

PENGARUH KEBERADAAN MANGROVE TERHADAP TANGGUL PANTAI (STUDI KASUS TANGGUL PANTAI NCICD DI JAKARTA)

THE IMPACT OF EXISTENCE MANGROVE TO THE COASTAL DIKE (CASE STUDY COASTAL DIKE OF NCICD PROGRAM)

Huda Bachtiar¹⁾ Muhammad Fahrul Saifullah¹⁾ Semeidi Husrin²⁾ Leo Sembiring¹⁾ I Putu Samskerta¹⁾ Ketut Darma¹⁾

¹⁾ Balai Litbang Pantai, Puslitbang-SDA, Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat

²⁾ Puslitbang Kelautan, Kementerian Kelautan dan Perikanan

Email: huda.bachtiar@gmail.com

ABSTRAK

Pantai Utara Jakarta yang terus mengalami penurunan muka tanah membutuhkan penanganan segera dari bahaya banjir yang hampir setiap tahun terjadi. Proyek *National Capital Integrated Coastal Development* (NCICD) Fase A merupakan salah satu usaha pemerintah untuk mitigasi bencana banjir pantai utara Jakarta yang terdiri dari tanggul sungai dan tanggul pantai sepanjang 120 km. Salah satu tipe tanggul yang akan dibangun adalah tanggul hijau (*green dike*) yang merupakan kombinasi dari hamparan vegetasi (mangrove) dan struktur tanggul. Tulisan ini bertujuan untuk menganalisis karakteristik hidraulik (transformasi gelombang dan tekanan hidraulik) dari tanggul hijau Jakarta Utara dengan uji model fisik pada saluran gelombang (*wave flume*) di laboratorium Balai Pantai Buleleng, Bali. Sebanyak 204 uji berhasil dilaksanakan dengan variasi kerapatan hutan, tinggi gelombang, periode dan kedalaman perairan yang terbagi dalam 3 skenario yang berbeda: kondisi tanpa tanggul dan tanpa mangrove (TTTM), dengan tanggul dan tanpa mangrove (DTTM) dan dengan tanggul dan dengan mangrove (DTDM). Skenario DTDM terbagi lagi menjadi tiga dengan memvariasikan lebar dan kerapatan hutan mangrove. Hasil uji model fisik memperlihatkan bahwa, hamparan hutan mangrove di depan tanggul mempengaruhi secara signifikan pada karakteristik gelombang transmisi, refleksi dan disipasi. Adanya hutan mangrove berhasil mereduksi energi gelombang pada tanggul 60 – 90 %.

Kata Kunci: Mangrove, Tanggul Pantai, Transmisi Gelombang, Disipasi Gelombang, NCICD, Balai Pantai

ABSTRACT

North Jakarta sinks over time and it needs immediate solution to countermeasure flooding from the sea side. One of National Capital Integrated Coastal Development Program (NCICD) is Phase A. The Phase-A program is the construction of coastal dike, river dike, and also polder system for the short term period. The coastal dike and river dike lengths are 120 km. One of the typical dike of the Phase A is green dike. This is the combination of dike and mangrove forest in front of it. This paper discusses the impact of existence mangrove in front of the dike from the hydraulic analyses point of view. The physical model test was carried out in the Experimental Station for Coastal under Research Center for Water Resources Laboratory, Buleleng-Bali. 204 scenarios were tested for the experiments with considering mangrove density, wave height, wave period, and variation of the water depth; condition without existence of dike and mangrove (TTTM), with dike and without mangrove (DTTM), and with dike and with mangrove (DTDM). DTDM scenarios are also divided into width of the forest and the mangrove density. The simulation results yield that the existence of mangrove provide significant impact on wave transmission and wave dissipation. The existence of mangrove forests can reduce the wave dissipation energy into 60-90%.

Key words: Mangrove, Coastal Dike, Wave Transmission, Wave Dissipation

PENDAHULUAN

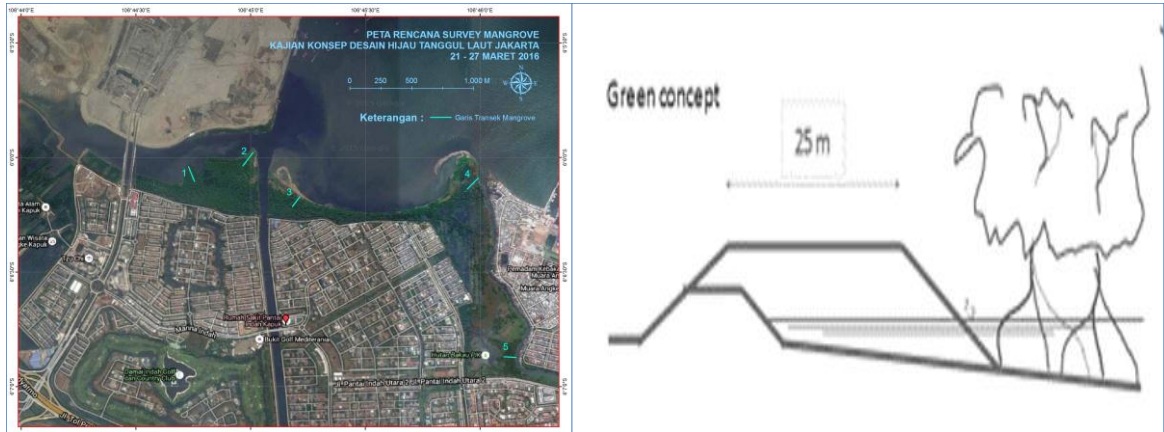
Pantai Utara (Pantura) Jakarta merupakan dataran rendah yang kerap dilanda bencana banjir. Selain faktor penurunan muka tanah, banjir yang terjadi di Pantura Jakarta juga disebabkan oleh banyak faktor lainnya seperti kerusakan ekosistem, kurangnya infrastruktur penanganan banjir dan buruknya tata ruang kota. *National Capital Integrated Coastal Development* (NCICD) atau Program Pengembangan Terpadu Pesisir Ibukota Negara (PTPIN) merupakan usaha pemerintah untuk menangani tidak hanya masalah banjir tetapi juga menambah dan memperbaiki infrastruktur kota yang sudah sangat dibutuhkan seperti sarana transportasi, kebutuhan air bersih, ruang terbuka hijau dan pemukiman (Bappenas, 2014). Sebagai komponen utama program NCICD, tanggul Pantura Jakarta rencananya akan dibangun dalam tiga fase yaitu fase A, B, dan C. Fase A merupakan fase perbaikan/peninggian tanggul eksisting dan pembangunan tanggul baru di sepanjang muara sungai dan garis pantai pantura Jakarta dengan total panjang tanggul mencapai kurang lebih 120 km (BBWS, 2016). Sementara itu, fase B dan C akan dibangun setelahnya untuk mengantisipasi tingginya laju penurunan muka tanah, penyediaan air baku, pelabuhan laut dalam, pemukiman dan pengembangan infrastruktur kota lainnya.

Tanggul NCICD Fase A telah mulai dibangun sejak tahun 2014 dengan ditandainya peletakan batu pertama (*ground breaking*) oleh gubernur Jakarta saat itu, Fauzi Bowo. Tanggul pantai sepanjang 75 m telah dibangun di daerah Pluit dan pada tahun 2016 dibangun sepanjang 1500 m di Pluit dan 2200 m di Kali Baru (PUPR, 2016). Keseluruhan tanggul pantai yang sudah dan sedang dibangun tersebut merupakan tanggul dengan konsep *basecase*, salah satu konsep tanggul NCICD dari 6 (enam) konsep tanggul yang akan dibangun di sepanjang pantura. Keenam konsep tanggul tersebut adalah tanggul *basecase*, tanggul *reduced basecase*, tanggul dermaga, tanggul pesisir, tanggul sungai dan tanggul hijau. Pada tulisan ini konsep tanggul hijau didiskusikan secara lebih rinci berdasarkan hasil uji model fisik di saluran gelombang Balai Pantai, Buleleng Bali.

Konsep tanggul hijau perlu diterapkan di Pantura Jakarta mengingat kawasan ini masih memiliki kawasan hijau di mana mangrove tumbuh subur beserta fauna di dalamnya (terutama jenis burung dan kera). Kawasan Suaka Margasatwa Muara Angke (SMMA) merupakan salah satu kawasan hijau Pantura Jakarta seluas kurang lebih 25 ha yang perlu dilestarikan karena memiliki

kekayaan ekosistem tak-ternilai dan berfungsi sebagai penyangga lingkungan di kawasan sekitarnya. SMMA merupakan salah satu lahan basah di pantura yang masih tersisa dan memiliki nilai sejarah tinggi karena telah ditetapkan sebagai cagar alam sejak zaman pemerintahan Kolonial Belanda. Saat ini, SMMA menampung setidaknya 54 spesies tumbuhan dan 4 jenis hewan eksotis (BKSDA, 2013).

