



RESPON HIDRAULIK DAN STABILITAS LAPIS ARMOR PADA DESAIN AWAL TANGGUL LAUT LEPAS PANTAI NCICD

HYDRAULIC RESPONSES AND STABILITY OF ARMOR LAYER ON PRELIMINARY DESIGN OF NCICD OFFSHORE SEA DIKE

Rian Mohammad Azhar¹⁾ Agustia Larasari¹⁾ Semeidi Husrin²⁾ Huda Bachtiar¹⁾

¹⁾Balai Litbang Pantai, Puslitbang SDA, Kementerian PUPR, Jl. Gilimanuk-Singaraja km. 122, Buleleng, Bali

²⁾Pusat Riset Kelautan – BRSDMKP-KKP, Jl. Pasir Putih II, Ancol Timur, Jakarta

Email: rian_mad23@yahoo.co.id

Diterima: 7 Maret 2019; Direvisi: 11 Juni 2019; Disetujui: 11 Juni 2019

ABSTRACT

NCICD sea dike is a conceptual structure aims to protect North Jakarta coastal area from a long term coastal flooding. The dike is a part of NCICD's conditional measures which is still under evaluation on various aspects. This study reviews the technical aspect on hydraulic responses of rocks, concrete cubes, and tetrapods as alternatives of structure's armor layers, considering recommendations given from previous studies. Two-dimensional physical model experiments were carried out in a 1.0 m-width and 40.0 m-length wave flume. Models with 1:30 scale were subjected to regular and JONSWAP spectrum wave. During the experiment, set of wave probes and video cameras from multiple angles were used to acquired wave height and wave periods, and to record experiments for observation of the maximum wave run-up elevation also number of displaced units on the armor layer. Results in the form of a hydraulic response consisting of reflection waves, energy dissipation, and wave run-up indicating that addition of the three layers of armor effectively increases the performance of these parameters with varying efficiency ($K_r < 0.2; K_D > 0.97; 0.07 < R_u < 0.20m$). Based on simulated storm with duration of 1000-waves, tetrapods tests resulting the lowest armor layer damage (<0.5%), thus representing the highest stability compared to other alternatives subjected to progressive storms.

Keywords: hydraulic response, armor stability, sea dike, NCICD

ABSTRAK

Tanggul laut lepas pantai NCICD merupakan struktur yang dikonsepsikan dalam jangka panjang akan melindungi pesisir pantai utara Jakarta dari banjir rob. Tanggul ini merupakan bagian dari pendekatan kondisional NCICD yang saat ini dalam tahap kajian dari berbagai aspek. Studi ini meninjau aspek teknis, dengan mengidentifikasi respon hidraulik dan stabilitas batu, kubus beton, dan tetrapods sebagai alternatif lapis armor pelindung tanggul, dan mempertimbangkan rekomendasi dari beberapa hasil studi sebelumnya. Eksperimen model fisik 2D dilakukan di dalam saluran gelombang dengan lebar 1,0m dan panjang 40,0m. Model berskala 1:30 diuji menggunakan tipe gelombang regular dan gelombang irregular berspektrum JONSWAP. Selama eksperimen berlangsung, seperangkat instrumen wave probes dan kamera video dari berbagai sisi digunakan untuk memperoleh tinggi dan periode gelombang, serta merekam eksperimen untuk mengobservasi elevasi rayapan maksimum gelombang dan jumlah unit yang berpindah pada lapis armor. Hasil berupa respon hidraulik yang terdiri dari gelombang refleksi, disipasi energi, dan rayapan gelombang mengindikasikan bahwa penambahan ketiga lapis armor secara efektif meningkatkan kinerja pada parameter-parameter tersebut dengan tingkat efisiensi yang bervariasi ($K_r < 0,2; K_D > 0,97; 0,07 < R_u < 0,20m$). Berdasarkan simulasi badai berdurasi 1000 gelombang pada pengujian ini, lapisan armor tetrapod memperlihatkan tingkat kerusakan lapis armor terendah (<0.5%), sehingga merepresentasikan stabilitas tertinggi dibanding alternatif lain dalam menghadapi badai progresif.

