

Prediksi Peredaman Gelombang Permukaan yang Menjalar Melewati Hutan Mangrove

Muliddin^{1*} dan Denny Nugroho Sugianto²

¹⁾ Jurusan Fisika FMIPA Unhalu, Kampus Bumi Tridharma, Anduonohu, Kendari
e-mail: muliddin@plasa.com

²⁾ Program Studi Oseanografi, Jurusan Ilmu Kelautan FPIK UNDIP Semarang
e-mail: dennysugianto@yahoo.com

Abstrak

Penelitian ini dilakukan sebagai upaya untuk penelusuran keefektifan hutan mangrove dalam mereduksi penjalaran energi gelombang melalui model analitik. Disipasi energi dalam domain frekuensi ditentukan dengan meninjau hutan mangrove sebagai medium acak yang memiliki karakteristik tertentu dengan menggunakan ukuran dan lokasi dari batang-batang pohon mangrove. Persamaan pengatur nonlinier dilinierisasi dengan menggunakan konsep minimalisasi dalam tinjauan stokastik dan interaksi antara batang dan akar-akar mangrove diperkenalkan melalui modifikasi koefisien gesek. Contoh-contoh perhitungan sebagai penerapan dari model analitik ini dilakukan pada jenis mangrove *Rhizophora* dan *Ceriops*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peredaman energi gelombang tergantung pada kerapatan hutan mangrove dan tergantung pula pada diameter dari batang dan akar mangrove.

Kata kunci : model analitik, hutan mangrove, peredaman energi gelombang

Abstract

This research conduct the analytical model to predict the attenuation of wind-induced random surface waves that propagate through the mangrove forest. The energy dissipation in the frequency domain is determined by treating the mangrove forest as a random media with certain characteristics using the geometry of mangrove trunks and their locations. Initial nonlinear governing equations are linearized using the concept of minimalization in the stochastic sense and interactions between mangrove trunks and roots have been introduced through the modification of the drag coefficients. Examples of calculations of this analytical model was carried out for mangrove forests which occupied by *Rhizophora* and *Ceriops* species. The resulting rate of wave energy attenuation depends strongly on the density of the mangrove forest, and on diameter of mangrove roots and trunks.

Key word : analytical model, mangrove forest, wave energy attenuation

Pendahuluan

Gelombang yang dibangkitkan oleh angin adalah salah satu sumber utama dalam transfer energi ke daerah pesisir dan merupakan penyebab utama dalam proses perubahan pantai. Gelombang yang menimbulkan arus sejajar pantai menyebabkan pergerakan material-material sepanjang pantai sehingga terjadi erosi atau akresi pantai serta kerusakan pada struktur pantai ketika terjadi badai.

Bencana laut lainnya adalah tsunami yang setiap saat berpotensi memporak-porandakan pantai yang menghadap langsung ke daerah pertemuan lempeng (subduksi) dan yang menghadap ke gunung api bawah laut aktif, seperti Krakatau (Latief dkk, 2000).

Untuk menanggulangi masalah tersebut biasanya dibangun proteksi pantai seperti pemecah gelombang (*breakwater*) dan dinding laut (*sea wall*). Bangunan-bangunan tersebut memainkan peranan penting dalam mengurangi energi gelombang di pantai serta melindungi pantai dari kerusakan akibat adanya bencana alam. Namun demikian, disamping pembangunan fisik yang menghabiskan dana yang sangat besar juga menimbulkan masalah lingkungan berupa terputusnya ekosistem laut-darat bagi hewan atau tumbuhan yang hidup di daerah pantai.

Saat ini mulai direalisasikan penggunaan vegetasi sebagai penyangga yang berfungsi untuk mereduksi gempuran gelombang badai dan tsunami. Mangrove

terbukti memainkan peran penting dalam melindungi pesisir dari gempuran badai dan tsunami (Mazda dkk, 1997; Brinkman dkk, 1997; dan Massel dkk, 1999). Penggunaan mangrove sebagai pelindung pantai sangat ekonomis dan efektif dari sudut pandang perawatan dalam jangka waktu lama serta berwawasan lingkungan, yaitu: sebagai tempat perkembangbiakan biota laut, berfungsi sebagai filter terhadap penetrasi air laut, dan tempat tinggal unggas. Daun-daun vegetasi ini dapat berfungsi sebagai filter untuk menahan pasir-pasir yang diterbangkan oleh tiupan angin di pantai, sehingga udara di belakang daerah hutan penyangga ini menjadi bersih (Conacher dkk, 1996).

Hutan mangrove dimana banyak tumbuh di pantai-pantai di Indonesia adalah salah satu yang mungkin dapat digunakan sebagai hutan pelindung. Karena kekuatan akar-akarnya maka mangrove ini merupakan penyangga yang sangat efektif untuk melawan terjangan gelombang besar. Namun demikian, evaluasi secara kuantitatif mengenai kemampuan mangrove dalam meredam terjangan gelombang besar masih sedang diteliti serta belum terformulasikan dengan baik (Latief dkk, 2000 dan Harada dkk, 2000), sehingga belum ada acuan yang tersedia tentang efektivitas vegetasi mereduksi gelombang besar, untuk itu sangat perlu diteliti mengenai keefektifitasannya, baik melalui model fisik di laboratorium hidrolika maupun melalui model analitik dan numerik yang kemudian diverifikasi di lapangan.

Dalam artikel ini dilakukan penelusuran keefektifan hutan mangrove dalam mereduksi energi gelombang melalui model analitik. Simulasi dilakukan dengan melakukan variasi terhadap karakteristik fisik dari mangrove seperti diameter batang, kerapatan (densitas), dan ketebalan hutan. Dari simulasi ini dapat diperoleh konfigurasi hutan mangrove yang optimal dalam mereduksi energi gelombang yang diakibatkan oleh badai.

Metode Penelitian

Penelitian ini merupakan kajian teoritik (model analitik) yang mengacu pada konsep yang

$$\Phi(x,z,t) = \Re \int_0^{\infty} \left(\frac{-ig}{\omega} \right) \exp(-i\omega t) \left\{ [\exp(ikx) - \exp(-ikx)] \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} + \sum_{\alpha} M_{\alpha} \exp(\alpha x) \frac{\cos \alpha(z+h)}{\cos \alpha h} \right\} dA(\omega) \quad (1)$$

dimana bilangan gelombang α harus memenuhi hubungan dispersi berikut

$$\omega^2 + g \alpha \tan(\alpha h) = 0 \quad (2)$$

dikemukakan oleh Massel dkk, 1999, dilakukan di Laboratorium Fisika Lanjut FMIPA Unhalu pada bulan April - Oktober 2003. Metode yang digunakan dimulai dari kajian teoritis tentang proses fisis dan deskripsi/ analisis matematika dari interaksi gelombang dengan mangrove sampai pada pemodelan analitik dan simulasi komputer dari proses tersebut.