Konsep tanggul hijau dalam tulisan ini didefinisikan sebagai sebuah sistem pelindung pantai yang terdiri dari tanggul konvensional (beton atau tumpukan tanah) dan hamparan vegetasi di depannya. Konsep tanggul hijau ini serupa dengan yang dipaparkan oleh Narayan dkk (2010) untuk kasus di India dan oleh Tusinski & Verhagen (2014) untuk kasus di Vietnam di mana biaya konstruksi yang lebih murah sangat ditekankan dengan keberadaan mangrove di depan tanggul. Di Belanda, tanggul hijau mengacu pada tanggul tanah yang ditumbuhi vegetasi di atasnya dan memiliki slope depan yang lebar. Tanggul hijau yang sudah diterapkan di Belanda, selain efektif sebagai pelindung pantai juga proses konstruksi dan perawatannya jauh lebih murah dibanding tanggul beton atau aspal walaupun membutuhkan lebih banyak material (Loon-Steensma dkk, 2014). Terkait efektifitas dalam meredam gelombang, Thaha & Muhiddin (2011) menggunakan tanggul hijau sebagai kombinasi antara mangrove dan pemecah gelombang ambang rendah (*Low-crested breakwater*) yang dapat mereduksi transmisi gelombang hingga 85%. Sementara itu, Husrin dkk (2011) menyimpulkan bahwa berdasarkan hasil pemodelan fisik, dari total reduksi gelombang, akar mangrove berkontribusi hingga 15%, di mana sisanya berasal dari topografi dan batimetri perairan di depan hutan mangrove. Perbedaan-perbedaan hasil perkiraan reduksi gelombang oleh mangrove terjadi karena banyaknya aspek - aspek pembeda seperti jenis spesies mangrove, skenario pengujian, kondisi lingkungan (topografi dan batimetri), kondisi gelombang, metoda pengujian, parameterisasi model pohon dan faktor skala (untuk uji model fisik). Oleh karena itu, untuk tujuan perencanaan tanggul hijau Pantura Jakarta, pengujian model fisik diperlukan untuk memperkirakan peran dan kontribusi hamparan hutan mangrove dalam mereduksi gelombang dan mengetahui proses-proses fisik serta interaksi gaya-gaya hidraulik antara tanggul dan hutan mangrove berupa transmisi gelombang.



(sumber: Master Plan NCICD, 2014)

Gambar 1 Tanggul pantai dengan tipe *Green Concept* berdasarkan master plan program NCICD

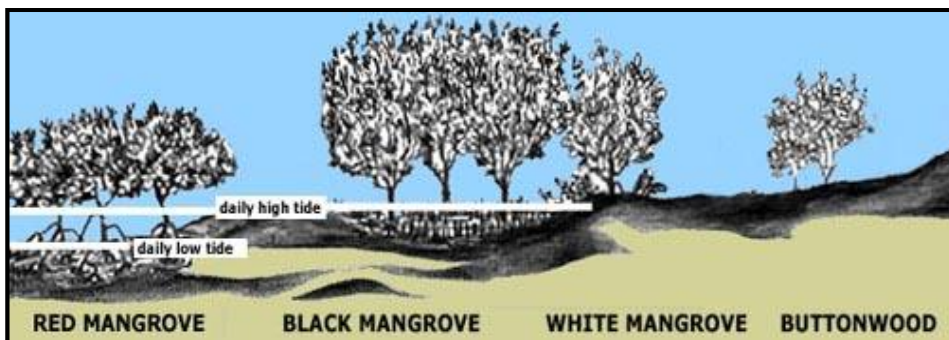
KAJIAN PUSTAKA

Peran Hutan Mangrove dan Hutan Pantai

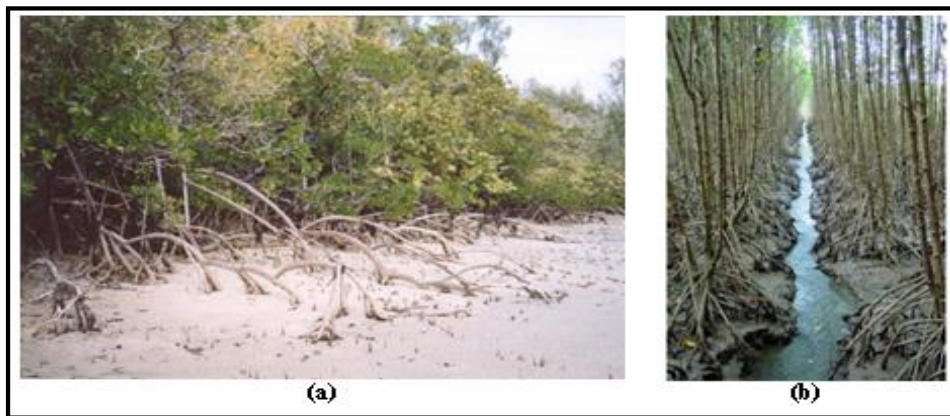
Di antara jenis-jenis hutan pantai, hutan mangrove dan hutan pantai adalah hutan yang paling dipertimbangkan untuk digunakan sebagai perlindungan alami terhadap kejadian ekstrim seperti tsunami dan gelombang badai. Di alam, baik hutan mangrove dan hutan pantai terdiri dari spesies vegetasi non-homogen dan keberadaan vegetasi semak merupakan bagian dari ekosistem mereka. Untuk mangrove, di mana habitat utamanya di daerah estuari atau rawa-rawa, bermacam jenis mangrove dapat dibedakan secara spasial membentuk apa yang disebut "zonasi spasial mangrove" (Gambar 2). Di Asia Tenggara (yaitu Indonesia dan Malaysia), mangrove yang ditanam secara komersial untuk berbagai hasil hutan (misalnya kapur batubara, kayu, dll). Yang paling nyata jenis mangrove yang ditanam secara komersial adalah *Rhizophora apiculata* (Gambar 3).

Mengingat lahan kering sebagai habitat utamanya, hutan pantai menguntungkan untuk daerah perlindungan hijau dalam mengurangi bahaya alam karena faktanya aktivitas manusia berada di dekatnya (Gambar 4). Di Aonae, Jepang,

selain dimaksudkan sebagai penghalang alami tsunami, hutan pantai diciptakan untuk membentuk taman kota dan tempat-tempat rekreasi (Diposaptono, 2007). Lokasi hutan pantai adalah persis di mana tsunami terakhir menghantam dengan parah daerah-daerah ini. Cemara Laut juga telah digunakan sebagai perlindungan gundukan pasir alam terhadap angin yang ekstrim (badai atau topan), serta terhadap gelombang badai. Ide untuk menggunakan Cemara Laut untuk meredam tsunami baru-baru ini berdasarkan beberapa pengalaman kerusakan di daerah sekitar yang terkena dampak dari peristiwa tsunami sebelumnya. Shuto (1987) adalah orang pertama yang menerbitkan data tentang efektivitas hutan pantai (pohon pinus Jepang) sebagai penghalang tsunami di Jepang berdasarkan catatan sejarah tsunami. Imai dan Matsutomi (2005) melakukan uji eksperimental untuk kelompok 'pohon-pohon pinus' di atas lidah pasir didasarkan pada kejadian tsunami di Sissano, Papua Nugini 1998. Laporan lain mendorong untuk memanfaatkan pohon Cemara Laut sebagai hutan kontrol tsunami dapat ditemukan di FAO (2005), FAO / Moac (2005), Latief dan Hadi (2006), Tanaka dkk. (2007), dan Forbes & Broadhead (2007).



Gambar 2 Contoh dari zonasi mangrove spasial



Gambar 3 Hutan Mangrove (a) Hutan mangrove alami, dan (b) Hutan mangrove yang ditanam untuk komersial (Duke, 2006)

Efektifitas Hutan Pesisir dalam Meredam Gelombang

Pengukuran lapangan, percobaan laboratoirum maupun pendekatan teoritis dan numeris telah banyak dilakukan untuk menurunkan besaran tahanan hidraulik yang ditimbulkan oleh hutan pantai dalam meredam energi gelombang angin maupun gelombang ekstrim seperti tsunami. Dari berbagai literatur, umumnya, tahanan hidraulik dari hutan pantai berupa:

- Tahanan seret (*drag*) dan inersia (*inertia*) yang digambarkan sebagai koefisien drag dan koefisien inersia (C_D dan C_M) sebagai fungsi dari kedalaman perairan, karakteristik aliran (Re) dan kerapatan hutan,
- Friksi dasar perairan yang direpresentasikan sebagai nilai Kekasaran *Manning* (n) sebagai fungsi dari tipe - tipe dasar perairan (seperti lumpur atau pasir) termasuk semak belukar,
- Viskositas Eddy dan *vortex* akibat aliran turbulen pada struktur hutan

Saat ini, koefisien seret C_D , koefisien inersia C_M dan kekasaran *Manning* 'n' pada umumnya banyak diterapkan baik secara model teoritis maupun numeris untuk menjelaskan peran dari hutan pantai dalam mereduksi energi gelombang. Walaupun terdapat banyak pendekatan yang berbeda-beda, koefisien-koefisien tahanan hidraulik akibat tumbuhan telah banyak diturunkan dari percobaan laboratorium dengan memodifikasi nilai kekasaran *Manning* (n) sebagai fungsi dari koefisien seret dan inersia (C_D dan C_M). Koefisien seret dan inersia sangat dipengaruhi oleh karakteristik geometri dari individu tumbuhan, rigiditas struktur pohon dan karakteristik aliran. Nilai C_D dan C_M banyak diturunkan secara tidak langsung dari hasil pengukuran kecepatan aliran dan elevasi muka air saat percobaan laboratorium atau pengukuran lapangan menggunakan pendekatan Morison sbb (Morison dkk., 1950):

$$F_t = \underbrace{\frac{1}{2} C_D \rho A_v u^2}_{\text{Drag force}} + \underbrace{C_M \rho V_v \frac{\partial u}{\partial t}}_{\text{Inertia force}} \dots\dots\dots(1)$$

Keterangan:

- F_t : Gaya total [N]
- ρ : Desitas air [kg/m^3]
- A_v : Luas area terdampak aliran [m^2]
- V_v : Volume dari benda terdampak aliran [m^3]
- u : Kecepatan aliran [m/s]
- $\frac{\partial u}{\partial t}$: Percepatan aliran [m/s^2]
- C_D : Koefisien seret [-]
- C_M : Koefisien inersia [-]

Beberapa penelitian mengenai kekuatan peredaman hutan pantai terhadap gelombang ekstrim telah dilakukan untuk berbagai jenis spesies tumbuhan hutan seperti alga (*Laminaria hyperborea*), rumput laut (*Posidonia oceania*), mangrove dan pinus pantai. Mayoritas mangrove yang terkena dampak langsung dari gelombang adalah mangrove tipe-f atau mangrove yang langsung berhadapan dengan laut (disebut juga mangrove pesisir) sedangkan mangrove tipe-r jarang terkena dampak langsung dari gelombang karena lokasinya yang tertutup (berada disepanjang muara sungai atau dibelakang mangrove pesisir). Kedua tipe mangrove ini dipengaruhi oleh hidrodinamika dari gelombang pasang. Diskusi berikut ini membahas kekuatan peredaman kedua tipe mangrove di atas melalui pengukuran lapangan, percobaan laboratorium dan pendekatan teoritis atau numerik.