Kata kunci: respon hidraulik, stabilitas armor, tanggul laut, NCICD

PENDAHULUAN

Selama beberapa tahun terakhir, program pengembangan terpadu telah diinisiasi dalam rangka pengendalian kerusakan di area pesisir ibu kota negara Indonesia (NCICD PMU, 2018). Salah satu poin krusial program ini adalah memberikan perlindungan terhadap banjir rob menahun yang melanda area pesisir utara ibu kota. Untuk itu sebagai solusi jangka panjang, saat ini tengah dipersiapkan pendekatan antisipatif yang bergantung pada berbagai kemungkinan kondisi di lapangan berupa pembangunan struktur pelindung dalam bentuk tanggul lepas pantai. Pendekatan tersebut akan ditempuh apabila banjir dari arah laut terus terjadi dan tidak dapat dikendalikan oleh tanggul pantai fase-E (*emergency*).

Dalam proses pengembangannya, sejumlah studi telah dilakukan terkait konsep struktur pelindung berupa tanggul lepas pantai (KOICA KRC (2018), Bachtiar et al. (2017; 2019), Badriana et al. (2017)). Salah satu studi telah memberikan tinjauan awal beberapa alternatif bentuk profil tanggul, dari berbagai profil yang dikaji: struktur dinding tegak, struktur berkemiringan-konvensional, dan struktur berkemiringan dengan tambahan *berm*; struktur berkemiringan dengan *berm* memberikan performa hidraulik yang unggul dibandingkan alternatif lainnya (Larasari et al., 2018). KOICA KRC (2018) memberikan tinjauan awal material pelindung tebing tanggul dengan membandingkan alternatif armor batu, *dimple*, dan tetrapods; ditinjau dari aspek karakteristik hidraulik, efisiensi ekonomi, kemudahan konstruksi, dan royalti paten.

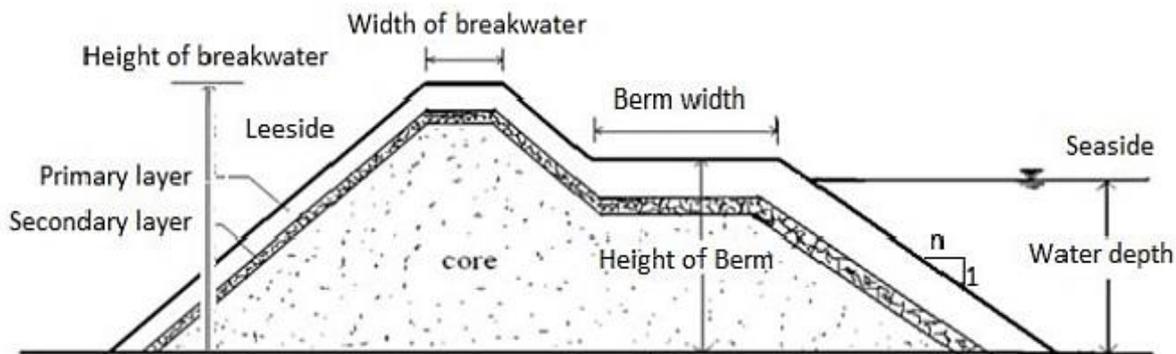
Studi ini bertujuan meninjau kinerja komponen lapis armor pada struktur tanggul lepas

pantai, dengan mempertimbangkan rekomendasi dari hasil studi sebelumnya. Untuk itu dilakukan uji eksperimental pada tiga lapis armor yang berbeda (batu, kubus, dan tetrapods) untuk mengetahui respon hidraulik serta stabilitasnya pada struktur berkemiringan dengan *berm*. Studi ini memberikan penilaian dari sisi teknis, khususnya kinerja lapis armor dalam menghadapi beban gelombang, untuk memperkaya basis data serta memberikan dukungan justifikasi teknis pada tahap detail desain struktur tanggul lepas pantai.