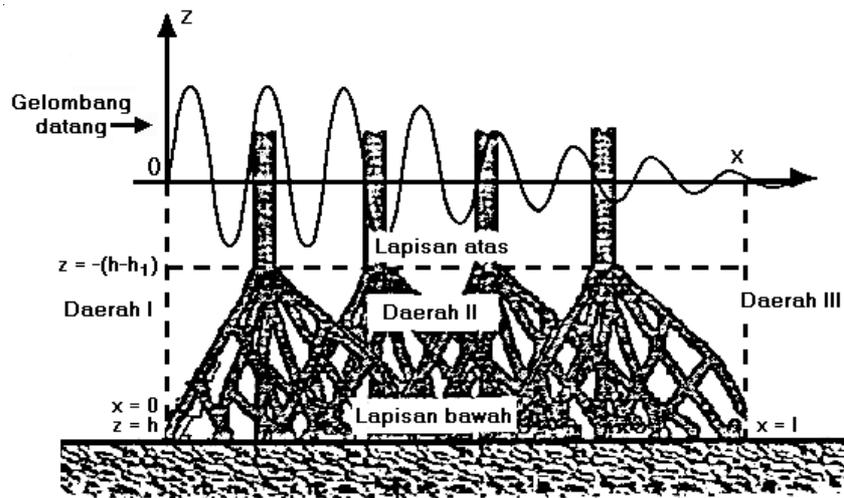
Secara singkat, penelitian ini dilaksanakan dengan tahapan sebagai berikut :

- a Kaji literatur tentang proses fisis di dalam hutan mangrove.
- b Perumusan model matematik.
- c Penyusunan program komputer (*computer programming*) dari model yang disebut pada butir (b).
- d Simulasi model dengan input dari data asimilasi (sintetik). Input dari simulasi ini yang sekaligus merupakan variabel utama dalam penelitian ini adalah energi gelombang datang, diameter batang, densitas dan tebal hutan mangrove. Simulasi dilakukan dengan memvariasikan input agar besarnya energi gelombang yang dapat diredam oleh hutan mangrove dan karakteristik hutan mangrove yang efektif meredam gelombang dapat diprediksi.

Persamaan Pengatur dan Solusi Analitik

Kita ambil titik pusat sistem koordinat $O(x,z)$ terletak di permukaan bebas rata-rata dari fluida, dan sumbu-sumbu dipilih sedemikian sehingga koordinat- x adalah horisontal dan koordinat- z adalah vertikal (Gambar 1). Rentetan gelombang acak searah yang datang tegak lurus terhadap daerah mangrove disajikan dalam bentuk spektrum frekuensi, $S(\omega)$. Kedalaman air diasumsikan konstan, h , dan ketebalan daerah mangrove sama dengan l .

Di depan hutan mangrove (Daerah I : $-\infty < x < 0; -h < z < 0$) medan gelombang terdiri dari gelombang datang dan gelombang yang dipantulkan dari hutan mangrove. Potensial kecepatan di daerah ini mengambil bentuk (Massel, 1996) :



Gambar. 1. Sistem koordinat (Massel, 1999)

Hubungan dispersi (2) memiliki sejumlah tak terhingga akar-akar riil diskrit α_n dan sepasang akar imajiner $\alpha_n = \pm ik$. Namun demikian, hanya akar-akar riil positif α_n dan akar imajiner $\alpha_0 = -ik$ negatif yang memiliki arti fisis.

Gerak gelombang di dalam hutan mangrove (Daerah II : $0 < x < l$; $-h < z < 0$) mengalami disipasi kuat

$$\frac{\partial \bar{u}_2}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \nabla(P_2 + \rho g z) - \frac{1}{\rho} \bar{F} \tag{3}$$

dimana $\bar{u}_2 = (u_2, w_2)$ adalah vektor kecepatan yang diinduksikan oleh gelombang di Daerah II, p adalah tekanan dinamik and \bar{F} adalah vektor gaya (per satuan volume).

$$\frac{1}{\rho} \bar{F}(x, t) \approx f_e \omega_p \bar{u}_2(x, z) \tag{4}$$

Koefisien linearisasi f_e dapat ditentukan melalui minimalisasi error rata-rata yang muncul pada saat suku

$$f_e = \frac{1}{\omega_p} \sqrt{\frac{2}{\pi}} \left\{ \frac{\int_0^l \int_{-h}^{-(h-h_1)} \bar{D}_l N_l C_d^{(m)}(\text{Re}, x, z) \sigma_{u_2}^3 dx dz}{\int_0^l \int_{-h}^0 \sigma_{u_2}^2 dx dz} + \frac{\int_0^l \int_{-(h-h_1)}^0 \bar{D}_u N_u C_d^{(m)}(\text{Re}, x, z) \sigma_{u_2}^3 dx dz}{\int_0^l \int_{-h}^0 \sigma_{u_2}^2 dx dz} \right\} \tag{5}$$

Untuk mendefinisikan potensial kecepatan v_2 harus diperhatikan bahwa di dalam daerah mangrove, selain gelombang berjalan dan gelombang yang dipantulkan dari ujung $x = l$, akan ada suatu set gangguan.

$$\Phi_2(x, z, t) = \Re \int_{-\infty}^{\infty} \frac{g \exp(-i\omega t)}{\omega \left(i - f_e \frac{\omega_p}{\omega} \right)} \times \sum_{\psi} \left\{ [P_{\psi} \exp(-\psi x) + Q_{\psi} \exp(\psi x)] \frac{\cos \psi(z+h)}{\cos \psi h} \right\} dA_{\psi}(\omega) \tag{6}$$

akibat interaksinya dengan batang-batang mangrove dan friksi dasar. Akan tetapi, dalam kajian ini, kita hanya akan memusatkan perhatian pada interaksi gelombang permukaan dengan batang dan akar-akar mangrove. Karena itu, persamaan momentum untuk gerak yang mengalami disipasi dapat dituliskan sebagai berikut (Massel, 1999):

Solusi analitik dari persamaan (3) hanya mungkin ada setelah dilakukan linierisasi, yakni (Massel, 1999):

non-linier diganti dengan suku linier (Massel, 1999):

Gangguan-gangguan tersebut melemah dengan bertambahnya jarak dari kedua batas ($x = 0$ and $x = l$). Oleh karena itu, potensial kecepatan untuk gerak gelombang di dalam hutan mangrove mengambil bentuk (Massel, 1999):

dimana bilangan gelombang kompleks ψ adalah solusi

$$\omega^2 \left(1 + i f_e \frac{\omega_p}{\omega} \right) + g \psi \tan(\psi h) = 0 \tag{7}$$