Penelitian secara menyeluruh terhadap kekuatan mangrove dalam mereduksi dampak dari gelombang telah dilakukan di sepanjang garis pantai Vietnam. Pengukuran lapangan mengenai reduksi gelombang dilakukan oleh Mazda dkk.

(1997a) dengan daerah pantai yang relatif datar (tan $\alpha=5/10000$). Pengukuran dilakukan dengan memasang *wave probe* di tiga lokasi berbeda berdasarkan kerapatan mangrove yaitu Zona A (daerah tanpa mangrove), Zona B (daerah dengan kerapatan mangrove yang kecil) dan Zona C (daerah dengan kerapatan mangrove yang tinggi). Periode gelombang berkisar antara 5-8 detik dengan kenaikan dan penurunan tinggi gelombang berkorespondensi dengan kenaikan level pasang (kedalaman air) dan jarak gelombang dengan pantai. Reduksi relatif dari gelombang datang yang melewati mangrove sejauh Δx didefinisikan:

$$H_r = \frac{\left(\frac{H_i - H_t}{H_i} \right)}{\Delta x} \dots\dots\dots(2)$$

Keterangan :

- H_r : Reduksi relative tinggi gelombang[m⁻¹]
- H_i : Tinggi gelombang datang [m]
- H_t : Tinggi gelombang transmisi [m]
- Δx : Jarak mendatar antara H_i dan H_t [m]

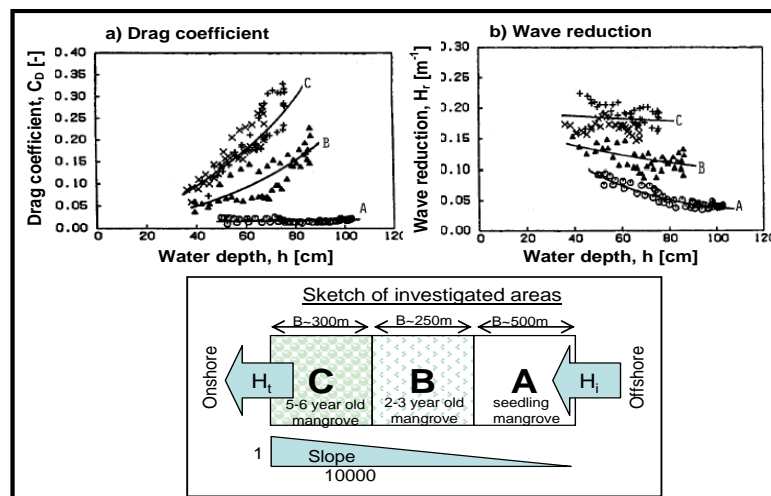
Untuk analisa koefisien seret (C_D), digunakan asumsi bahwa hutan mangrove berperan memberikan friksi dasar bagi gelombang panjang seperti swell dari jenis gelombang air dangkal. Berdasarkan Bretschneider dan Reid, perhitungan C_D diberikan sebagai berikut:

$$C_D = \left(\frac{32\sqrt{2}}{\pi} \right) \frac{h^2}{H_i \Delta x} \left(\frac{H_i}{H_t} - 1 \right) \dots\dots\dots(3)$$

Gambar 5 memperlihatkan bahwa nilai C_D berkisar antara 0.01-0.4 dari daerah lepas pantai (Zona A) menuju pantai (Zona B dan Zona C), dengan kerapatan hutan di Zona C lebih tinggi

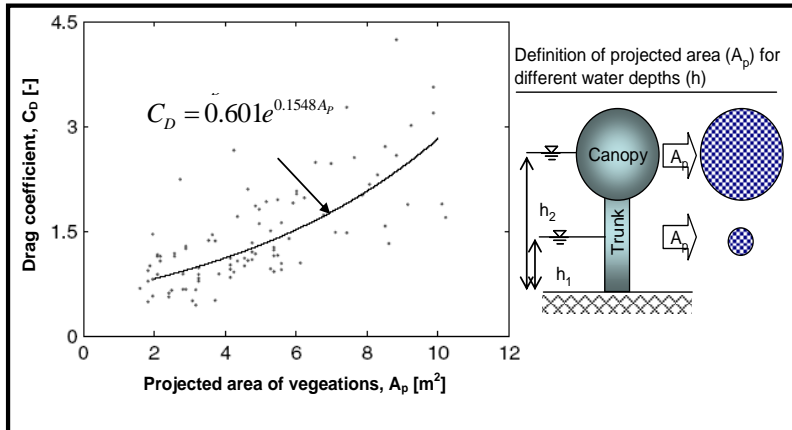
dibandingkan kerapatan hutan di Zona B. Peran usia dan kerapatan mangrove terlihat dengan didapatkannya reduksi sebesar 20% di Zona C disebabkan karena usia mangrove telah mencapai 5-6 tahun, sedangkan di daerah lain (Zona A dan Zona B) kerapatan mangrove kecil dan usianya lebih muda. Gambar 4 juga menunjukkan bahwa koefisien seret C_D untuk dasar pantai tanpa mangrove sangat kecil yaitu berada di kisaran 0.01, dan friksi dasar pantai di dalam hutan mangrove lebih kecil lagi sehingga dapat diabaikan. Quartel dkk. (2006) menggunakan pendekatan serupa di lokasi serupa namun pada waktu yang berbeda (enam tahun setelah penelitian Mazda dkk. 1997a) menambahkan hubungan antara C_D dengan luas area proyeksi mangrove dan hasilnya berupa hubungan eksponensial seperti dapat dilihat pada Gambar 5.

Metode serupa diterapkan di lokasi yang sama untuk spesies mangrove yang berbeda, yaitu *Sonneratia* sp yang memiliki akar udara dengan ketinggian mencapai 20 cm dari permukaan tanah (Mazda dkk. 2006). Reduksi gelombang diukur di area tanpa hutan mangrove dan di area dengan hutan mangrove. Gambar 6 menunjukkan bahwa reduksi gelombang bergantung pada kondisi muka air (elevasi pasang) dan struktur pohon mangrove. Reduksi gelombang paling tinggi didapatkan pada level muka air yang lebih rendah dengan kerapatan akar udara yang tinggi. Persebaran plot reduksi gelombang untuk kedalaman air di atas $h = 0.6$ m terjadi karena ketidakseragaman tinggi dari tiap pohon mangrove. Reduksi maksimum yang didapat mencapai 45%. Gambar 6 menunjukkan bahwa reduksi akibat friksi dasar pantai di dalam hutan mangrove dapat diabaikan.

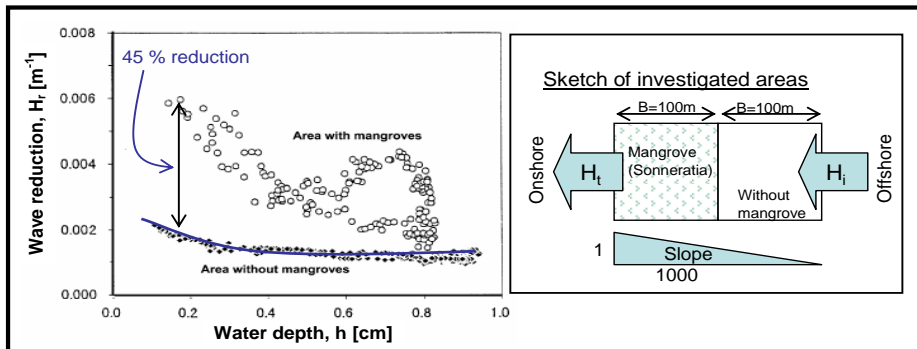


Gambar 4 Penentuan koefisien seret (C_D) dan pengukuran reduksi gelombang pada area yang berbeda; A: area lepas pantai tanpa bakau, B: dengan bakau jarang-jarang, C: dengan

bakau yang rapat, periode gelombang T: 8 det, kemiringan: 5/10000, dan lebar setiap area: 100m (Mazda dkk, 1997a).



