 1976). Dalam hal ini semakin jauh dari benda kecepatan partikel fluida  $V(x, y, z, t)$  akan menurun sebanding  $1/R^3$  dalam kasus aliran tiga dimensi dan  $1/R^2$  dalam kasus aliran dua dimensi.  $R$  adalah jarak partikel fluida yang ditinjau dari pusat benda. Energi kinetik total dari fluida sekeliling benda adalah :

$$\iiint_{lim}^{\infty} \frac{1}{2} \rho V^2(x, y, z) d\sigma \quad (11)$$

Dimana  $lim$  adalah batas sisi benda dan  $d\sigma$  adalah volume dasar (atau luasan elementer gerakan dua dimensi). Total energi kinetik dari sistem, yaitu benda dan fluida dapat ditulis sebagai berikut :



Gambar 4. Pengaruh pergerakan benda terhadap partikel fluida

$$W = \frac{1}{2} U^2 \left[ M + \rho \iiint_{lim}^{\infty} \left( \frac{V}{U} \right)^2 d\sigma \right] \quad (12)$$

dengan kuantitas *added mass* :

$$m = \rho \iiint_{lim}^{\infty} \left( \frac{V}{U} \right)^2 d\sigma \quad (13)$$

Terlihat juga bahwa secara umum kasus  $m$  adalah fungsi harga absolut dari  $U$  dan juga merupakan fungsi angka Reynold  $UD/\nu$  serta karakteristik aliran fluida yang lain (seperti Keulegan Carpenter  $UT/D$  untuk gerakan periodik dimana  $D$  adalah ukuran karakteristik benda). Akibatnya  $m$  akan merupakan fungsi waktu secara umum.

Dalam kasus fluida sempurna,  $V(x, y, z, t)/U$  tak tergantung dari  $U$ , tapi tergantung hanya pada pola aliran. Sehingga integral dari koefisien  $V(x, y, z, t)/U$  tak tergantung pada besar  $U$  dan waktu. Harga  $m$  adalah konstan sehubungan dengan benda dan massa spesifik fluida. Gaya total yang bekerja pada benda sama dengan jumlah gaya inersia benda itu sendiri dan gaya inersia fluida di sekeliling benda, yaitu :

$$F = M \frac{dU}{dt} + \rho \iiint_{lim}^{\infty} \frac{dV}{dt} d\sigma \quad (14)$$

atau dapat ditulis:

$$F = (M + m) \frac{dU}{dt} \quad (15)$$

Dimana:

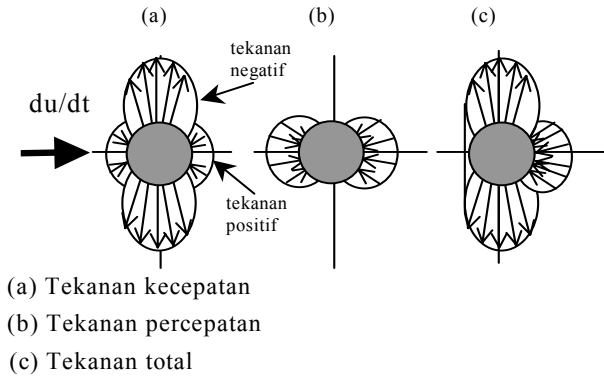
$$m = \rho \frac{\left( \frac{d}{dt} \right) \iiint_{lim}^{\infty} V d\sigma}{\frac{dU}{dt}} \quad (16)$$

Karena integral  $\iiint_{lim}^{\infty} V d\sigma$  divergen pada jarak tak terhingga dari benda maka gaya inersia fluida di sekeliling benda (*added mass*)  $F' = m \cdot dU/dt$  harus dihitung dari gaya yang diberikan fluida pada benda atau sebaliknya, yakni :

$$F' = \iint_S p \cdot \cos\theta \cdot dS \quad (17)$$

dengan  $p$  adalah tekanan sekeliling benda,  $\cos\theta$  adalah sudut tegak lurus ke elemen  $dS$  dengan arah utama gerakan, dan  $S$  luasan dari benda (Gambar 5). Bila  $V$  (atau  $\phi$ ) diketahui maka  $p$  dapat dihitung dengan persamaan Bernoulli. Sehingga untuk aliran *irrotasional unsteady* maka  $p$  dapat digantikan dengan sehingga  $-\rho \frac{\partial \phi}{\partial t}$  *added mass* menjadi :

$$m = - \frac{\iint \rho \left( \frac{\partial \phi}{\partial t} \right) \cos \theta . dS}{dU/dt} \quad (18)$$



**Gambar 5. Distribusi tekanan pada benda dipercepat**

Untuk silinder sirkular dengan radius  $R$  yang bergerak di dalam fluida dengan kecepatan seragam, *added mass*  $m$  adalah  $\rho \pi R^2$ . Sehingga besarnya gaya inersia total untuk menggerakkan benda tersebut adalah :

$$F = (M + m) \frac{dU}{dt}$$

$$F = (\rho_b + \rho) \pi R^2 \frac{dU}{dt} \quad (19)$$

dimana :  $\rho_b$  adalah density dari benda.  
 $\rho$  adalah density dari fluida.