Di belakang hutan mangrove (Daerah III : $x > l$; $-h < z < 0$), kita asumsikan bahwa hanya ada gelombang berjalan yang menjalar meninggalkan

$$\Phi_3(x, z, t) = \Re \int_{-\infty}^{\infty} \left(\frac{-i g \exp(-\omega t)}{\omega} \right) \times \sum_{\alpha} T_{\alpha} \exp[\alpha(l-x)] \frac{\cos \alpha(z+h)}{\cos \alpha h} dA_i(\omega) \tag{8}$$

Untuk menentukan koefisien-koefisien yang tidak diketahui M_{α} , T_{α} , P_{ψ} dan Q_{ψ} , digunakan syarat batas di $x=0$ dan $x=l$, yaitu, potensial-potensial $\Phi_1(x, z, t)$, $F_2(x, z, t)$ dan $\Phi_3(x, z, t)$ harus memenuhi adanya

$$\Phi_{1r}(x, t) = \Re \int_{-\infty}^{\infty} \frac{-ig}{\omega} \exp(-i\omega t) \sum_{\alpha} \tilde{M}_{\alpha} e^{\alpha x} \frac{\cos \alpha(z+h)}{\cos \alpha h} dA(\omega) \tag{9}$$

dimana :

$$\tilde{M}_{\alpha} = \begin{cases} M_k - 1 & \text{at } \alpha = -ik \\ M_{\alpha} & \text{at } \alpha \neq -ik \end{cases} \tag{10}$$

Sehingga, elevasi permukaan dari gelombang pantul

$$\zeta_{1r}(x, t) = \Re \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i\omega t} \sum_{\alpha} \tilde{M}_{\alpha} e^{\alpha x} dA(\omega) \tag{11}$$

dan spektrum frekuensi $S_r(\omega, x)$ untuk gelombang-gelombang yang dipantulkan dari hutan mangrove

$$S_r(\omega, x) = \left| \sum_{\alpha} \tilde{M}_{\alpha} e^{\alpha x} \right|^2 S_i(\omega) \tag{12}$$

Karena adanya mode-mode *evanescent* (pada saat $\alpha \neq -ik$), maka spektrum $S_r(\omega, x)$ bergantung pada jarak dari hutan mangrove. Akan tetapi, pada jarak yang cukup besar dari hutan mangrove, mode-mode

$$S_r(\omega, x) \Big|_{x \rightarrow -\infty} = |M_k(\omega) - 1|^2 S_i(\omega) \tag{13}$$

Dengan cara yang sama diperoleh bahwa spektrum gelombang yang ditransmisikan melewati hutan

$$S_t(\omega, x) \Big|_{x \rightarrow \infty} = |T_k(\omega)|^2 S_i(\omega) \tag{14}$$

dari hubungan dispersi berikut :

hutan mangrove. Oleh karena itu, potensial kecepatan ϕ_3 mengambil bentuk (Massel, 1999) :

kontinuitas tekanan dan kecepatan horisontal.

Potensial kecepatan untuk gelombang yang dipantulkan dari hutan mangrove dapat disajikan sebagai (Massel, 1999) :

adalah (Massel, 1999) :

mengambil bentuk (Massel, 1996) :

tersebut tidak tampak dan hanya gelombang-gelombang pantul berjalan (pada saat $\alpha = -ik$) yang teramati. Dengan mengambil limit $x \rightarrow -\infty$ dalam persamaan (12) diperoleh (Massel, 1999) :

mangrove adalah (Massel, 1999) :

Spektrum (13) dan (14) selanjutnya digunakan untuk menentukan koefisien-koefisien refleksi dan transmisi K_r dan K_t . Analogi dengan gelombang-gelombang

$$K_r = \frac{\sigma_r}{\sigma_i} = \frac{\left\{ \int_0^\infty S_r(\omega) d\omega \right\}^{1/2}}{\left\{ \int_0^\infty S_i(\omega) d\omega \right\}^{1/2}} \quad \text{dan} \quad K_t = \frac{\sigma_t}{\sigma_i} = \frac{\left\{ \int_0^\infty S_t(\omega) d\omega \right\}^{1/2}}{\left\{ \int_0^\infty S_i(\omega) d\omega \right\}^{1/2}} \quad (15)$$

dimana $S_i(\omega)$, $S_r(\omega)$ dan $S_t(\omega)$, secara berturut-turut menyatakan spektrum gelombang datang, gelombang pantul dan gelombang transmisi. σ_r , σ_r dan σ_t adalah

$$K_r^2 + K_t^2 + K_{dis}^2 = 1 \quad (16)$$

dimana K_{dis} adalah koefisien disipasi energi.

Penerapan Solusi Analitik Hutan Mangrove Spesies Rhizophora

Ciri fisis utama dari mangrove spesies *Rhizophora* adalah akar-akarnya dapat mencapai ketinggian tertentu dari dasar perairan. Dalam tinjauan ini ketinggian akar diasumsikan mencapai 0,3 meter. Dengan demikian perairan yang didiami mangrove terdiri dari dua lapis, yakni lapisan atas (tebal 0,7 meter) yang didiami oleh batang dan lapisan bawah (tebal 0,3 meter) didiami oleh akar-akar mangrove.

Parameter-parameter hutan mangrove diasumsikan sebagai berikut: tebal (lebar) hutan $l =$

monokromatik kita mengadopsi sajian-sajian berikut untuk koefisien refleksi K_r dan koefisien transmisi K_t (Massel, 1999) :

standar deviasi. Kekekalan energi gelombang mensyaratkan adanya kesetimbangan energi yang harus memenuhi sajian berikut (Massel, 1999) :

50 m, kedalaman air $h = 1$ m, rata-rata diameter batang di lapisan atas $D_u = 0.08$ m, dan rata-rata diameter batang di lapisan bawah $D_l = 0.02$ m. Kerapatan hutan mangrove diambil dua macam yaitu kerapatan rendah dan kerapatan tinggi. Untuk kerapatan rendah diambil jumlah batang di lapisan atas $N_u = 1/m^2$ dan jumlah batang di lapisan bawah $N_l = 9/m^2$. Sedangkan untuk kerapatan tinggi diambil jumlah batang di lapisan atas $N_u = 16/m^2$ dan jumlah batang di lapisan bawah $N_l = 49/m^2$.