Gambar 5 Hubungan koefisien seret (CD) dan proyeksi luasan dari tumbuhan (Ap) (Quartel, dkk. 2006)



Gambar 6 Laju reduksi gelombang oleh Sonneratia sp. Untuk kerapatan pohon: 0.08 pohon/m2, lebar hutan: 100m, kemiringan: 1/1000, dan periode gelombang T:10det (setelah Mazda dkk. 2006)

Perhitungan Transmisi dan Disipasi Gelombang

Perhitungan transmisi gelombang berdasarkan hukum kekekalan energi (energi direpresentasikan oleh luas kurva spektrum) bahwa jumlah energi gelombang selalu sama untuk 5 kondisi tersebut (5 kondisi dapat dilihat di dalam Hasil dan Pembahasan sub bab transmisi gelombang). Sehingga energi gelombang akan selalu memenuhi persamaan berikut untuk 5 kondisi di atas:

$$E_I = E_R + E_T + E_D \quad \dots\dots\dots(4)$$

Keterangan :

- E_I : Energi gelombang datang
- E_R : Energi gelombang refleksi
- E_T : Energi gelombang transmisi
- E_D : Energi gelombang yang terdisipasi

Dengan asumsi sebagai berikut:

- a) Energi gelombang datang selalu sama untuk tiap kondisi (mengikuti hasil perhitungan pada kondisi 1)
- b) Energi gelombang transmisi sama untuk kondisi 1 dan 2

- c) Energi gelombang transmisi selalu berkurang dari kondisi 2 hingga kondisi 4 (karena adanya mangrove)

METODOLOGI

Skema Eksperimen

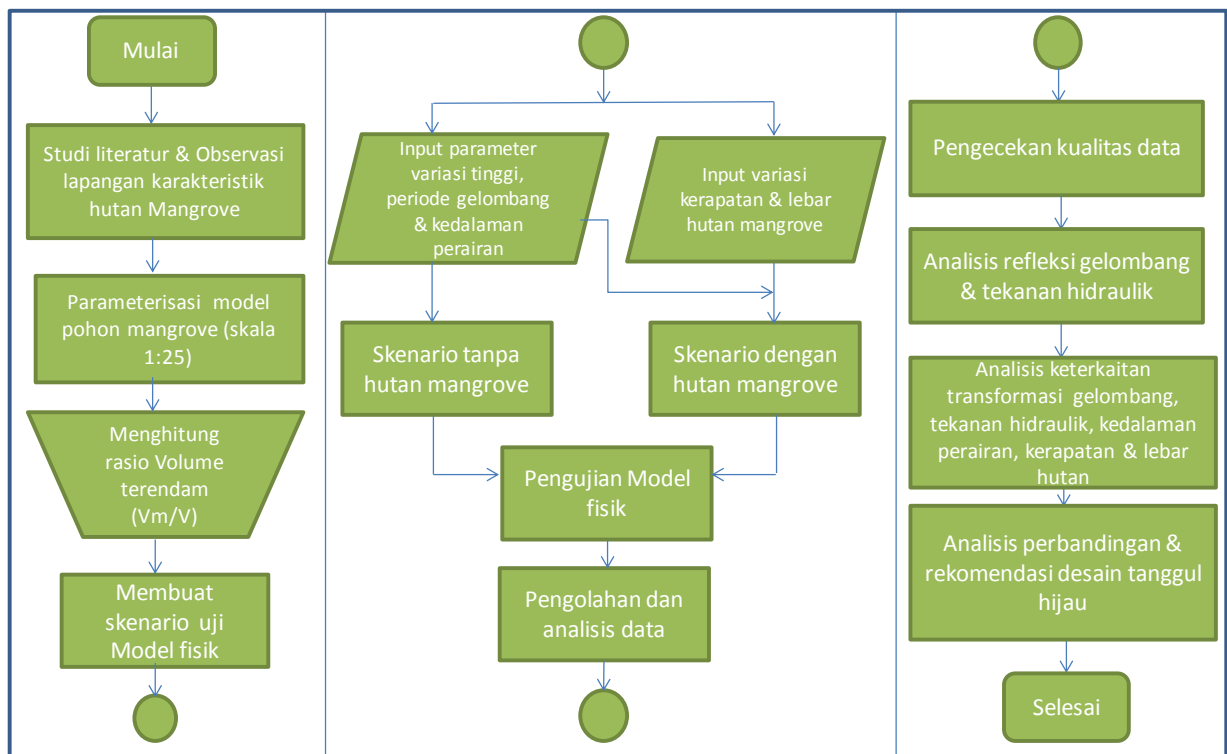
Metoda umum dari penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 7. Studi literatur dan observasi lapangan ke Teluk Jakarta mengawali kegiatan untuk menggali informasi terkini tanggul hijau terkini baik itu dari segi ilmiah maupun kondisi sebenarnya di lapangan. Jenis mangrove di SMMA didominasi oleh jenis *Avicennia* yang dicirikan dengan bentuk akar jarum di permukaan tanah (*Pneumatophore*). Proses parameterisasi pohon mangrove mengikuti metoda yang diperkenalkan oleh Husrin dkk (2012) dengan skala model 1: 25. Akar mangrove dan batang terbuat dari silinder logam sementara bagian kanopi terbuat dari ijuk. Selanjutnya, rasio volume terendam atau submerged volume ratio (Vm/V) diukur dengan

cara mencelupkan model pada gelas ukur dan mencatat perubahannya setiap 5 cm (lihat Gambar 8).

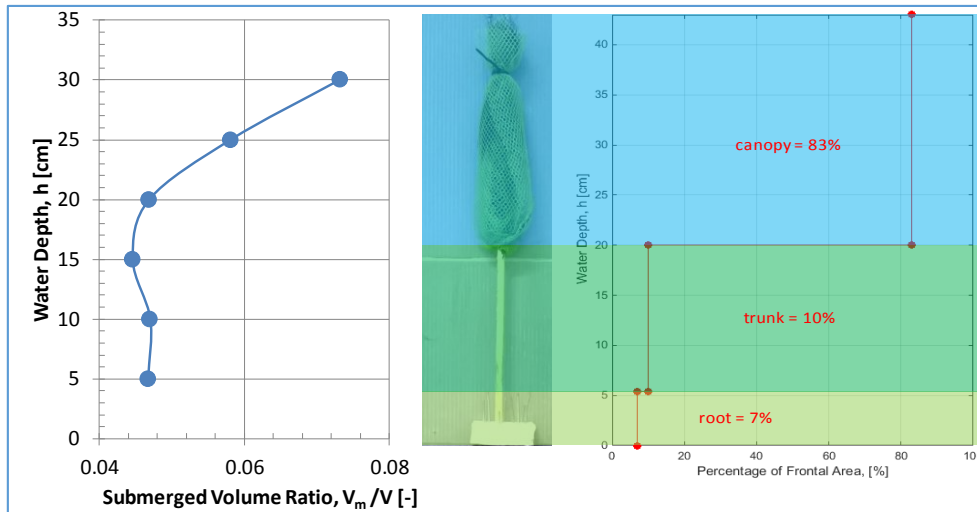
Di lapangan, kerapatan hutan mangrove dapat mencapai 1 pohon/m² dan lebar hutan mangrove bervariasi dari beberapa meter hingga lebih dari 500 m. Oleh karena itu, pada percobaan kali ini kerapatan dan lebar hutan divariasikan dalam tiga kelompok. Variasi kerapatan hutan mangrove terdiri dari 0,25, 0,5 dan 1 pohon/m². Dengan mempertimbangkan dimensi saluran gelombang, lebar hutan pantai yang dipilih adalah 0,5, 0,75 dan 1,00 m. Sementara itu, pengujian juga mempertimbangkan kondisi tanggul dengan dan tanpa keberadaan hutan mangrove untuk melihat peran mangrove sebenarnya dalam mereduksi gelombang.

Data yang terkumpul dari hasil uji model fisik selanjutnya diolah dan dianalisis dalam empat tahap. Tahap pertama adalah pengecekan kualitas data yang didapat. Hal ini bisa dilakukan dengan memplot seluruh data mentah pada skala ukur yang sama baik itu pada domain waktu (*time series*)

maupun dengan domain frekuensi (*spektrum*). Tahap kedua adalah proses pemisahan gelombang datang dengan gelombang terpantulkan (terefleksi) atau dikenal dengan analisis refleksi gelombang. Tahapan ini sangat penting karena sangat menentukan dalam penentuan analisis gelombang transmisi yang merupakan rasio dari gelombang datang dan gelombang yang telah melintasi model hutan mangrove. Metoda *least squared* (Mansard & Funke, 1980) digunakan untuk analisis gelombang refleksi. Hasil dari analisis gelombang refleksi selanjutnya digunakan pada tahap ke-3 untuk menganalisis keterkaitan antara semua aspek fisik yang terjadi seperti hubungan antara karakteristik gelombang dengan kedalaman perairan, kerapatan hutan, dan lebar hutan. Peran hutan mangrove pada perencanaan tanggul dapat diperkirakan pada tahapan ini melalui analisis perbandingan hasil-hasil dengan dan tanpa hutan mangrove. Pada tahap terakhir atau tahap ke-4, beberapa alternatif desain tanggul hijau yang mengikutsertakan infrastruktur kota seperti jalan akan diajukan sebagai acuan untuk perencanaan yang lebih rinci di masa yang akan datang.



Gambar 7 Skema eksperimen model



Gambar 8 Gambaran kondisi hutan dan parameterisasi pohon mangrove jenis avicennia

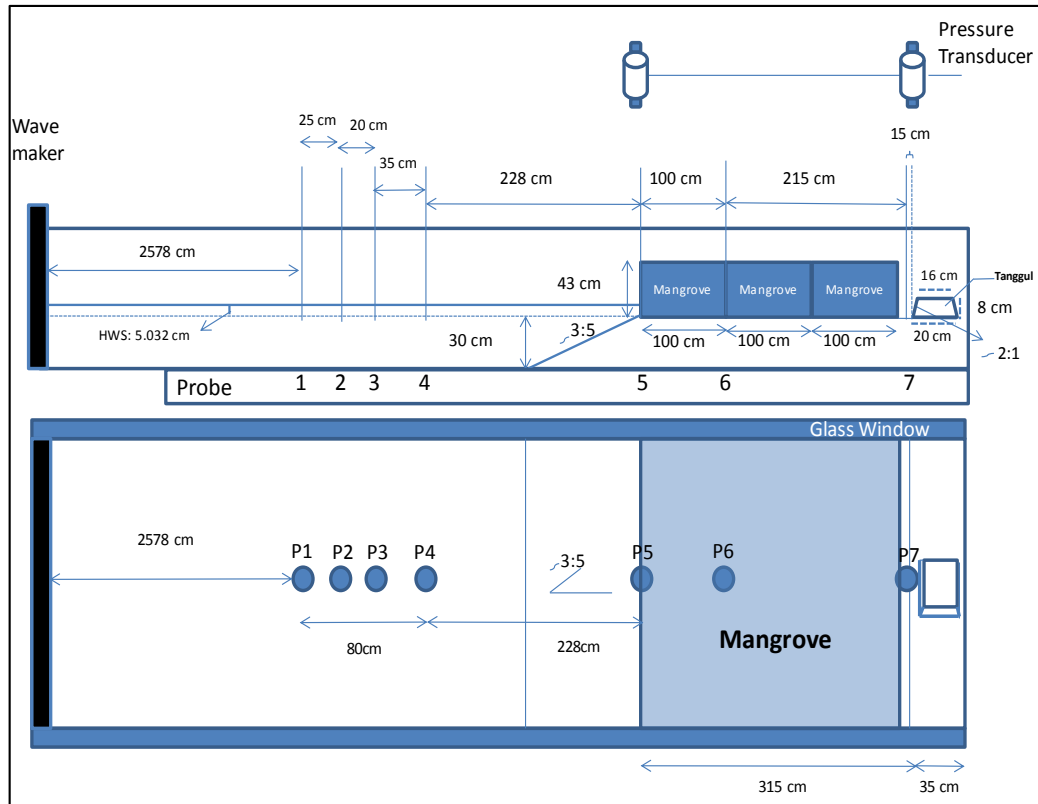
Konfigurasi Model

Untuk melihat cakupan beban gelombang, tinggi gelombang, kedalaman perairan dan perioda gelombang juga divariasikan sebagaimana terlihat pada tabel 1. Seluruh percobaan model fisik dilaksanakan di fasilitas saluran gelombang laboratorium Balai pantai yang memiliki dimensi