Akibat gerakan kopel *heaving-pitching*, maka perumusan perhitungan *added mass* total HYCAT adalah sebagai berikut:

Gerakan *heaving* :

$$a_H = \int_{-L/2}^{L/2} a_n dx \quad (20)$$

Gerakan *pitching* :

$$a_P = \int_{-L/2}^{L/2} a_n x^2 dx \quad (21)$$

Dimana:

$$a_n = C \frac{\rho \pi B_n^2}{8} \quad (22)$$

= *added mass* pada tiap strip  
 $B_n$  = lebar pada tiap strip  
 $x$  = jarak tiap strip terhadap titik berat memanjang (*longitudinal center of gravity, LCG*)

$C$  merupakan koefisien *added mass* yang diambil dari Grafik Lewis-Form (Bhattacharyya, 1978) merupakan fungsi dari frekuensi, perbandingan sarat/lebar dan koefisien blok (luas area per strip dibagi dengan lebar x sarat).

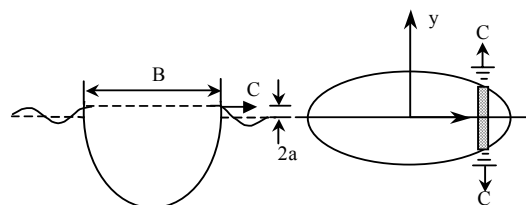
#### 4.4.2 Gaya redaman

Secara teoritis bila suatu benda terapung mendapat gaya luar maka benda tersebut akan berosilasi secara terus menerus meskipun gaya luar yang diberikan sudah tidak bekerja lagi. Namun dalam kenyataannya benda terapung tersebut makin lama makin lambat gerakannya dan akhirnya akan berhenti. Hal ini disebabkan oleh gaya lain yang bekerja pada benda tersebut yang arahnya berlawanan dengan gerakan benda tersebut. Gaya ini dikenal sebagai “gaya redaman” (*damping force*). Gaya redaman ini bisa disebabkan oleh adanya viskositas fluida dan energi yang hilang dalam bentuk ombak yang diciptakan (*creation of wave*) dalam perairan (Mc. Cormick, 1989). Selanjutnya akan dibahas mengenai penyebab kedua yaitu kreasi gelombang, karena pengaruh viskositas dianggap cukup kecil.

Berdasar strip yang ditunjukkan pada Gambar 6 yang berosilasi secara vertikal, radiasi permukaan gelombang yang terjadi pada sisi strip disebabkan oleh inklinasi pada sisi strip pada garis air, adhesi air pada lambung dan perubahan displacement benda terapung. Asumsi dasar dari teori strip adalah bahwa badan benda apung adalah wall-sided atau tidak terdapat kelengkungan permukaan benda pada permukaan bebas. Selanjutnya fluida dianggap inviscid dan tak mempunyai tegangan permukaan, sehingga redaman hanya disebabkan oleh perubahan volume displacement yang ditimbulkan oleh timbul tenggelamnya benda terapung tersebut.

Tenaga yang dipindahkan pada gelombang (per cycle) ditunjukkan oleh energi flux dari gelombang sebagaimana dinyatakan dalam persamaan berikut :

$$E d\xi = \left( \frac{\rho g a_d^2 c_g}{2} \right) d\xi \quad (23)$$



(a) Osilasi Vertikal Strip  
(b) Radiasi Gelombang Permukaan

**Gambar 6. Redaman gelombang**

Dimana  $C_g$  adalah group gelombang (*group celerity*), yang secara matematis digambarkan:

$$C_g = \frac{d\omega}{dk} = \frac{d(kc)}{dk} = \frac{1}{2} C \left[ 1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)} \right] \quad (24)$$

dimana  $k$  adalah *wave number* dan berdasar asumsi penggunaan di laut dalam maka :

$$C_g \rightarrow \frac{c}{2} = \frac{\omega_n}{2k} \quad \text{dan} \quad k = \frac{\omega_n^2}{g} \quad (25)$$

Pada persamaan diatas,  $\omega_n$  menyatakan frekuensi natural benda.