Gelombang datang yang menerpa hutan mangrove dikarakterisasi oleh spektrum frekuensi untuk perairan dangkal seperti berikut (Massel, 1971) :

$$S(\omega) = \frac{\sigma_\zeta^2}{\omega_p} \left\{ 1.835 \exp \left[-22.222 \left(\frac{\omega}{\omega_p} - 1 \right)^2 \right] + 4.211 \left(\frac{\omega}{\omega_p} \right)^{-5} \exp \left[-7.987 \left(\frac{\omega}{\omega_p} \right)^{-8} \right] \right\} \quad (17)$$

dengan tinggi gelombang signifikan $H_s = 0.6$ m, frekuensi puncak $\omega_p = 2\pi / 5$ dan periode gelombang T_p yang sesuai dengan ω_p adalah $T_p = 5$ s

Normalisasi energi sebagai fungsi jarak dari depan hutan mangrove ditentukan melalui (Massel, 1999) :

$$E_{norm}(x) = \frac{\sigma_\zeta^2(x)}{\sigma_{\zeta i}^2} \quad (18)$$

dimana $\sigma_\zeta^2(x)$ mempresentasikan energi gelombang pada jarak x dari depan mangrove dan $\sigma_{\zeta i}^2$ adalah

energi gelombang datang.

Dengan asumsi bahwa kedua komponen kecepatan yang diinduksikan-gelombang merupakan kuantitas acak dengan densitas probabilitas normal,

$$\bar{u} = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \sigma_u \quad \text{dan} \quad \bar{w} = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \sigma_w \tag{19}$$

dimana σ_u dan σ_w adalah deviasi standar dari komponen kecepatan horisontal dan vertikal.

diperoleh residu rata-rata dari komponen kecepatan horisontal (u) dan kecepatan vertikal (w) sebagai (Massel, 1999) :

parameter yang lain diasumsikan sama seperti pada kasus di atas.

Hutan Mangrove Spesies Ceriops

Berbeda dengan spesies *Rhizophora*, akar dari mangrove spesies *Ceriops* ini tidak ada yang muncul di permukaan dasar perairan. Dengan demikian, dalam tinjauan ini batang mangrove dianggap vertikal lurus ke atas dan air laut hanya terdiri dari satu lapis.

Dalam kasus ini diambil dua jenis diameter batang yaitu $D = 0.02$ m dan $D = 0.08$ m. Untuk masing-masing diameter batang diambil kerapatan hutan mangrove yang berbeda-beda. Di sini, diambil dua jenis kerapatan untuk kerapatan rendah yaitu $N = 1/m^2$ dan $N = 9/m^2$ sedangkan untuk kerapatan tinggi diambil $N = 16/m^2$ dan $N = 49/m^2$. Parameter-

Hasil Dan Pembahasan

Hutan Mangrove Spesies Rhizophora

Untuk spektrum gelombang datang dan parameter-parameter mangrove yang diberikan pada Tabel 1 diperoleh koefisien linierisasi $f_e = 0.057$ untuk hutan mangrove kerapatan rendah dan $f_e = 0.35$ untuk kerapatan tinggi. Diperoleh pula bahwa untuk hutan mangrove kerapatan rendah koefisien refleksi $K_r = 0.024$ dan koefisien transmisi $K_t = 0.534$ yang berarti bahwa 84,52% energi gelombang terdisipasi di dalam hutan mangrove, sedangkan koefisien refleksi dan koefisien transmisi untuk kerapatan tinggi diperoleh $K_r = 0.084$ dan $K_t = 0.023$ yang mengindikasikan adanya disipasi energi gelombang sebesar 99,62%.

Tabel 1. Hasil-hasil yang diperoleh untuk mangrove spesies *Rhizophora*

| Diameter Batang (m) | Jumlah Batang (per m ²) | Porositas n_p | Koefisien Linierisasi f_e | Koefisien Refleksi K_r | Koefisien Transmisi K_t | Disipasi Energi (%) |
|---------------------|-------------------------------------|-----------------|-----------------------------|--------------------------|---------------------------|---------------------|
| $D_u = 0,08$ | $N_u = 1$ | 0,9956 | 0,0570 | 0,024 | 0,534 | 84,52 |
| $D_l = 0,02$ | $N_l = 9$ | | | | | |
| $D_u = 0,08$ | $N_u = 16$ | 0,9391 | 0,3500 | 0,084 | 0,023 | 99,62 |
| $D_l = 0,02$ | $N_l = 49$ | | | | | |

Hasil-hasil lain yaitu spektrum gelombang di tiga tempat dalam hutan mangrove ditunjukkan pada Gambar 2, normalisasi energi sebagai fungsi dari jarak dalam hutan mangrove ditunjukkan pada Gambar 3, dan profil vertikal dari kecepatan orbital residu rata-rata dalam hutan mangrove ditunjukkan pada Gambar 4 dan 5.

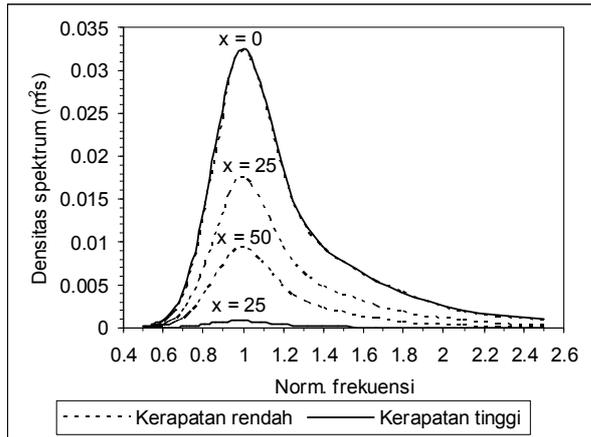
Pada Gambar 2 nampak bahwa puncak spektrum gelombang semakin berkurang dengan bertambahnya jarak dari depan mangrove, baik untuk kerapatan rendah maupun kerapatan tinggi. Penurunan yang cepat terjadi pada kerapatan tinggi, dimana puncak spektrum sudah mendekati nol pada jarak 25 m dan pada jarak 50 m tidak nampak lagi, yang berarti bahwa peredaman energi gelombang terjadi sangat cepat

dengan bertambahnya jarak dari depan mangrove dan di belakang hutan mangrove energi gelombang kecil dan dapat diabaikan.