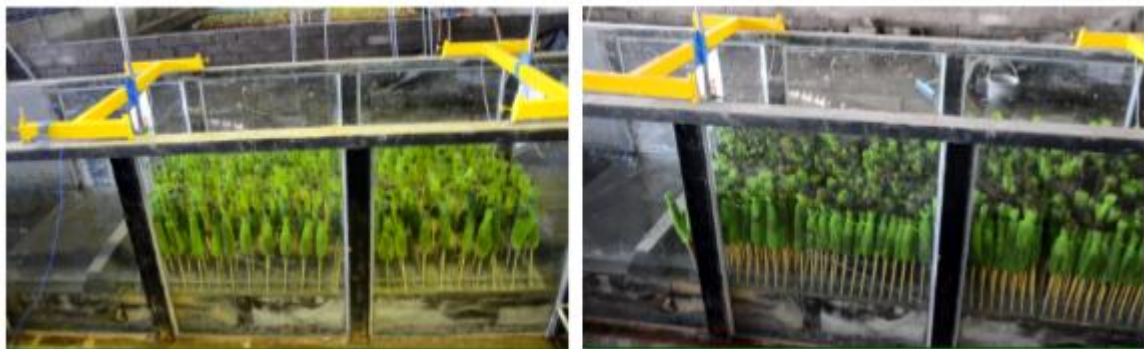
1m x 1,20m x 50m dengan kemampuan pembangkitan gelombang hingga 2,50 cm. Gambar 9 dan Gambar 10 menunjukkan setup dari uji model fisik berupa instrumen alat ukur, tanggul, dan mangrove di dalam flume. Di dalam flume disampang tujuh alat pengukur muka air (*wave probe*). Alat tersebut digunakan untuk menghitung tinggi gelombang yang dihasilkan selama percobaan.

Tabel 1 Skenario dan setup percobaan model fisik

Kondisi	Jenis Gelombang	Periode T (detik)	Muka Air h_f (cm)	Tinggi Gelombang H (cm)	Lebar Mangrove B (m)	Kerapatan Mangrove KM ($1/m^2$)
Tanpa Tanggul +	Reguler	1.4	5	9, 12, 15	-	-
Tanpa Mangrove	Irreguler	1.4, 2	0, 3, 5	9, 13, 15	-	-
Dengan Tanggul +	Reguler	1.4	5	9, 12, 15	-	-
Tanpa Mangrove	Irreguler	1.4, 2	0, 3, 5	9, 13, 15	-	-
Dengan Tanggul +	Irreguler	1.4, 2	0, 3, 5	9, 13, 15	1, 2, 3	0.25, 0.5, 1



Gambar 9 Konfigurasi model setup di dalam flume



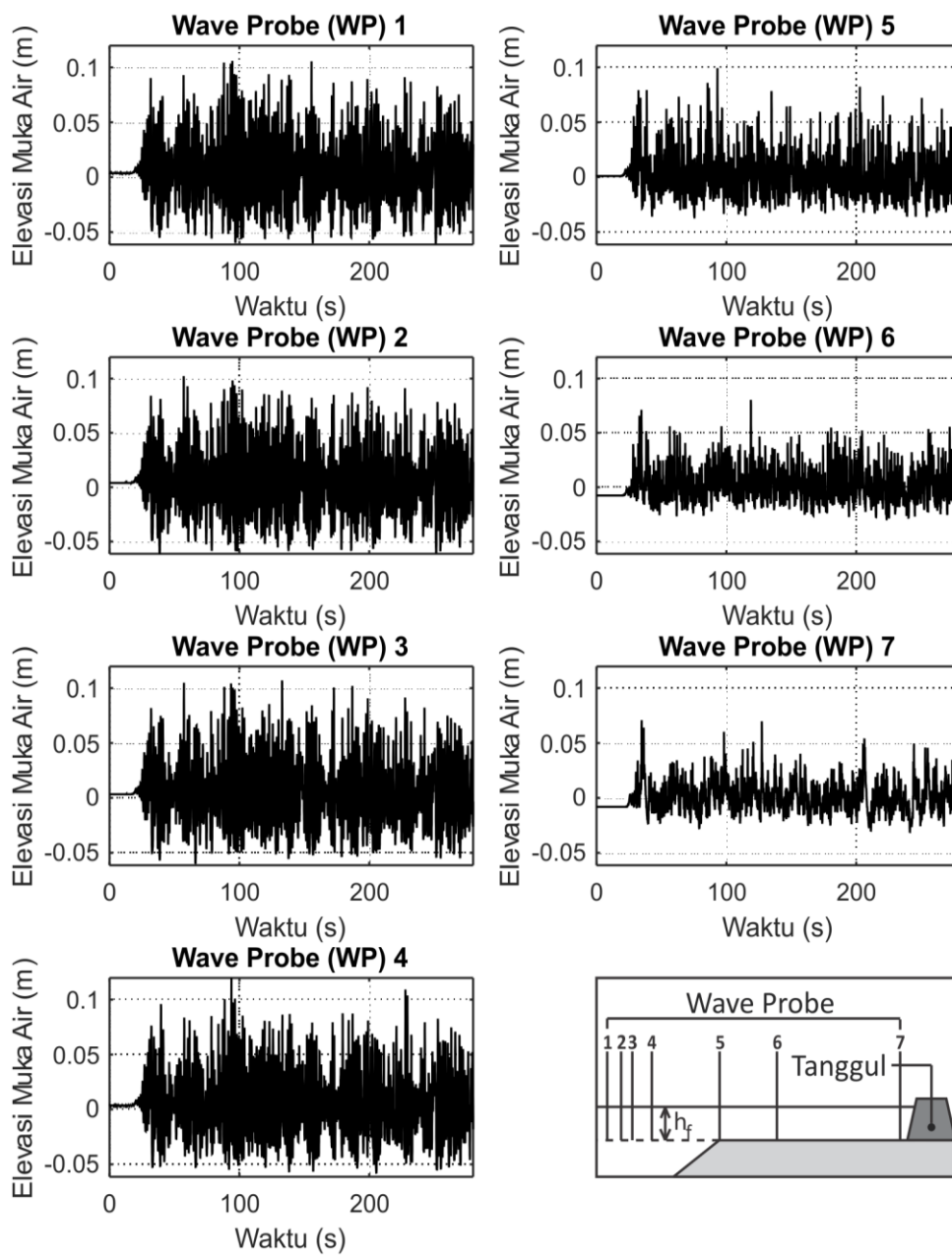
Gambar 10 Konfigurasi model dengan adanya tanggul dan mangrove