Besarnya tenaga yang dipindahkan dalam perairan yang dalam adalah :

$$E d\xi = \frac{\rho g^2 a_d^2}{4\omega_n} d\xi \quad (26)$$

Daya yang hilang dalam air sama dengan hasil kali gaya redaman ( $dF_b$ ) dengan kecepatan vertikal benda ( $V_b$ ).

Bila  $A_b(\xi)$  menyatakan amplitudo gerakan benda/ strip pada posisi  $\xi$  dari titik berat benda, maka pada satu periode gelombang, besar daya yang hilang pada benda adalah :

$$dF_b V_b = dF_b \left( \frac{4A_b}{T_n} \right) = dF_b \left[ \frac{2A_b \omega_n}{\pi} \right] \quad (27)$$

dimana  $T_n$  adalah periode natural dan  $V_b$  adalah kecepatan vertikal rata-rata. Di sini amplitudo gelombang dan gerakan benda tidak harus sama. Karena daya yang hilang harus sama dengan yang diperoleh oleh air, maka pernyataan dalam persamaan (26) dan (27) diatas dapat disamakan sehingga :

$$dF_b V_b = 2E d\xi \quad (28)$$

dimana faktor angka 2 terjadi karena penjumlahan dua gelombang. Dengan menggabungkan persamaan (26), (27) dan (28) maka didapatkan gaya redaman per satuan panjang :

$$\frac{dF_b}{d\xi} = \frac{2E}{V_b} = \frac{\pi \rho g^2 A_b (a_d / A_b)^2}{4\omega_n^2} \quad (29)$$

karena gaya tersebut tergantung pada kecepatan vertikalnya, maka pembagian persamaan (29) dengan kecepatan vertikal rata-rata  $= 4 A_b / T_n$  menghasilkan gaya redaman per satuan kecepatan vertikal strip

$$\frac{dF_b}{d\xi} \frac{1}{V_b} = \frac{dN}{d\xi} = \frac{\pi^2 \rho g^2 (a_d / A_b)^2}{8\omega_n^3} \quad (30)$$

dimana  $N(\xi)$  adalah gaya redaman per satuan kecepatan vertikal, sehingga gaya redaman pada strip :

$$\frac{dF_b}{d\xi} = - \left( \frac{dN}{d\xi} \right) V_b \quad (31)$$

Total gaya redaman didapat dengan integrasi persamaan (31) terhadap panjang  $L$  :

$$F_b = \int_{-L/2}^{L/2} \left( \frac{dN}{d\xi} \right) V_b d\xi = - \frac{\pi^2 \rho g^2}{8\omega_n} \int_{-L/2}^{L/2} \bar{A}(\xi)^2 d\xi \quad (32)$$

Apabila  $b_n$  menyatakan besaran koefisien gaya redaman pada tiap strip, maka :

$$b_n = \frac{\rho \pi^2 g^2 \bar{A}(\xi)^2}{8\omega_n} \quad (33)$$

dimana  $\bar{A}(\xi)$  adalah harga rasio antara amplitudo gelombang dengan amplitudo gerakan benda strip ( $a_d / A_b$ ).

Untuk mendapatkan harga  $\bar{A}(\xi)$  mengingat luas penampang bagian HYCAT/strip berbeda-beda, diperoleh dengan menggunakan *Grim's theory* (Bhattacharya, 1978), merupakan fungsi dari frekuensi, perbandingan sarat dan lebar, dan koefisien blok.

Akibat gerakan kopel *heaving-pitching*, maka perumusan koefisien gaya redaman total HYCAT adalah sebagai berikut:

$$\text{Heaving : } b_H = \int_{-L/2}^{L/2} b_n d\xi \quad (34)$$

$$\text{Pitching : } b_P = \int_{-L/2}^{L/2} b_n x^2 d\xi \quad (35)$$

dimana,  $x$  = jarak dari tiap strip terhadap titik berat memanjang, LCG

#### 4.4.3 Gaya pengembali

Gaya pengembali adalah gaya yang membawa struktur kembali pada posisi kesetimbangannya. Gaya pengembali dalam gerakan *heaving* memberikan gaya apung tambahan yang bekerja pada struktur pada sarat terdalam. Gaya kekakuan atau pengembali ini besarnya sama dengan berat spesifik air dikalikan volume yang tenggelam. Sehingga gaya kekakuan atau pengembali adalah :

$$cz = \rho g A_w \quad (36)$$

dimana  $c$  adalah koefisien kekakuan dan  $z$  adalah simpangan pada titik berat struktur. Sehingga besarnya koefisien kekakuan atau pengembali sebesar  $\rho g A_w$  dan  $A_w$  adalah luasan struktur yang berada di garis air.