Adanya peredaman gelombang di dalam hutan mangrove juga ditunjukkan pada Gambar 3. Pada gambar ini diplot normalisasi energi, yakni perbandingan antara energi gelombang di dalam hutan mangrove dan energi gelombang datang, sebagai fungsi jarak dari depan mangrove. Nampak bahwa laju peredaman energi gelombang di dalam hutan mangrove meningkat dengan bertambahnya jarak dari depan mangrove. Laju peredaman ini juga dipengaruhi oleh kerapatan hutan mangrove, dimana nampak bahwa untuk hutan mangrove kerapatan tinggi normalisasi energi sudah menuju nol pada jarak 30

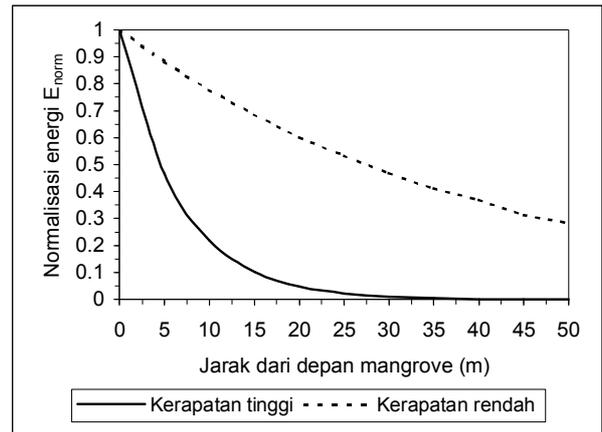
meter dari depan mangrove, sementara untuk kerapatan rendah normalisasi energi masih berharga 0,285 pada jarak 50 meter dari depan mangrove.

Profil vertikal dari kecepatan orbital residu rata-rata u dan w di tiga penampang dalam hutan mangrove ditunjukkan pada Gambar 4 untuk kerapatan rendah dan Gambar 5 untuk kerapatan tinggi. Pada kedua gambar tersebut nampak bahwa profil kecepatan

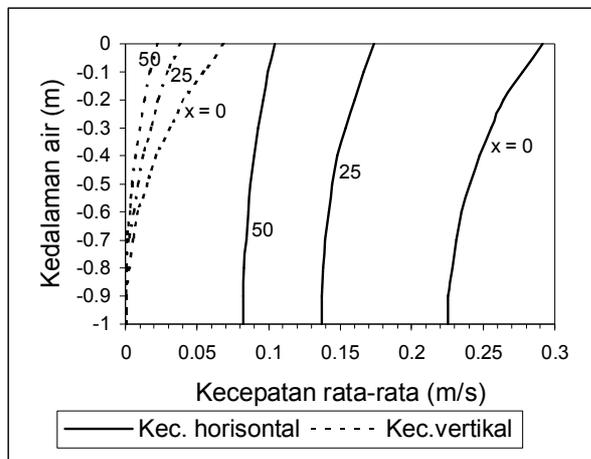


Gambar 2. Spektrum gelombang di dalam hutan mangrove spesies *Rhizophora*

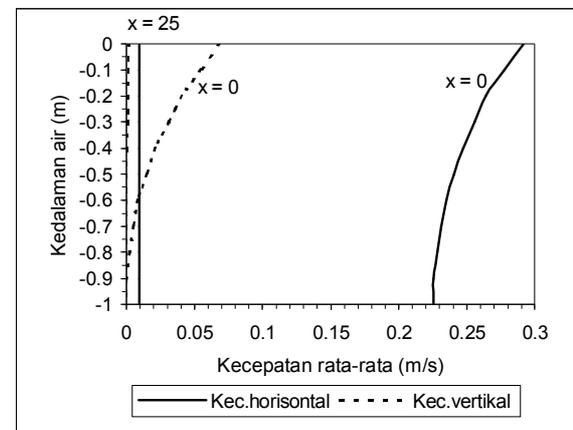
horizontal hampir uniform secara vertikal dan profil kecepatan vertikal berubah secara linier dengan kedalaman. Dalam penelitian ini rasio panjang gelombang terhadap kedalaman air relatif besar, yaitu $L/h = 16$. Nampak pula bahwa dengan bertambahnya kerapatan kedua komponen kecepatan teredam sangat cepat dengan bertambahnya jarak dari depan mangrove, dan dibelakang hutan mangrove dapat diabaikan.



Gambar 3. Normalisasi energi di dalam hutan mangrove Spesies *Rhizophora*



Gambar 4. Profil vertikal kecepatan orbital residu rata-rata di dalam hutan mangrove spesies *Rhizophora* dengan kerapatan rendah



Gambar 5. Profil vertikal kecepatan orbital residu rata-rata di dalam hutan mangrove spesies *Rhizophora* dengan kerapatan tinggi

Hutan Mangrove Spesies *Ceriops*

Kerapatan Rendah

Sebagaimana dijelaskan di atas bahwa untuk hutan mangrove kerapatan rendah ini diambil dua jenis kerapatan yaitu $N = 1/m^2$ dan $N = 9/m^2$ dan

untuk setiap kerapatan ini diambil diameter batang yang berbeda yaitu 0,02 m dan 0,08m.

Untuk diameter batang $D = 0,02$ m dan $N = 1/m^2$ diperoleh koefisien linierisasi $f_e = 0,0171$, koefisien refleksi $K_r = 0,022$ dan koefisien transmisi $K_t = 0,828$. Dengan demikian energi yang teredam

dalam hutan mangrove sebesar 56,03%. Sedangkan untuk $N = 9/m^2$ diperoleh koefisien linierisasi $f_e = 0,0611$, koefisien refleksi $K_r = 0,024$ dan koefisien transmisi $K_t = 0,511$. Energi yang teredam sebesar 85,92%.

Diperoleh pula bahwa untuk diameter batang $D = 0,08$ m dan $N = 1/m^2$ koefisien linierisasi

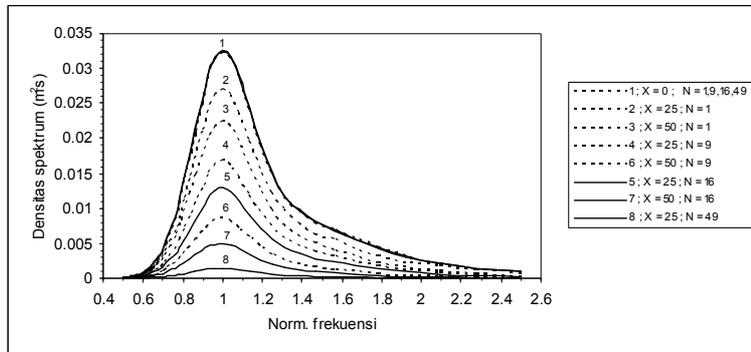
$f_e = 0,0451$, koefisien refleksi $K_r = 0,023$ dan koefisien transmisi $K_t = 0,609$ yang mengindikasikan adanya redaman energi dalam hutan mangrove sebesar 79,28%. Sedangkan untuk $N = 9/m^2$ diperoleh koefisien linierisasi $f_e = 0,2131$, koefisien refleksi $K_r = 0,054$, koefisien transmisi $K_t = 0,098$ dan energi yang teredam sebesar 99,37%.