Struktur dengan Berm

Struktur tumpukan batu yang dilengkapi dengan komponen berm telah mendapat perhatian pada perkembangan konstruksi pemecah gelombang (*breakwater*) serta tanggul laut lepas pantai (Sigurdarson et al., 2001; Burcharth et al., 2003). Istilah *berm breakwater* mengacu pada adanya kuantitas tambahan batu-batu pada sisi struktur yang menghadap ke arah laut (Gambar 1), yang tidak ditemui pada struktur *rubble mound breakwater* konvensional.

Volume tambahan ini membolehkan derajat deformasi tertentu tanpa membahayakan integritas struktur secara keseluruhan. Namun, pada keadaan-keadaan tertentu konstruksi kemiringan (*slope*) dengan *berm* boleh jadi menghasilkan desain yang lebih ekonomis dibandingkan kemiringan seragam. Komponen berm mengurangi beban *impact* dan *run-up* (rayapan) dari gelombang insiden (gelombang datang dari arah laut), sehingga memerlukan material armor yang berukuran lebih kecil dibandingkan struktur dengan kemiringan seragam (Rao et al., 2004).



Sumber: Kumar et al., 2016

Gambar 1 Skema penampang berm breakwater

Struktur *berm* pada awalnya dimaksudkan untuk menyasiasi keterbatasan pasokan batu quarry berukuran besar untuk digunakan pada suatu lokasi. Sedangkan pembuatan unit armor beton dipandang rumit, karena unit yang besar cenderung sensitif terhadap kerusakan struktural. Namun, belakangan ini struktur pemecah gelombang telah dibangun dengan mengkombinasikan karakteristik kestabilan bangunan dengan kemiringan seragam dua lapis armor dengan karakteristik berm *breakwater* yang dispersif terhadap energi gelombang. Tipe ini di selanjutnya disebut sebagai *breakwater* berkemiringan dengan berm atau *bermed sloped breakwater*. Penambahan *berm* berfungsi untuk mengurangi tinggi *run-up* dan *overtopping* gelombang (Van der Meer, 2002) serta meningkatkan stabilitas batu pada lapis armor (Losada, 1986; *Rock Manual*, 2007; Dijkstra, 2008; Van Gent, *et al.* 2012; Van Gent 2013).

Refleksi gelombang

Zanuttigh *et al.* (2008) melakukan analisis refleksi gelombang pada struktur permeabel dengan *berm*. Berdasarkan analisis data yang merupakan hasil eksperimen saluran gelombang dan simulasi numerik 2DV menggunakan program COBRAS-UC (Losada *et al.*, 2008), seluruh kemiringan tanggul yang berada di bawah muka air laut memiliki peranan penting dan dimunculkan ke dalam bilangan Iribarren, ξ .

Zanuttigh and Van der Meer (2006) memprediksi nilai koefisien refleksi, K_r pada kemiringan uniform melalui formula berikut:

$$K_r = \tanh(a \xi_o^b)$$

dengan ξ_o adalah bilangan Iribarren yang dievaluasi menggunakan periode spektral pada kaki struktur, $T_{m-1,0} = m-1/m_0$ dengan batasan kondisi $R_c / H_{si} \geq 0.5$, $H_{m0} / D_{50} \geq 1.0$, $s_o \geq 0.01$, dimana:

$$a = 0.167 [1 - \exp(-3.2\gamma_f)] \quad b = 1.49(\gamma_f - 0.38)^2 + 0.86$$

dengan γ_f adalah faktor kekasaran permukaan, yang telah diukur dan ditentukan untuk berbagai macam material atau kekasaran permukaan struktur (Van der Meer, 2002; Bruce *et al.*, 2006).