Sedangkan untuk momen pengembali gerakan *pitching* adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned} c\theta &= \rho g \int_{-L/2}^{L/2} x^2 y(x) dx \\ &= \rho g I_{yy} \\ &= \rho g \nabla \overline{MB}_L \theta \end{aligned} \quad (37)$$

untuk sudut kecil, maka :

$$c\theta = \Delta \overline{MG}_L \theta \quad (38)$$

dimana :

$c$  = koefisien momen pengembali

$$= \Delta \overline{MG}_L$$

$\theta$  = simpangan sudut gerakan *pitching*

$\Delta$  = displasmen

$\overline{MG}_L$  = tinggi *metacenter* memanjang

#### 4.4.4 Gaya dan momen eksitasi

Gerakan suatu benda pada suatu perairan yang tenang berbeda dengan gerakan benda tersebut di perairan yang bergelombang. Gelombang tersebut merupakan suatu gaya dan di sini besarnya berubah-ubah sebagai fungsi waktu. Gaya dan momen eksitasi untuk gerakan kopel *heaving-pitching* disebabkan oleh ketidakseimbangan gaya/momen akibat gelombang terhadap sumbu memanjang ( $y$ ) dari benda apung.

Gaya eksitasi *heaving* adalah :

$$F_\theta = \rho g \int_{-L/2}^{L/2} 2y\zeta dx \quad (39)$$

Momen eksitasi *pitching* adalah :

$$M_\theta = \rho g \int_{-L/2}^{L/2} 2y\zeta x dx \quad (40)$$

apabila  $\zeta$  merupakan fungsi persamaan gelombang permukaan, yaitu :

$$\zeta = \zeta_a \cos(kx \cos \mu - \omega_e t) \quad (41)$$

dan diasumsikan benda apung simetris terhadap bagian tengahnya, maka didapatkan:

Gaya eksitasi *heaving* adalah :

$$F_\theta = \left[ 2\rho g \zeta_a \int_{-L/2}^{L/2} y \sin(kx \cos \mu - \omega_e t) dx \right] \sin \omega_e t \quad (42)$$

Momen eksitasi *pitching* adalah :

$$M_\theta = \left[ 2\rho g \zeta_a \int_{-L/2}^{L/2} y x \sin(kx \cos \mu - \omega_e t) dx \right] \sin \omega_e t \quad (43)$$

kalau

diasumsikan :

$$F_\theta = F_o \sin \omega_e t \quad \text{dan} \quad (44)$$

$$M_\theta = M_o \sin \omega_e t$$

sehingga dapat dirumuskan :

Amplitudo gaya eksitasi :

$$F_o = 2\rho g \zeta_a \int_{-L/2}^{L/2} y \sin(kx \cos \mu - \omega_e t) dx \quad (45)$$

Amplitudo momen eksitasi :

$$M_o = 2\rho g \zeta_a \int_{-L/2}^{L/2} y x \sin(kx \cos \mu - \omega_e t) dx \quad (46)$$

dimana :

$\zeta_a$  = amplitudo gelombang

$x$  = jarak dari tiap strip terhadap LCG

$\mu$  = sudut antara arah gelombang dengan arah HYCAT

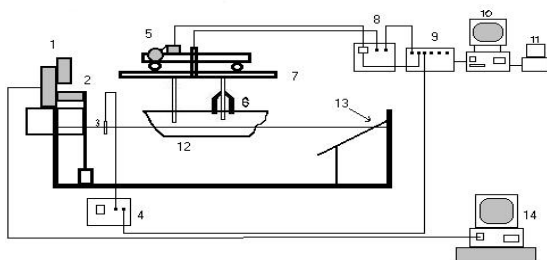
## 5. Percobaan

Model uji diletakkan dan diatur sesuai sarat yang diinginkan dan model tersebut harus even keel, sedangkan gelombang yang dipakai dalam arah *head sea*. Setelah kalibrasi dilakukan, maka model siap diuji dan gelombang siap untuk dibangkitkan. Dalam pengujian ini, untuk membangkitkan gelombang yang sesuai dengan karakteristik yang diinginkan, digunakan komputer VAX 3400 dengan 16 measurement channels dan *sample frequency* maksimum 100 Hz yang dihubungkan dengan perangkat *Analog System Dyna*