Tabel 2. Hasil-hasil yang diperoleh untuk mangrove spesies *Ceriops*

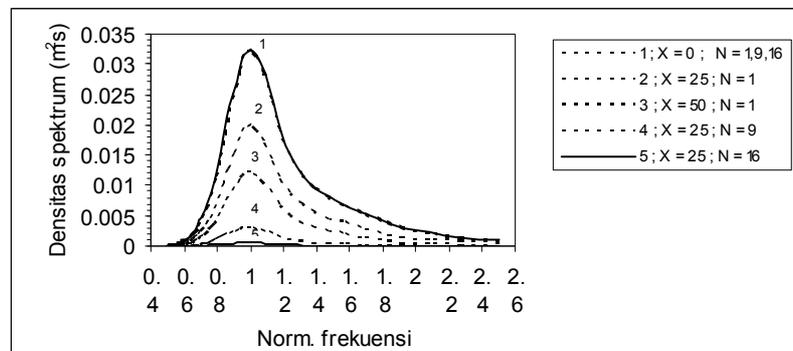
| Diameter Batang (m) | Jumlah Batang (per m ²) | Porositas n_p | Koefisien Linierisasi f_e | Koefisien Refleksi K_r | Koefisien Transmisi K_t | Disipasi Energi (%) |
|---------------------|-------------------------------------|-----------------|-----------------------------|--------------------------|---------------------------|---------------------|
| 0,02 | 1 | 0,9997 | 0,0171 | 0,022 | 0,828 | 56,03 |
| | 9 | 0,9972 | 0,0611 | 0,024 | 0,511 | 85,92 |
| | 16 | 0,9949 | 0,0870 | 0,028 | 0,385 | 92,25 |
| | 49 | 0,9846 | 0,2889 | 0,071 | 0,044 | 99,65 |
| 0,08 | 1 | 0,9949 | 0,0451 | 0,023 | 0,609 | 79,28 |
| | 9 | 0,9548 | 0,2131 | 0,054 | 0,098 | 99,37 |
| | 16 | 0,9196 | 0,3761 | 0,089 | 0,018 | 99,59 |
| | 49 | 0,7537 | 0,6951 | 0,147 | 0,001 | 98,91 |

Dari hasil-hasil tersebut di atas dapat dikatakan bahwa laju redaman energi dalam hutan mangrove sebanding dengan bertambahnya kerapatan hutan dan

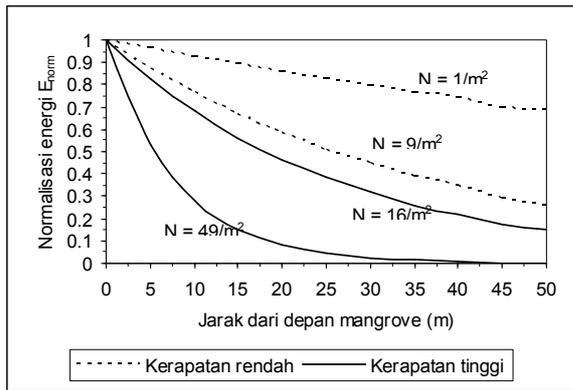
diameter batang mangrove. Hasil-hasil lain yang diperoleh dalam kasus ini diplot pada Gambar 6 - 13.



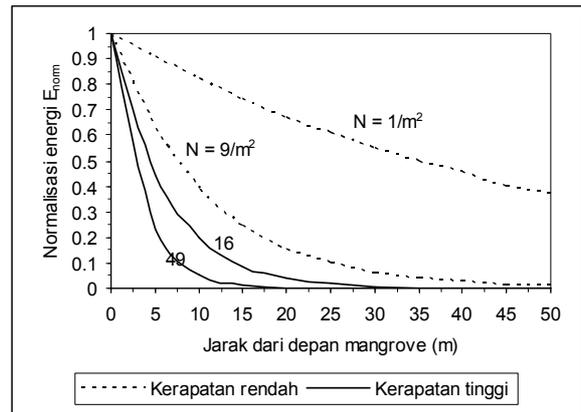
Gambar 6. Spektrum gelombang di dalam hutan mangrove spesies *Ceriops* dengan diameter batang 0,02 m



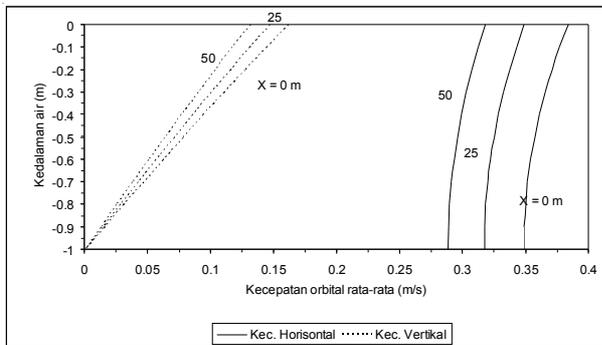
Gambar 7. Spektrum gelombang di dalam hutan mangrove spesies *Ceriops* dengan diameter batang 0,08 m



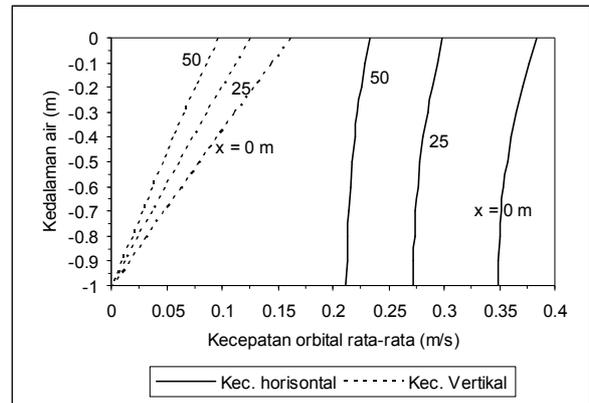
Gambar 8. Normalisasi energi di dalam hutan mangrove spesies *Ceriops* dengan diameter batang 0,02 m



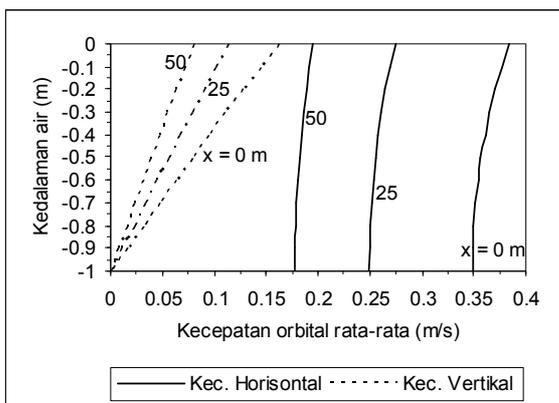
Gambar 9. Normalisasi energi di dalam hutan mangrove spesies *Ceriops* dengan diameter batang 0,08 m