HASIL DAN PEMBAHASAN

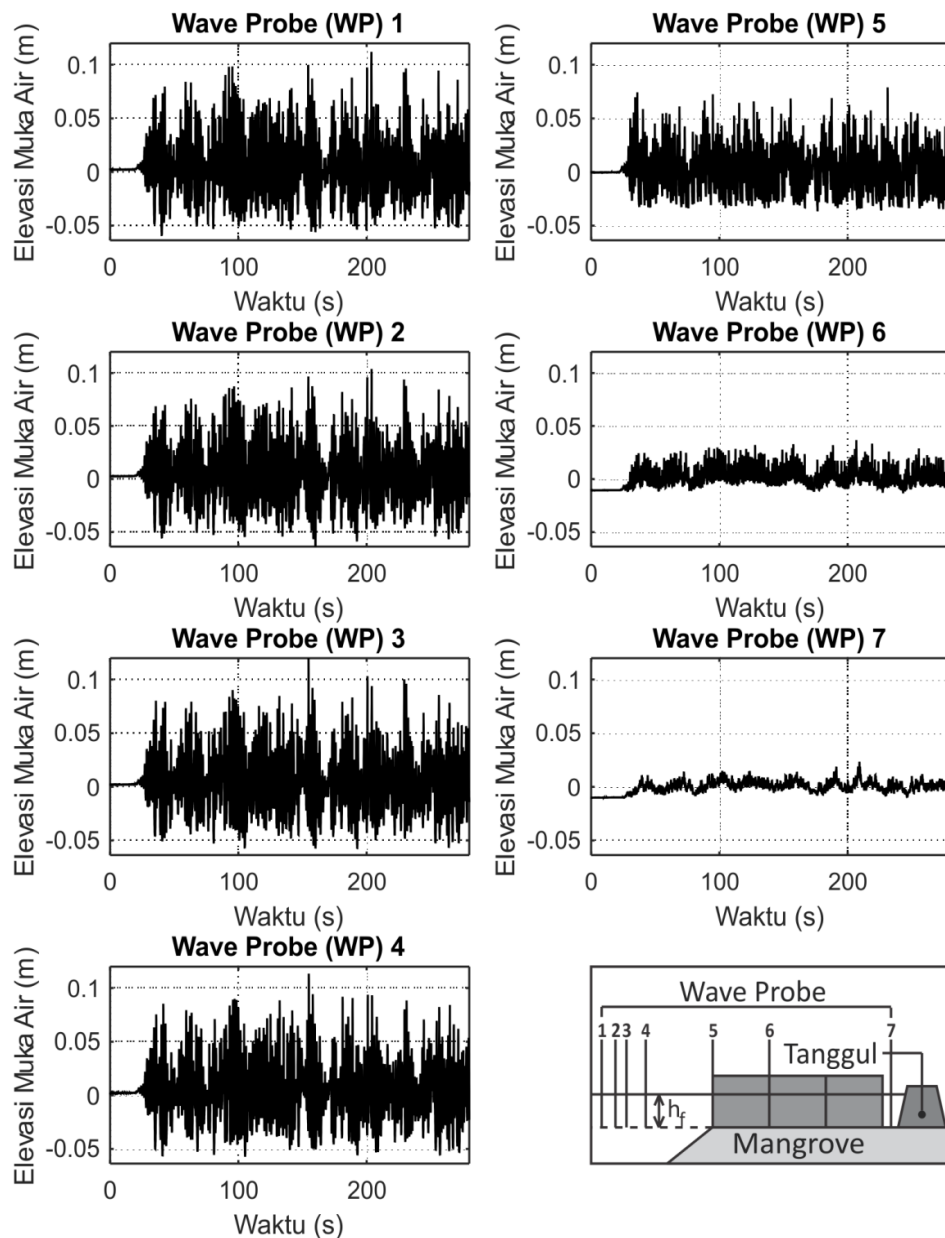
Pengamatan Muka Air

Gambar 11 dan Gambar 12 menunjukkan hasil pengukuran dari tujuh *wave probe* yang terpasang skenario gelombang *irregular* $T=1,4$ sec dan $H_s=13$ cm. Hasil simulasi menunjukkan tinggi muka air menurun dari WP 1 ke WP 7 untuk kedua perbandingan Dengan Tanggul Tanpa Mangrove (DTTM) dan Dengan Tanggul Dengan Mangrove (DTDM). Penurunan muka air yang terjadi sekitar 50 %, dimana tinggi muka air yang tercatat di WP 1

sekitar 0,12 m tereduksi menjadi 0,06 m di WP 7. Hal tersebut terjadi karena adanya efek pendangkalan. Perbedaan muka air DTTM dan DTDM berbeda sangat signifikan, khususnya di WP 7 dimana DTDM tinggi muka air yang terekam WP 7 lebih rendah dibandingkan skenario DTTM. Ini terjadi karena adanya mangrove yang dapat mereduksi muka air dengan signifikan sekitar 60% dari skenario DTTM. Keberadaan pohon dan akar pada mangrove memberikan kapasitas disipasi energi gelombang yang cukup signifikan. Hal tersebut terbukti dari rekaman data muka air tersebut



Gambar 11 Tinggi muka air setiap wave probe skenario gelombang irreguler DTTM



Gambar 12 Tinggi muka air setiap wave probe skenario gelombang irregular DTDM

Transmisi Gelombang

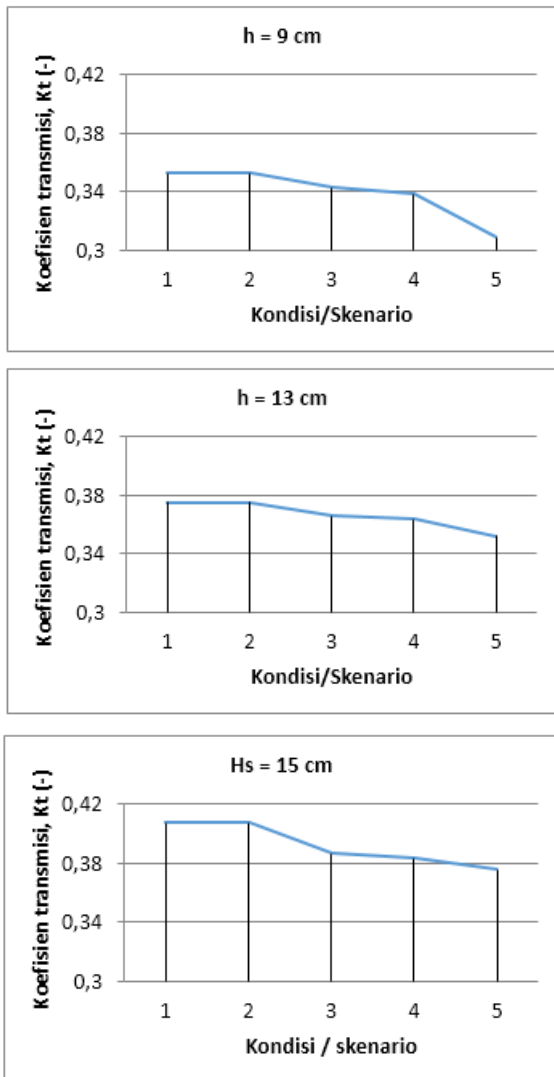
Analisis transmisi gelombang dilakukan untuk kondisi:

1. Tanpa Tanggul
2. Dengan Tanggul
3. Dengan Tanggul + 1 Lebar Mangrove (b1)
4. Dengan Tanggul + 2 Lebar Mangrove (b2)
5. Dengan Tanggul + 3 Lebar Mangrove (b3)

dengan parameter muka air, tinggi gelombang dan periode tetap. Dari hasil analisis tersebut dapat dilihat bahwa peran hutan mangrove yang terdiri dari topografi dan pohon mangrove berhasil mereduksi tinggi gelombang dengan cukup signifikan di mana kondisi ini konsisten untuk

ketiga variasi elevasi muka air (lihat Gambar 13). Semakin dalam perairan maka nilai koefisien transmisi akan semakin besar. Hal ini terjadi, karena volume air yang semakin besar menyebabkan lebih banyak energi gelombang yang menjalar ke dalam hutan mangrove. Peran lebar hutan mangrove juga terlihat jelas dalam mereduksi energi gelombang (Kondisi 3, 4 dan 5). Semakin lebar hutan mangrove, koefisien transmisi akan menjadi semakin kecil. Artinya, ada sebagian energi gelombang yang terdisipasi oleh keberadaan lebar hutan mangrove yang semakin lebar. Pada kondisi di mana mangrove diperhitungkan, nilai transmisi bervariasi antara 0.31 – 0.38. Artinya maksimal hanya 40% gelombang (saat pasang tinggi dengan

lebar hutan 100 cm) yang dapat ditransmisikan ke dalam hutan mangrove.



Gambar 13 Transmisi gelombang irreguler

Disipasi Gelombang

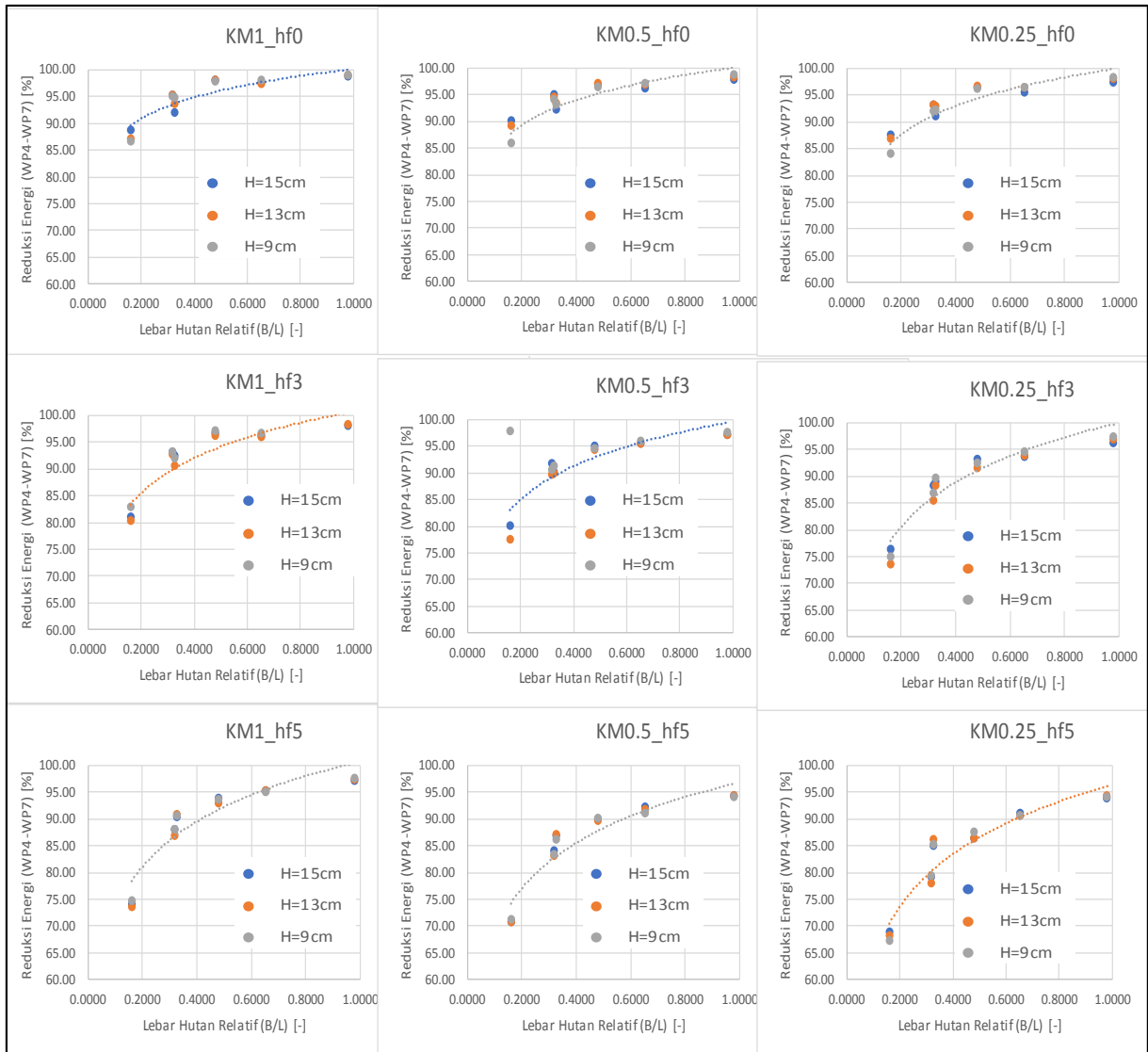
Dari diskusi sebelumnya terdapat beberapa parameter yang berpengaruh pada penjelaran dan pengurangan energi/tekanan akibat gelombang

yang melalui hutan mangrove. Parameter-parameter tersebut di antaranya adalah:

- Lebar hutan, B
- Kerapatan hutan mangrove, KM
- Periode gelombang, T
- Tinggi Gelombang, H
- Kedalaman perairan, hf

Pada analisis kali ini, disipasi gelombang dihitung berdasarkan energi gelombang tereduksi yang terekam pada WP 7 (setelah hutan mangrove) hingga WP4 (sebelum hutan mangrove). Dengan menganalisis perubahan energi gelombang tereduksi pada lokasi tersebut maka pengaruh dari parameter-parameter di atas pada pengurangan energi gelombang dapat dianalisis lebih lanjut. Analisis parameter non-dimensional diperkenalkan guna memudahkan penarikan kesimpulan terhadap efektifitas hutan pantai dalam mereduksi energi gelombang. Lebar hutan relatif (B/L) dan kedalaman perairan relatif (hf/L) dijadikan sebagai acuan utama terhadap nilai disipasi gelombang.

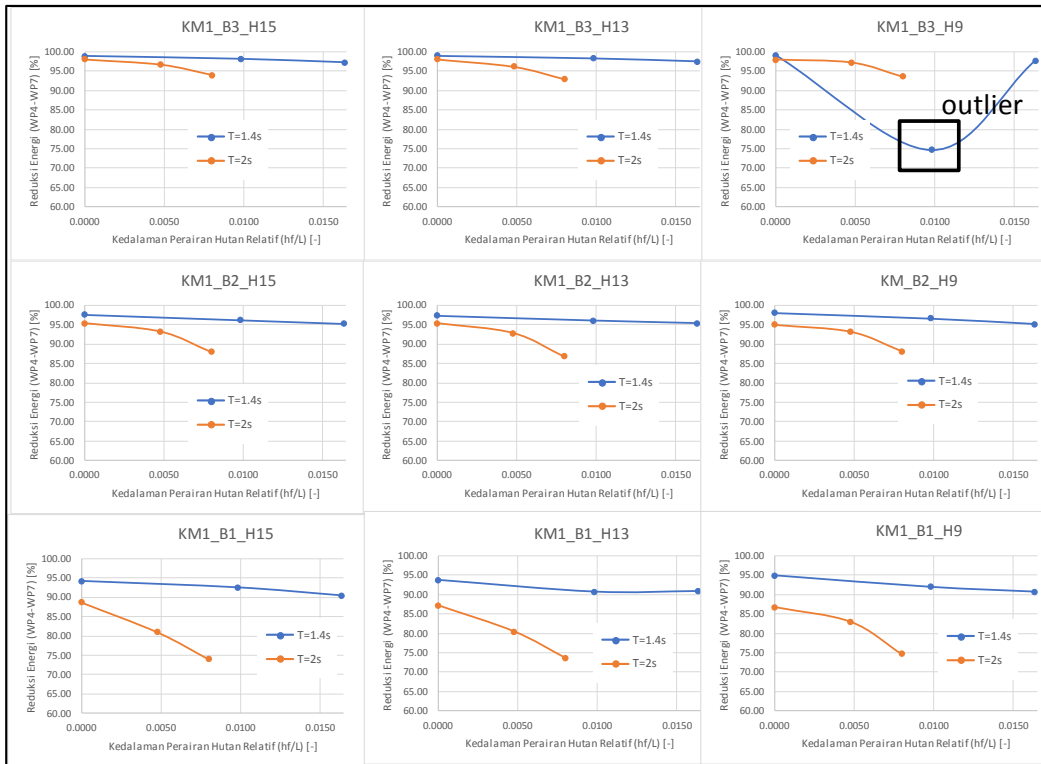
Gambar 14 menunjukkan hubungan antara disipasi gelombang dengan lebar hutan relatif (B/L). Hubungan antara kedua parameter tersebut berbentuk logaritmik di mana secara umum dapat digambarkan bahwa reduksi energi gelombang akan semakin meningkat seiring dengan meningkatnya nilai dari B/L . Dengan kata lain, efektifitas hutan pantai akan semakin besar jika lebar hutan dibuat semakin lebar. Lebih spesifik lagi, efektifitas dalam mereduksi gelombang akan tercapai jika lebar hutan sepadan dengan panjang gelombang yang melanda hutan pantai. Dari Gambar 14 reduksi gelombang tertinggi mencapai 99% dan terendah mencapai 60%. Nilai maksimum reduksi gelombang terjadi saat muka air surut dan terendah terjadi saat muka air pasang. Untuk melihat pengaruh tinggi muka air pada reduksi energi gelombang secara lebih rinci, maka parameter kedalaman perairan relatif (hf/L) dibutuhkan dalam analisis.



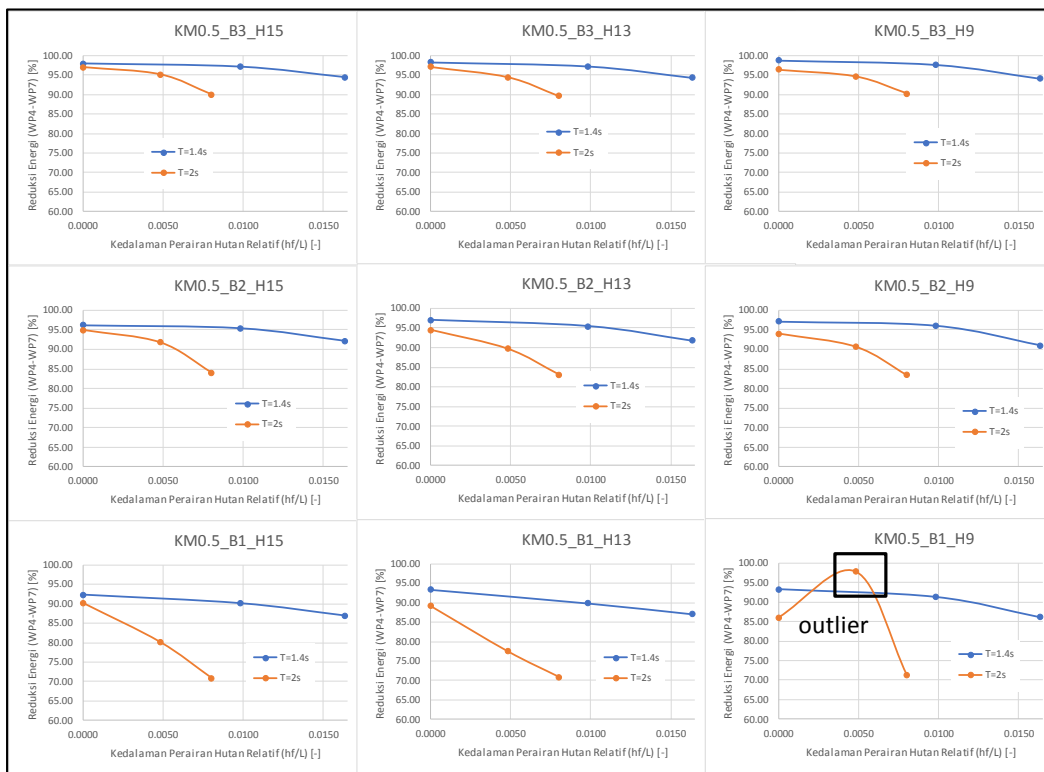
Gambar 14 Grafik Hubungan reduksi energi gelombang dengan lebar hutan relatif B/L

Pengaruh kedalaman pada grafik hubungan reduksi energi gelombang dengan lebar hutan relative kurang terlihat. Kedalaman perairan relative diperlukan untuk melihat pengaruhnya secara jelas pada reduksi energi gelombang. Gambar 15 dan Gambar 16 menunjukkan grafik hubungan antara laju reduksi energi gelombang dengan kedalaman perairan relatif terhadap variasi kerapatan hutan (KM). Dari ketiga gambar tersebut terlihat jelas bahwa gelombang dengan perioda yang lebih pendek ($T = 1,4$ det) lebih mudah tereduksi dibanding dengan gelombang yang lebih panjang ($T = 2,0$ det). Hal tersebut terjadi karena ketika perioda gelombang semakin besar, maka tinggi gelombang signifikan akan semakin tinggi. Kerapatan hutan (KM) juga terlihat jelas mempengaruhi reduksi energi gelombang. Model

hutan dengan kerapatan tinggi (KM1) memiliki laju reduksi energi gelombang tertinggi dibanding dengan model hutan dengan kerapatan lebih rendah seperti KM 0.5. Dapat disimpulkan juga bahwa reduksi energi gelombang akan semakin mengecil jika nilai kedalaman perairan relatif terhadap panjang gelombang hf/L menjadi semakin besar. Hal tersebut terjadi karena dengan semakin besarnya kedalaman, maka pengaruh disipasi energi gelombang terhadap gesekan dasar semakin kecil. Dengan kata lain, jika nilai panjang gelombang L diasumsikan konstan maka semakin dangkal perairan, reduksi gelombang akan semakin besar. Outlier di dalam grafik terjadi karena dimungkinkan karena adanya masalah di dalam instrumen alat ukur.