Test yang akan menggerakkan wave maker. Adapun urutan pengerjaan pengujian ini adalah sebagai berikut :

1. Selama proses pengujian, masing-masing tahap dilakukan perekaman data dengan jumlah rentang waktu yang sama yang akan dibaca oleh *load cell*, *displacement transducer*, dan *wave probe*.
2. Pada setiap pengujian, masing-masing hasilnya diberi nama file tersendiri dan konstanta kalibrasi dicatat.
3. Dari data-data yang diperoleh di atas akan dapat diketahui besaran gaya total, simpangan dan tinggi gelombang sebagai berikut :
  - Data-data hasil pembacaan *load cell* dikalikan dengan konstanta kalibrasi (CC) akan didapatkan besarnya gaya total.
  - Data-data hasil pembacaan *displacement transducer* dikalikan faktor kalibrasi akan diperoleh simpangan gerakan HYCAT *heaving-pitching* yang terjadi
  - Dari pembacaan seasim (pengukur tinggi gelombang) dikalikan faktor kalibrasinya akan diperoleh tinggi gelombang percobaan.



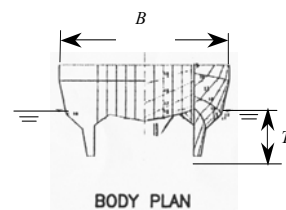
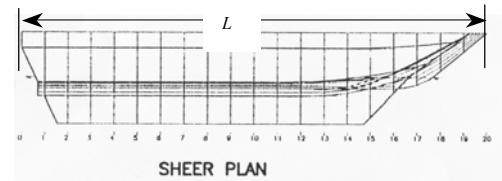
Gambar 7. Rangkaian peralatan percobaan

Keterangan :

1. wave maker
2. flap
3. wave probe
4. seasim amplifier
5. displacement transducer
6. load cell
7. load cell & displacement transducer amplifier
8. analog digital system
9. komputer
10. printer
11. model HYCAT
12. peredam gelombang
13. unit pengontrol wave maker

Tabel 1. Data-data model HYCAT dengan skala 1 : 9

Bagian	Ukuran
Panjang - $L$	2.733 m
Lebar - $B$	0.933 m
Sarat air - $T$	0.278 m
Displacement	159.117 kg
WSA	3.619 m <sup>2</sup>
Vol. Displacement	0.159 m <sup>3</sup>



Gambar 8. Geometri model HYCAT

4. Untuk mengetahui besarnya *added mass*, hasil pencatatan dari *displacement transducer* dimasukkan dalam persamaan simpangan, kecepatan dan percepatan struktur akibat gerakan *couple heaving-pitching*. Dimana dari persamaan simpangan diturunkan terhadap waktu akan diperoleh persamaan kecepatan dan dari persamaan kecepatan diturunkan lagi terhadap waktu akan diperoleh persamaan percepatan. Persamaan-persamaan tersebut dapat dituliskan sebagai berikut:

$$z = z_o \sin \omega t \quad (47)$$

$$\dot{z} = \frac{dz}{dt} = z_o \omega \cos \omega t = z_o \omega \sin(\omega t + \pi/2) \quad (48)$$

$$\ddot{z} = \frac{d^2z}{dt^2} = -z_o \omega^2 \sin \omega t = z_o \omega^2 \sin(\omega t + \pi) \quad (49)$$

sehingga kecepatan dan percepatan mempunyai sudut fase mendahului simpangan masing-masing  $\pi/2$  rad dan  $\pi$  radian. Dari substitusi persamaan (47) ke (49) didapatkan:

$$\ddot{z} = -z_o \omega^2 \quad (50)$$

$$\theta = \theta_o \sin \omega t \quad (51)$$

$$\dot{\theta} = \frac{d\theta}{dt} = \theta_o \omega \cos \omega t = \theta_o \omega \sin(\omega t + \pi/2) \quad (52)$$

$$\ddot{\theta} = \frac{d^2\theta}{dt^2} = -\theta_o \omega^2 \sin \omega t = \theta_o \omega^2 \sin(\omega t + \pi) \quad (53)$$