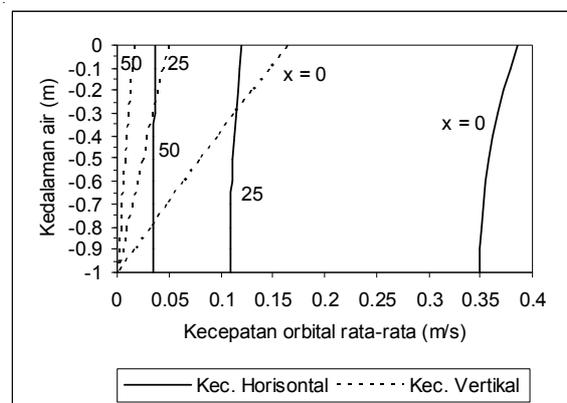
Gambar 10. Profil vertikal kecepatan orbital residu rata-rata di dalam hutan mangrove spesies *Ceriops* dengan kerapatan $1/m^2$ dan diameter batang 0,02m



Gambar 11. Profil vertikal kecepatan orbital residu rata-rata dalam hutan mangrove spesies *Ceriops* dengan kerapatan $1/m^2$ dan diameter batang 0,08 m



Gambar 12. Profil vertikal kecepatan orbital residu rata-rata dalam hutan mangrove spesies *Ceriops* dengan kerapatan $9/m^2$ dan diameter 0,02m



Gambar 13. Profil vertikal kecepatan orbital residu rata-rata dalam hutan mangrove spesies *Ceriops* dengan kerapatan $9/m^2$ dan diameter 0,08m

Spektrum frekuensi di tiga tempat dalam hutan mangrove diplot pada Gambar 6 untuk diameter batang 0,02 m dan Gambar 7 untuk diameter batang 0,08 m. Di kedua gambar tersebut nampak bahwa puncak spektrum semakin menurun dengan bertambahnya jarak dari depan mangrove. Akan tetapi penurunan yang drastis terjadi pada kerapatan hutan 9/m² dan diameter batang 0,08 m. Hal ini kembali mengindikasikan pengaruh kerapatan dan diameter batang terhadap laju redaman energi gelombang.

Normalisasi energi sebagai fungsi jarak dari depan mangrove ditunjukkan pada Gambar 8 untuk mangrove dengan diameter batang 0,02 m dan Gambar 9 untuk diameter 0,08 m. Adanya pengaruh kerapatan hutan dan diameter batang terhadap laju redaman energi gelombang dalam hutan mangrove ditegaskan kembali pada kedua gambar ini. Nampak bahwa untuk diameter batang yang sama penurunan normalisasi energi dengan bertambahnya jarak akan meningkat dengan bertambahnya kerapatan, demikian pula halnya untuk kerapatan yang sama tetapi dengan diameter batang yang bertambah.

Profil vertikal dari kecepatan orbital residu rata-rata diberikan pada Gambar 10 - 13. Sama seperti di atas, profil kecepatan horisontal hampir uniform secara vertikal dan profil kecepatan vertikal berubah secara linier dengan kedalaman, baik untuk diameter batang 0,02 m maupun 0,08 m. Magnitudo kedua komponen kecepatan tersebut berkurang dengan bertambahnya jarak dari depan mangrove. Selain itu nampak pula bahwa laju berkurangnya magnitudo kedua komponen kecepatan meningkat dengan bertambahnya kerapatan hutan dan diameter batang mangrove. Kenyataan ini juga mengindikasikan adanya redaman gelombang di

dalam hutan mangrove serta pengaruh kerapatan hutan dan diameter batang mangrove terhadap laju redaman energi gelombang di dalam hutan mangrove.

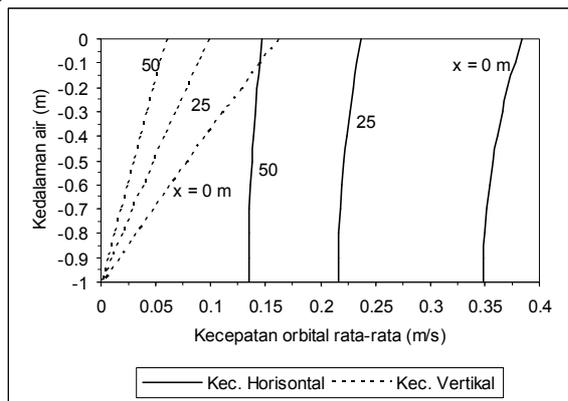
Kerapatan Tinggi

Sama seperti di atas, dalam kasus ini diambil dua jenis kerapatan yaitu $N=16/m^2$ dan $N=49/m^2$ dan untuk setiap kerapatan diambil diameter batang yang berbeda yaitu 0,02 m dan 0,08 m.

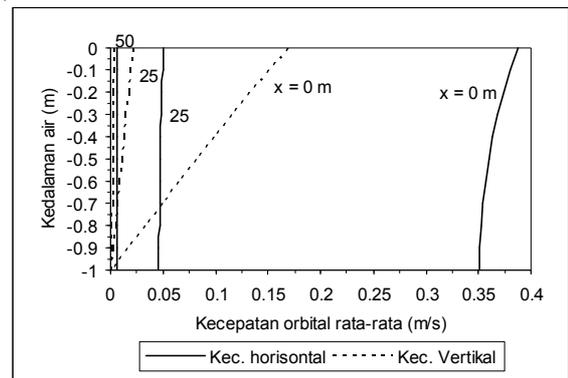
Untuk diameter batang $D=0,02$ m dan $N=16/m^2$ diperoleh koefisien linierisasi $f_e=0,0870$, koefisien refleksi $K_r=0,028$ dan koefisien transmisi $K_t=0,385$. Dengan demikian energi yang teredam dalam hutan mangrove sebesar 92,25%. Sedangkan untuk $N=49/m^2$ diperoleh koefisien linierisasi $f_e=0,2889$, koefisien refleksi $K_r=0,071$ dan koefisien transmisi $K_t=0,044$ serta energi yang teredam sebesar 99,65%.

Sedangkan untuk diameter batang $D=0,08$ m dan $N=16/m^2$ diperoleh koefisien linierisasi $f_e=0,3761$, koefisien refleksi $K_r=0,089$ dan koefisien transmisi $K_t=0,018$ yang mengindikasikan adanya redaman energi dalam hutan mangrove sebesar 99,59%. Selanjutnya, untuk $N=49/m^2$ diperoleh koefisien linierisasi $f_e=0,6951$, koefisien refleksi $K_r=0,147$, koefisien transmisi $K_t=0,001$ dan redaman energi sebesar 98,91%.