Formula diusulkan untuk memasukkan pengaruh dari *berm* yang berada pada *swl* atau di atasnya (Zanuttigh and Van der Meer, 2006), dengan persamaan untuk $h > 1,5 H_{m0t}$:

$$\xi_o = \frac{[\tan \alpha_d (h - 1.5H_{m0t}) + \tan \alpha_{incl} 1.5H_{m0t}]/h}{\sqrt{H_{m0t} + L_0}}$$

sedangkan untuk $h \leq 1.5 H_{m0t}$:

$$\xi_o = \tan \alpha_{incl} / \sqrt{H_{m0t} + L_0}$$

dengan α_d = kemiringan struktur di bawah area *run-up*, α_{incl} = kemiringan rerata struktur di sekitar *swl*, h = kedalaman air di kaki struktur, H_{m0t} = tinggi gelombang insiden signifikan pada kaki struktur, dan L_0 = panjang gelombang laut dalam.

Disipasi energi gelombang

Gelombang memiliki energi dalam bentuk energi potensial dan energi kinetik. Keduanya memiliki total nilai yang dinyatakan dalam:

$$E = \frac{\rho g H^2}{8} L$$

dengan E = energi total tiap satuan luas, ρ = massa jenis air, g = percepatan gravitasi, dan H = tinggi gelombang.

Energi gelombang yang datang dipisahkan menjadi energi refleksi (dipantulkan), disipasi (diredam), dan transmisi (diteruskan):

$$E_i = E_r + E_d + E_t$$

Koefisien refleksi (K_r), koefisien disipasi (K_d) dan koefisien transmisi (K_t) gelombang berkorelasi dalam hubungan:

$$K_r^2 + K_d^2 + K_t^2 = 1$$

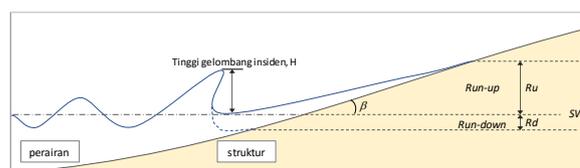
dengan

$$K_r = \sqrt{\frac{E_r}{E_i}} \quad K_d = \sqrt{\frac{E_d}{E_i}} \quad K_t = \sqrt{\frac{E_t}{E_i}}$$

dimana E_i , E_r , E_d , dan E_t adalah komponen energi gelombang insiden, refleksi, disipasi, dan transmisi (melewati struktur) secara berurutan. Setiap komponen energi tersebut dinyatakan dengan hasil kuadrat dari tinggi gelombang ($E_i \sim H_i^2$).

Run-up

Run-up adalah fenomena dimana puncak gelombang datang naik di sepanjang permukaan struktur sampai ke elevasi yang dimungkinkan lebih tinggi dari puncak gelombang. Jarak vertikal antara *swl* dan titik tertinggi yang dicapai oleh lidah gelombang disebut sebagai *run-up*, R_u (Gambar 2).



Gambar 2 Skematisasi *run-up* gelombang

Elevasi *run-up* dapat secara efektif direduksi dengan merancang *berm* pada *swl*, dengan peningkatan kekasaran permukaan, atau meningkatkan permeabilitas struktur (Van der

Meer, 2002). Reduksi ini diekspresikan dalam bentuk faktor reduksi γ . *Run-up* efektif dihitung dengan cara mengalikan nilai *run-up* pada kemiringan berpermukaan licin impermeabel dengan faktor koreksi. *Run-up* pada kemiringan licin impermeabel diekspresikan sebagai:

$$\xi_{2\%}/H_s = 1.6 \xi_{op}$$

dengan $z_{2\%}$ = elevasi *run-up* dilampaui oleh 2% gelombang, H_s = tinggi gelombang signifikan, ξ_{op} = bilangan *Iribarren* untuk periode puncak pada laut dalam.

Stabilitas Armor

Prinsip dasar dari desain konvensional lapis armor struktur adalah untuk mencegah gerak awal unit dengan mendefinisikan kondisi batasnya. Ketidakseimbangan antara beban hidraulik dan gaya-gaya pengimbang akan berujung pada ketidakstabilan lapis armor. Beberapa parameter yang digunakan untuk mengevaluasi stabilitas hidraulik pada struktur batu terdiri dari kombinasi antara parameter hidraulik (beban) dan parameter material penyusun (tahanan).