Dari substitusi persamaan (51) ke (53) didapatkan :

$$\ddot{\theta} = -\theta_o \omega^2 \quad (54)$$

Untuk mencari *added mass* besarnya gaya yang sefase dengan percepatan, komponen percepatan dan massa benda sebenarnya dimasukkan ke dalam persamaan dinamika benda terapung. Gaya redaman menjadi nol karena beda fase antara kecepatan dan percepatan sebesar  $\pi/2$  rad. Apabila massa benda sebenarnya adalah :

$$M = \rho V \quad (55)$$

Dimana  $V$  : volume benda

Maka koefisien *added mass* sendiri merupakan rasio antara *added mass* dibagi massa benda sebenarnya, yang dapat ditulis :

Maka koefisien *added mass* sendiri merupakan rasio antara *added mass* dibagi massa benda sebenarnya, yang dapat ditulis :

$$C_a = \frac{m}{M} = \frac{m}{\rho V} \quad (56)$$

Hasil penentuan *added mass* ini kemudian dibuatkan grafik yang berbasis periode gelombang dengan rentang 0.8 s/d 1.4 detik dan berordinat *added mass* pada kondisi sarat air 0.278 m, tinggi gelombang 0.1 m dan tiga variasi kecepatan model, yaitu : 4.432 m/det, 4.77 m/det dan 5.114 m/det.

Hasil percobaan ini kemudian diverifikasi dengan hasil perhitungan menggunakan teori strip dan selanjutnya dilakukan analisa.

## 6. Hasil dan Pembahasan

### 6.1 Hasil perhitungan teoritis

Dari perhitungan secara teoritis menggunakan teori strip diperoleh hasil sebagai berikut :

#### Kondisi kecepatan model 4.432 m/det

Pada Gambar 9 dapat dilihat, bahwa besarnya *added mass heaving* berada pada rentang 31.051 s/d 40.828 kg, sedangkan pada Gambar 10, nilai *added mass pitching* berada pada rentang 10.657 s/d 12.724 kgm<sup>2</sup>.

#### Kondisi kecepatan model 4.77 m/det

Pada Gambar 11 dapat dilihat, bahwa besarnya *added mass heaving* berada pada rentang 28.375 s/d 34.561 kg, sedangkan pada Gambar 12, nilai *added mass pitching* berada pada rentang 8.819 s/d 10.891 kgm<sup>2</sup>.

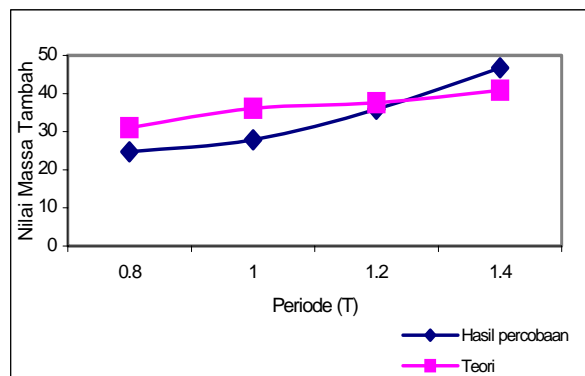
#### Kondisi kecepatan model 5.114 m/det

Pada Gambar 13 dapat dilihat, bahwa besarnya *added mass heaving* berada pada rentang 23.154 s/d 29.532 kg, sedangkan pada Gambar 14, nilai *added mass pitching* berada pada rentang 7.255 s/d 9.165 kgm<sup>2</sup>.

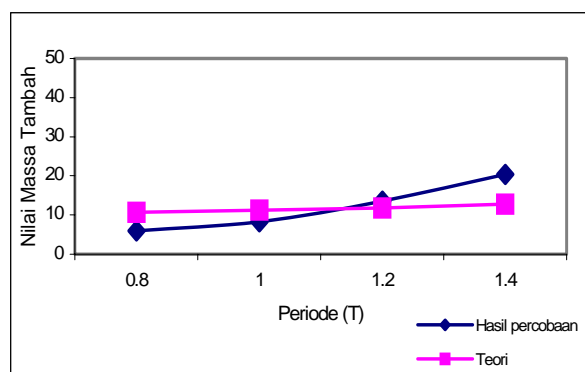
## 6.2 Hasil percobaan

#### Kondisi kecepatan model 4.432 m/det

Pada Gambar 9 dapat dilihat, bahwa besarnya *added mass heaving* berada pada rentang 24,67 s/d 46,68 kg. Perbedaan antara hasil perhitungan teoritis dengan hasil percobaan adalah -14,33% s/d 20,56%. Sedangkan pada Gambar 10, nilai *added mass pitching* berada pada rentang 5,98 s/d 20,35 kgm<sup>2</sup>. Perbedaan antara hasil perhitungan teoritis dengan hasil percobaan adalah -59,93% s/d 43,89%.