Gambar 15 Grafik Hubungan reduksi energi gelombang dengan kedalaman perairan relative hf/L untuk KM1



Gambar 16 Grafik Hubungan reduksi energi gelombang dengan kedalaman perairan relatif hf/L untuk KM0.5

KESIMPULAN

Keberadaan mangrove diindikasikan dapat mempengaruhi transformasi gelombang berupa reduksi tinggi gelombang di daerah pantai. Tujuan dari eksperimen ini adalah untuk mengkuantifikasi gelombang yang tereduksi karena adanya mangrove. Berdasarkan hasil studi dapat disimpulkan bahwa tanggul hijau sangat memungkinkan untuk dijadikan salah satu konsep tanggul Pantura Jakarta. Keberadaan hamparan hutan mangrove yang juga berperan sebagai Suaka Margasatwa Muara Angke (SMMA) sangat mungkin dikombinasikan dengan tanggul konvensional sebagai pelindung kawasan Pantura Jakarta dari banjir. Hasil sementara uji model fisik memperlihatkan bahwa sistem hutan mangrove (kombinasi antara hamparan hutan mangrove dengan topografi/batimetri) akan mampu mereduksi energi gelombang antara 48% - 99%.

Reduksi gelombang yang mencapai 99% hanya akan terjadi saat surut terendah dimana sebagian besar dari energi gelombang akan tereduksi oleh keberadaan slope dan topografi hutan mangrove. Sementara itu, saat pasang tinggi, hutan mangrove berperan lebih penting karena keberadaannya mampu mereduksi energi gelombang datang hingga 48%. Namun, perlu dicatat bahwa reduksi setinggi ini hanya akan didapat jika lebar dan kerapatan hutan mangrove memenuhi syarat seperti yang dihasilkan dalam analisis pada laporan ini, yaitu rasio lebar hutan dan panjang gelombang yang mendekati kesetaraan ($B/L \sim 1$). Jika hasil analisis pada uji diambil sebagai acuan, maka lebar hutan minimal yang dapat diterapkan untuk mencapai efektivitas maksimum adalah 3 m pada model atau 75 m pada prototype dengan kerapatan hutan minimal 1 pohon/m². Semakin besar lebar hutan, efektivitas hutan dalam mereduksi energi gelombang akan semakin baik. Dengan kemampuan reduksi energi gelombang yang hampir 50%, artinya konstruksi tanggul di kawasan ini bisa lebih murah dibanding kawasan lain yang menggunakan konsep selain konsep tanggul hijau.

DAFTAR PUSTAKA

- Bappenas. 2014. *Draft Master Plan National Capital Integrated Coastal Development (NCICD)*, Kementerian Koordinator Bidang Perekonomian, Republik Indonesia
- BBWS. 2016. Pelaksanaan National Capital Integrated Coastal Development (NCICD) Tahun 2016, Materi Rapim 3 Februari 2016, Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, Jakarta.
- BKSDA. 2013. *Ensiklopedi Kawasan Konservasi Suaka Marga Satwa Muara Angke*, Balai Konservasi Sumber Daya Alam DKI Jakarta, Jakarta
- Diposaptono, S.; Budiman. 2007. *Hidup akrab dengan gempa dan tsunami*, Sarana Komunikasi Utama, Bogor. Indonesian
- Duke, N.C., 2006. *Rhizophora apiculata*, *R. mucronata*, *R. stylosa*, *R. × annamalai*, *R. × lamarckii* (Indo-West Pacific stilt mangroves), ver. 2.1. In: Elevitch, C.R. (ed.). *Species Profiles for Pacific Island Agroforestry*. Permanent Agriculture Resources (PAR), Hōlualoa, Hawai'i. <http://www.traditionaltree.org>
- FAO. 2005. *Coastal Protection and Spatial Planning in Indonesia*. Mission Report Murugesu Pushparajah FAO Consultant, Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) May 2005.
- FAO/MOAC. 2005. *Report of Joint FAO/MOAC Detailed Technical Damages and Needs Assessment Mission in Fisheries and Agriculture Sectors in Tsunami Affected Six Provinces in Thailand 11-24 January 2005*, Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) in cooperation with Ministry of Agriculture and Cooperatives (MOAC) Thailand.
- Forbes, K., Broadhead, J., 2007. *The role of coastal forests in the mitigation of tsunami impacts*, Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), FAO, Bangkok, 20 pp.
- Hadi, S., Latief, H., Muliddin, 2003. *Analysis of Surface Wave Attenuation in Mangrove Forests*, PROC. ITB Eng. Science Vol. 35 B, No. 2, 2003, 89-108
- Latief, H., & Imamura, F. 2000. *Study on the mangrove control forest to reduce tsunami impact*, In: Proceedings of 12th congress of the IAHR-APD. Bangkok.
- Husrin S, Strusińska A, Hoque A, and Oumeraci H. 2011. Storm wave attenuation and damping performance of mangrove forest, Proceedings of the Joint Convention Makassar 2011, Exploring Eastern Indonesia, 16 pp.
- Husrin, S., Strusińska, A. & Oumeraci, H. 2012. Experimental study on tsunami attenuation by mangrove forest, *Earth Planet Sp* (2012) 64: 15. doi:10.5047/eps.2011.11.008
- Imai, K.; Matsutomi, H. 2005. *Fluid force on vegetation due to the tsunami flow on sand spit*. K. Satake (ed.), *Tsunamis: Case Studies & Recent Developments*, pp. 293-304.
- Latief, H., & Hadi, S. 2006. *Protection from Tsunamis, Coastal Protection in the Aftermath of the*

- Indian Ocean Tsunami* What role for forests and trees?; proceedings of the regional technical workshop, FAO, Khao Lak, Thailand.
- Loon-Steensma, JM van (ed.), H.A. Schelfhout, M.E.A. Broekmeyer, M.P.C.P. Paulissen, W.T. Oostenbrink, C. Smit en E-J Cornelius. 2014. Nadere verkenning Groene Dollard Dijk; Een civieltechnische, juridische en maatschappelijke verkenning naar de haalbaarheid van een brede groene dijk en mogelijke kleiwinning uit de kwelders. Wageningen, Alterra Wageningen UR (University & Research centre), Alterra-rapport 2522. 90 blz.; 32 fig.; 23 tab.; 56 ref
- Mansard EPD. and Funke, ER. 1980. The measurement of incident and reflected spectra using a least squares method, Proc. 17th Int. Conf. Coast. Eng., Sydney, Australia (1980), pp. 154–172.
- Mazda ,Y., Wolanski, E.J., King, B.A., Sase, A., Ohtsuka, D., and Magi, M., 1997a. *Drag force due to vegetation in mangrove swamps*, Mangroves and Salt Marshes 1(3): 193-199.
- Mazda, Y., Kanazawa, N., & Wolanski, E., 1995. *Tidal asymmetry in mangrove creeks*, Hydrobiologia 295: 51-58.
- Mazda, Y., Kobashi, D., & Okada, S., 2005. *Tidal-Scale Hydrodynamics within Mangrove Swamps*, Wetlands Ecology and Management 13(6): pp. 647-655
- Mazda, Y., Magi, M., Ikeda, Y., Kurokawa, T., & Asano, T., 2006. *Wave reduction in a mangrove forest dominated by Sonneratia sp.* Wetlands Ecology and Management 14: 365–78.
- Mazda, Y., Magi, M., Kogo, M., & Hong, P., 1997b. *Mangroves as a coastal protection from waves in the Tong King delta, Vietnam, Mangroves and Salt Marshes 1* (1997), pp. 127–135
- Morison, J.R. , O'brien, M.P., Johnson, J.W. & Shaaf, S.A. 1950. *The force exerted by surface waves on piles*, AIME Petroleum Transactions 189 (1950), pp. 149–154.
- Narayan S, Suzuki T, Stive MJF, Verhagen HJ, Ursem WNJ, Ranasinghe R. 2010. On the effectiveness of mangroves in attenuating cyclone - induced waves, Proceeding ICCE 2010, Shanghai-China, DOI: <http://dx.doi.org/10.9753/icce.v32.waves.50>
- PUPR. 2016. Bahan Informasi Pelaksanaan Pekerjaan Penagman pantai di Jakarta (NCICD), Rapat Koordinasi Pembangunan Tanggul A NCICD dan Reklamasi Teluk Jakarta, Bappenas 5 Oktober 2016, Jakarta.
- Quartel, S., Kroon, A., Augustinus, P.G.E.F., Van Santen, P., & Tri, N., 2006. *Wave attenuation in coastal mangroves in the Red River Delta Vietnam*, Journal of Asian Earth Sciences 29 (2007) pp. 576–584.
- Shuto, N., 1987. *The effectiveness and limit of tsunami control forests*, Coastal Engineering in Japan 30: pp.143-153.
- Tanaka, N.; Sasaki, Y.; Mowjood, M.I.M.; Jinadasa, K.B.S.N.; & Homchuen, S., 2007. *Coastal vegetation structures and their functions in tsunami protection: experience of the recent Indian Ocean tsunami*. Landscape and Ecological Engineering, vol. 3, pp. 33-45.
- Thaha MA dan Muhiddin AB. 2011. The combination of low crested breakwater with mangroves to reduce the vulnerability of the coast due to climate change, Proceedings of the Sixth International Conference on Asian and Pacific Coasts (APAC 2011) December 14 – 16, 2011, Hong Kong, China
- Tusinski, A & Verhagen, HJ. 2014. The use of mangroves in coastal protection. In P Lynett (Ed.), Proceedings of 34th conference on coastal engineering Vol. 1. Coastal Engineering Proceedings (pp. 1-13). s.l.: Coastal Engineering Research Council.