Salah satu parameter penting terkait dengan pengaruh gaya gelombang pada struktur berkemiringan adalah angka stabilitas, N_s (-). Angka ini memberikan hubungan antara karakteristik armor dan kondisi gelombang:

$$N_s = \frac{H}{\Delta D_{n50}}$$

dimana H = tinggi gelombang, biasa diberikan dalam tinggi gelombang signifikan H_s atau H_{m0} , Δ = densitas relatif apung, $(\rho_r - \rho_w)/\rho_w$, dan D_{n50} = ukuran karakteristik atau diameter nominal unit armor.

Kerusakan lapis armor pada struktur tumpukan batu konvensional dapat dideskripsikan menggunakan perbandingan jumlah batu yang berpindah terhadap jumlah keseluruhan batu pada area tertentu. Untuk mengkuantifikasi kerusakan secara independent terhadap lebar area yang dipertimbangkan, parameter tingkat kerusakan non-dimensional, N_d , dipergunakan (Via, et al., 2013). Parameter ini didefinisikan sebagai persentase batu berpindah di antara area $swl \pm 1,5 H_s$.

$$N_d = \frac{N_{displ}}{N_{area}} \cdot 100$$

Dimana N_{displ} = unit armor berpindah dan N_{area} = jumlah unit armor pada area observasi ($swl \pm 1,5 H_s$).

Angka stabilitas

Hudson (1959) memberikan nilai angka stabilitas unit armor melalui persamaan yang mempertimbangkan berat unit armor, tinggi

gelombang, sudut bidang miring, perbandingan antara berat jenis unit dan berat jenis air laut, serta koefisien stabilitas. Formula Hudson dirancang untuk kondisi tinggi gelombang yang tidak menimbulkan kerusakan (*no-damage wave height*) dan tanpa adanya *overtopping*. Keunggulan utama formula Hudson terletak pada kesederhanaannya, dengan rentang nilai K_A yang luas untuk berbagai tipe armor beserta konfigurasi. SPM (1984) memberikan nilai $K_A = 6,5$ dan $7,5$ (gelombang pecah/non-pecah) untuk kubus beton, serta $K_A = 7,0$ dan $8,0$ untuk tetrapods.

Dibandingkan formula Hudson, Van der Meer (1988) mengajukan formula yang lebih progresif. Van der Meer menyimpulkan stabilitas batu quarry ditentukan oleh berdasarkan kondisi gelombang pecah yang terbentuk. Keunggulan formula stabilitas Van der Meer dibandingkan formula terdahulu yaitu telah mempertimbangkan efek dari durasi badai, periode gelombang, permeabilitas struktur dan definisi tingkat kerusakan yang jelas.

METODOLOGI

Simulasi model tanggul lepas pantai dilakukan pada potongan terdalam tanggul pada kedalaman $\pm 17,0$ m di bawah permukaan laut (NCICD PMU, 2017). Desain tanggul kemiringan dengan berm merupakan pengembangan dari penelitian sebelumnya dimana permukaan halus tanpa armor telah diuji (Larasari et al., 2018). Tanggul prototip didesain sesuai kondisi badai kala ulang 10.000 tahun untuk kemudian diuji melalui eksperimen model fisik. Elevasi puncak dan lebar berm telah ditentukan sebelumnya dan dioptimasi berdasarkan kondisi gelombang dengan menggunakan formula *run-up* pada slope dengan berm (Van der Meer, 2002). Berbagai dimensi dan aspek geometri lainnya ditentukan dengan menyesuaikan kapasitas saluran gelombang. Seluruh aspek pada prototip dibawa ke skala $N_L = 1:30$ berdasarkan keserupaan Froude.

Pengujian Model Fisik 2D

Pengujian model fisik 2D dilaksanakan di dalam saluran gelombang Laboratorium Balai Litbang Pantai. Model diujikan di dalam saluran gelombang (1,0 m x 1,0 m x 40,0 m) yang dilengkapi dengan mesin pembangkit gelombang tipe piston dan instrumen peredam energi gelombang pada kedua ujung yang berbeda. Penampang saluran gelombang dan setup model di dalamnya diperlihatkan oleh Gambar 3.