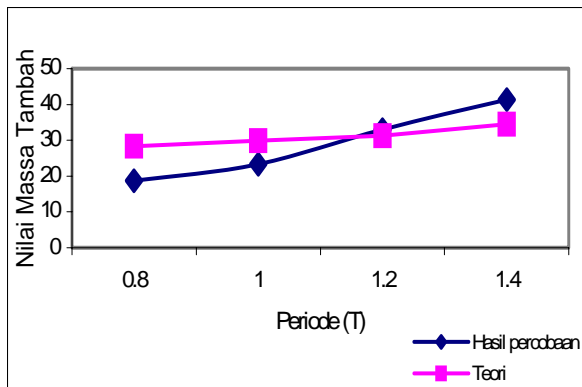
Gambar 9. Grafik perbandingan *added mass heaving* hasil percobaan dan teori utk  $u = 4.432$  m/dt



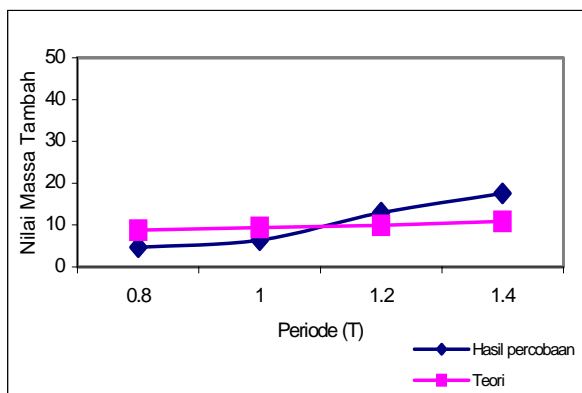
Gambar 10. Grafik perbandingan *added mass pitching* hasil percobaan dan teori utk  $u = 4.432$  m/dt

### Kondisi kecepatan model 4.77 m/det

Pada Gambar 11 dapat dilihat, bahwa besarnya *added mass heaving* berada pada rentang 18,72 s/d 41,31 kg. Perbedaan antara hasil perhitungan teoritis dengan hasil percobaan adalah -19,53% s/d 34,03%. Sedangkan pada Gambar 12, nilai *added mass pitching* berada pada rentang 4,68 s/d 17,54 kgm<sup>2</sup>. Perbedaan antara hasil perhitungan teoritis dengan hasil percobaan adalah -61,05% s/d 46,93%.



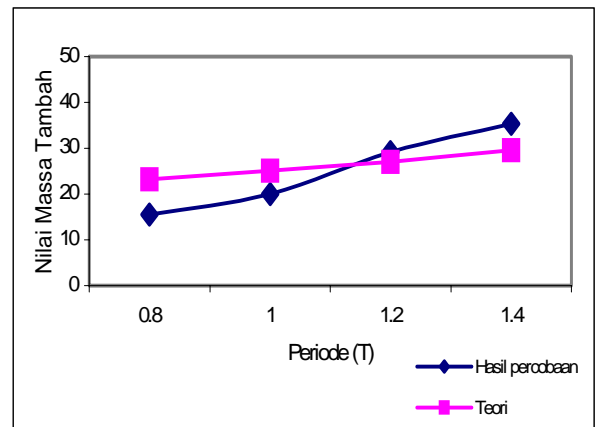
Gambar 11. Grafik perbandingan *added mass heaving* hasil percobaan dan teori utk  $u = 4.77$  m/dt



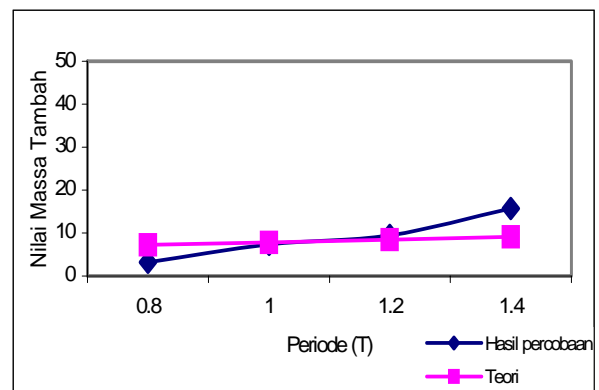
Gambar 12. Grafik perbandingan *added mass pitching* hasil percobaan dan teori utk  $u = 4.77$  m/dt