Spektrum frekuensi di tiga tempat dalam hutan mangrove diplot pada Gambar 6 untuk diameter batang 0,02 m dan Gambar 7 untuk diameter batang 0,08 m. Nampak bahwa puncak spektrum untuk kedua kerapatan sudah sangat kecil pada jarak 25 m dari



Gambar 14. Profil vertikal kecepatan orbital residu rata-rata dalam hutan mangrove spesies *Ceriops* dengan kerapatan 16/m² dan diameter batang 0,02 m



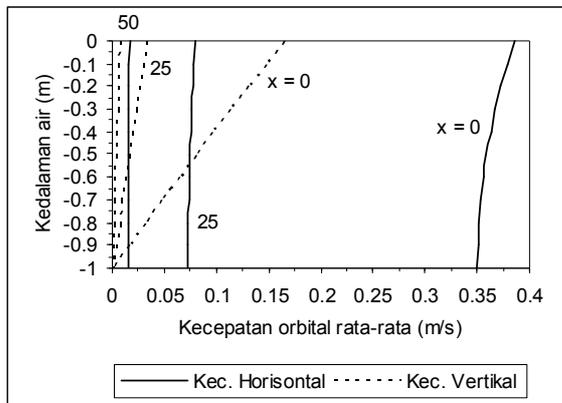
Gambar 15. Profil vertikal kecepatan orbital residu rata-rata dalam hutan mangrove spesies *Ceriops* dengan kerapatan 16/m² dan diameter batang 0,08 m

depan mangrove baik untuk diameter batang 0,02 m maupun 0,08 m. Bahkan untuk kerapatan 49/m² puncak spektrum sudah menuju nol pada jarak 25 m untuk diameter 0,02 m dan tidak nampak lagi untuk diameter batang 0,08 m. Hal ini kembali mengindikasikan pengaruh bertambahnya kerapatan dan diameter batang terhadap laju redaman energi gelombang dalam hutan mangrove.

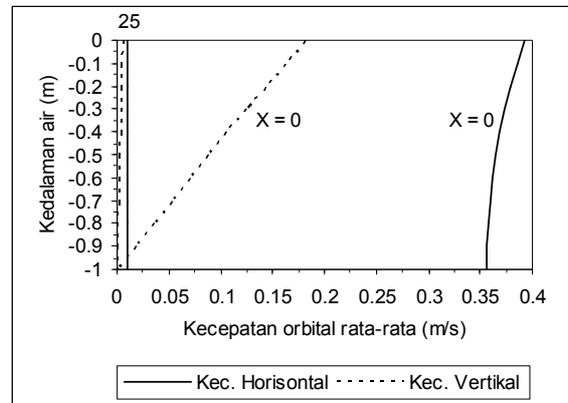
Adanya pengaruh bertambahnya kerapatan hutan dan diameter batang terhadap laju redaman energi gelombang dalam hutan mangrove ditegaskan kembali pada plot normalisasi energi terhadap jarak dari depan

mangrove seperti ditunjukkan pada Gambar 8 dan Gambar 9.

Demikian pula halnya dengan profil vertikal dari kecepatan orbital residu rata-rata yang diberikan pada Gambar 14 - 17. Nampak bahwa laju berkurangnya magnitudo kedua komponen kecepatan meningkat dengan bertambahnya kerapatan hutan dan diameter batang mangrove. Kenyataan ini juga mengindikasikan adanya peredaman gelombang di dalam hutan mangrove serta pengaruh kerapatan hutan dan diameter batang mangrove terhadap laju redaman energi gelombang di dalam hutan mangrove.



Gambar 16. Profil vertikal kecepatan orbital residu rata-rata dalam hutan mangrove spesies *Ceriops* dengan kerapatan 49/m² dan diameter 0,02 m



Gambar 17. Profil vertikal kecepatan orbital residu rata-rata dalam hutan mangrove spesies *Ceriops* dengan kerapatan 49/m² dan diameter 0,08 m

Kesimpulan

1. Hutan mangrove spesies *Rhizophora* dengan kerapatan tinggi ($N_u = 16/m^2$, $D_u = 8$ cm, $N_l = 49/m^2$, $D_l = 2$ cm) dapat meredam energi gelombang sebesar 99,71% dan kerapatan rendah ($N_u = 1/m^2$, $D_u = 8$ cm, $N_l = 9/m^2$, $D_l = 2$ cm) mampu meredam sebesar 86%.
2. Hutan mangrove spesies *Ceriops* dengan diameter batang 2 cm dan kerapatan 1/m², 9/m², 16/m², dan 49/m² secara berurutan dapat meredam energi gelombang sebesar 56,03%; 85,92%; 92,25%; dan 99,65%.
3. Hutan mangrove spesies *Ceriops* dengan diameter batang 8 cm dan kerapatan 1/m², 9/m², 16/m², dan 49/m² secara berurutan dapat meredam energi gelombang sebesar 79,28%; 99,37%; 99,59%; dan 98,91%.

4. Laju redaman energi gelombang di dalam hutan mangrove sangat bergantung pada kerapatan hutan dan diameter batang dan akar-akar mangrove.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Direktorat Jenderal Pendidikan Tinggi yang telah mendanai penelitian ini melalui dana Penelitian Dosen Muda Tahun Anggaran 2003 sehingga penelitian ini dapat diselesaikan.

Daftar Pustaka

Dean, R.G., Dalrymple, R.A., 1984. Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists. Prentice-Hall, New Jersey, USA, p.353.

- Halide, H., Brinkman, R.M., Ridd, P., 2000. Designing Bamboo Wave Attenuators for Mangrove Plantations, James Cook University, Townsville, Australia, p.5.
- Horikawa, K., 1988. Nearshore Dynamic and Coastal Processes, University of Tokyo Press, Japan, p.522.
- Latief, H., Harada, K., Iramura, F., 2000. Experimental and Numerical Study on the Effect of Mangrove to Reduce Tsunami, Tohoku University, Sendai, Japan, p.6.
- Latief, H., 2000. Study on Tsunamis and their Mitigation by Using a Green Belt in Indonesia, Dissertation, Tohoku University, Sendai, Japan, p.56.
- Massel, S.R., Furukawa, K., Brinkman, R.M., 1999. Surface Wave Propagation in Mangrove Forests. Fluid Dynamic Research, Elsevier Science, Amsterdam, vol. 24, 219-249 pp.
- Massel, S.R., 1996. Ocean Surface Waves: their Physics and Prediction, World Scientific, Singapore, p.491.
- Mazda, Y., Kanazawa, N., Wolanski, E., 1995. Tidal Asymmetry in Mangrove Creeks. Hydrobiologia, Kluwer Academic Publishers, Belgium, vol. 295, 51-58 pp.
- Miyagi, T., 1998. Mangrove Habitat Dynamic and Sea-level Change. Tohoku-Gakuin University, Sendai, Japan, 99-107 pp.