Unit Armor

Alternatif armor yang diujikan terdiri dari tipe batu, kubus beton, dan tetrapod. Unit armor batu dimodelkan menggunakan batu alami rentang

diameter 0,034 – 0,049 m. Unit armor kubus dan tetrapod dicetak dari campuran mortar dengan komposisi tertentu sehingga dihasilkan berat jenis yang mendekati karakteristik prototip di lapangan. Karakteristik tiga tipe model armor – meliputi massa rerata, diameter nominal, berat jenis, dan porositas – ditampilkan di dalam Tabel 1.

Tabel 1 Karakteristik material yang digunakan dalam pengujian

Tipe armor	M ₅₀ (g)	D _{n50} (cm)	ρ _r (g/cm ³)	p _o (-)
Batu	196,61	4,24	2,51	0,427
Kubus	288,1	5,08	2,20	0,330
Tetrapods	118,7	3,70	2,34	0,589

Seluruh unit armor kemudian diberi pelapis warna dan disusun secara acak dalam dua lapis (n=2, Gambar 4). Lapis armor teratas di sepanjang permukaan tanggul diatur menggunakan warna-warna tertentu untuk memudahkan pengamatan *run-up* dan mengidentifikasi perpindahan unit armor.

Sedangkan pada unit lapis armor bawah diberikan warna putih untuk membedakan dengan unit armor lapis atas. Pengaturan rentang warna ini sedikit berbeda antar tipe armor satu dengan yang lainnya karena perbedaan dimensi unit (D_n) tidak memungkinkan perletakan dengan susunan yang sama (Gambar 5).

Sebagai lapis filter tanggul digunakan batu pecah berukuran D_n = 2 cm dengan ketebalan lapis 4 cm. Bagian inti tanggul didesain impermeabel dan terbuat dari urugan pasir yang dibentuk dengan volume dan dimensi sesuai desain yang kemudian dilapisi mortar setebal 5 cm. Lapis filter dan inti tanggul memiliki karakteristik yang sama

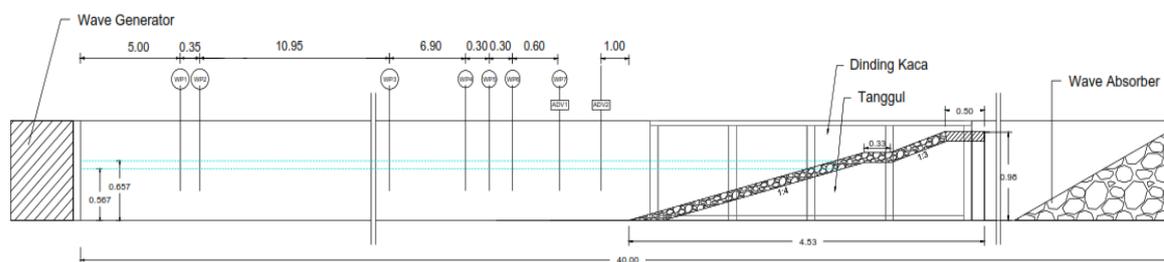
pada seluruh pengujian semua tipe armor.