### Kondisi kecepatan model 5.114 m/det

Pada Gambar 13 dapat dilihat, bahwa besarnya *added mass heaving* berada pada rentang 15,51 s/d 35,28 kg. Perbedaan antara hasil perhitungan teoritis dengan hasil percobaan adalah -19,46% s/d 32,87%. Sedangkan pada Gambar 14, nilai *added mass pitching* berada pada rentang 3,17 s/d 15,72 kgm<sup>2</sup>. Perbedaan antara hasil perhitungan teoritis dengan hasil percobaan adalah -71,52% s/d 56,31



Gambar 13. Grafik perbandingan *added mass heaving* hasil percobaan dan teori utk  $u = 5.114$  m/dt



Gambar 14. Grafik perbandingan *added mass pitching* hasil percobaan dan teori utk  $u = 5.114$  m/dt

Dari hasil perhitungan secara teoritis maupun hasil percobaan, terjadi kecenderungan kenaikan harga *added mass* seiring dengan bertambahnya periode gelombang. Sedangkan dengan naiknya kecepatan model HYCAT terjadi penurunan besaran *added mass*. Kondisi ini dapat dipahami bahwa pada struktur HYCAT akan mengalami peningkatan *lift force*, sehingga luasan permukaan bidang garis air akan mengecil. Hal tersebut menunjukkan bahwa besaran *added mass* sangat bergantung pada periode dan kecepatan struktur HYCAT.

Perbedaan antara hasil perhitungan secara teoritis dengan hasil percobaan disebabkan antara lain karena pengambilan asumsi aliran 2-D (dua dimensi) dan fluida dianggap *inviscid* pada teori strip, padahal pada percobaan aliran fluida yang terjadi adalah 3-D (tiga dimensi) dan fluida mempunyai viskositas tertentu.

## **7. Kesimpulan**

1. Hasil perhitungan secara teoritis maupun hasil percobaan menunjukkan trend grafik yang sama, yaitu kenaikan harga *added mass* seiring dengan bertambahnya periode gelombang. Sedangkan pada kondisi kecepatan HYCAT bertambah cepat terjadi penurunan besaran *added mass*.
2. Besaran *added mass* sangat bergantung dari perubahan kondisi periode gelombang dan kecepatan struktur HYCAT.
3. Perbedaan nilai *added mass* antara percobaan dan teoritis disebabkan antara lain karena pengambilan asumsi aliran 2-D (dua dimensi) dan fluida dianggap *inviscid* pada teori strip, padahal pada percobaan aliran fluida yang terjadi adalah 3-D (tiga dimensi) dan fluida mempunyai viskositas tertentu.

## **Daftar Pustaka**

- Arii T., Miyata H., dan Kawaguchi, 1993, "*Development of a Foil-Assisted Catamaran Superjet-30*", FAST'93.
- Bhattacharyya, R., 1978, "*Dynamic of Marine Vehicles*", John Wiley and Sons Inc., New York.
- Callisal, S.M. and Sabuncu, T., 1989, "*Study of a Heaving Vertical Cylinder in Towing Tank*", Journal of Ship Research, Vol. 33 No. 2.
- Chakrabarti, S.K., 1987, "*Hydrodynamics of Offshore Structures*", Springer Verlag, Berlin.
- Dawson, T.H., 1983, "*Offshore Structural Engineering*", Prentice-Hall, Inc., New Jersey.
- Faltinsen, O.M., 1990, "*Sea loads on Ships and Offshore Structures*", Department of Marine Technology, Cambridge University Press, London.
- Le Mehaute, B., 1976, "*An Introduction to Hydrodynamics and Water Waves*", Springer-Verlag, New York.
- Mc. Cormick, Michael, E., 1989, "*Ocean Engineering Wave Mechanic*", John Wiley & Sons, New York.
- Mikkelsen, J. and Callisal S.M., 1993, "*An Experimental Study of Hydrodynamics of Cylindrical Structures*", Marine Structures Vol. 6, pp. 259-277, Dept. of Mechanical Engineering, Univ. of British Columbia, Vancouver BC, Canada.
- Murtedjo, Mas, 1997, "*Studi Eksperimental Massa Tambah dan Koefisien Redaman Struktur Silinder Konfigurasi T Akibat Gerakan Heaving*", Jurnal IPTEK-ITS, Vol. 8, No. 3.
- Murtedjo, Mas, 2002, "*Studi Eksperimental Added Resistance HYCAT Akibat Gerakan Kopel Heaving-Pitching pada Gelombang Regular*", Jurnal IPTEK-ITS, Vol.13, No.1.