Tes uji

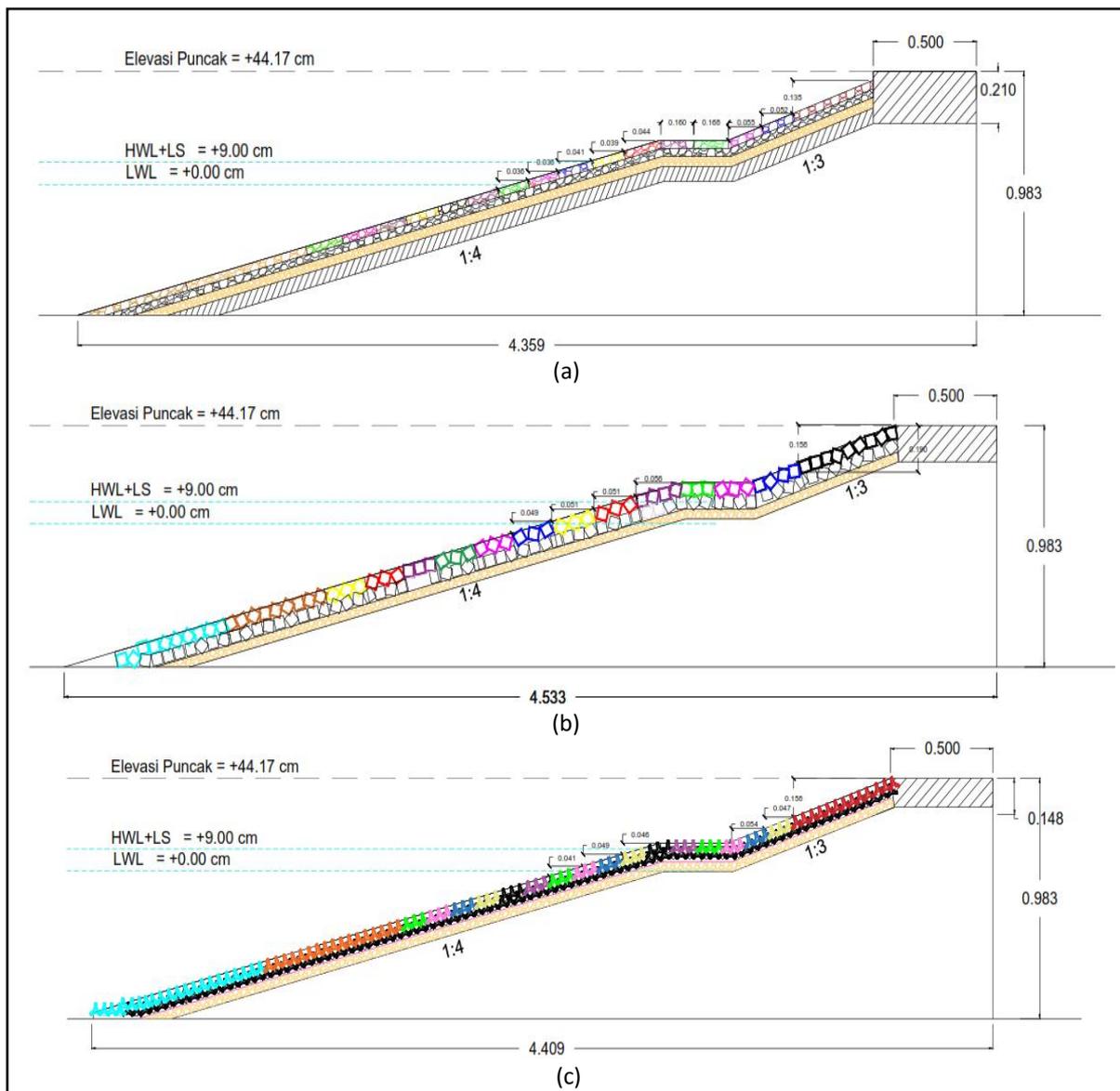
142 tes uji dilakukan dengan membangkitkan ±1000 gelombang regular (71 tes) atau irregular spektrum JONSWAP (71 tes, γ=3,3). Tes didesain menggunakan asumsi perairan laut dalam dengan kedalaman air bernilai konstan dari pembangkit gelombang hingga kaki struktur. Tes dikelompokkan dalam beberapa seri berdasarkan variasi nilai kedalaman air, d_s (cm) = 56,7 dan 65,7; kecuraman gelombang, s_{op} = H_{m0}/gT_p² = 0,025, 0,035, dan 0,050, dengan T_p adalah periode puncak dan H_{m0} adalah tinggi gelombang signifikan spektrum, H_{m0} = 4(m₀)^{1/2}. Dalam setiap seri, dilaksanakan 4 tes uji dengan peningkatan tinggi gelombang, H_s secara progresif (Owen and Allsop, 1984) dalam langkah 2,9 cm pada rentang 7,3 ≤ H_{m0} (cm) ≤ 24,9, dengan tetap menjaga nilai s_{op} konstan. Model tidak dibangun kembali pada setiap akhir tes uji, melainkan pada akhir tiap seri.

Analisis refleksi

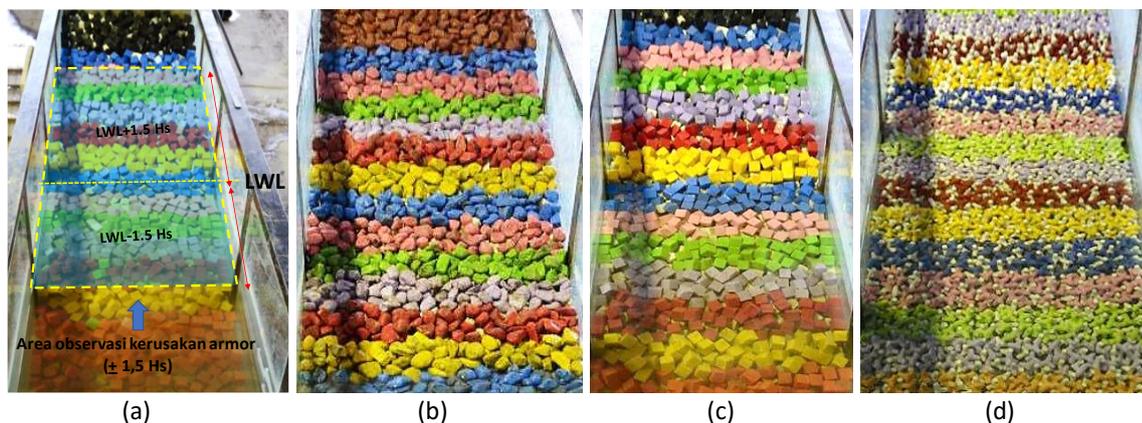
Saat uji berlangsung dua grup *wave probes* (wp1-wp3 dan wp4-wp7) diaktifkan untuk mengukur elevasi air pada titik-titik lokasi berbeda di depan tanggul. Susunan jarak antar *probe* pada grup kedua diposisikan sehingga sesuai dengan kriteria yang diberikan oleh mansaard dan Funke (1980) serta Zelt dan Skjelbreia (1993) untuk melakukan pemisahan gelombang insiden dan gelombang refleksi. Dengan menggunakan serangkaian *wave probes* tersebut data gelombang dianalisis menggunakan program Analisis Refleksi Gelombang (ANSSIG) yang dikembangkan oleh Balai Litbang Pantai.



Gambar 3 Setup model di dalam saluran gelombang



Gambar 4 Penampang model tanggul laut tipe: (a) batu (b) kubus dan (c) tetrapods; dimensi dalam meter



Gambar 5 (a) area observasi perpindahan unit armor pada tanggul: (b) batu (c) kubus, dan (d) tetrapods

Tabel 2 Matriks skenario pengujian

Series	Armor	Tipe gel.	d_s (cm)	H_{m0} (cm)	T_p (s)	Jumlah tes uji
1	batu	regular	57,6	11,4 – 23,3	1,05 – 2,16	11
2	batu	regular	65,7	11,7 – 23,1	1,05 – 2,16	12
3	batu	irregular	57,6	7,5 – 14,3	1,08 – 2,16	12
4	batu	irregular	65,7	7,6 – 14,8	1,05 – 1,95	11
5	kubus	regular	57,6	11,8 – 22,9	1,05 – 2,16	12
6	kubus	regular	65,7	11,1 – 21,0	1,05 – 2,16	12
7	kubus	irregular	57,6	7,4 – 14,8	1,08 – 2,16	12
8	kubus	irregular	65,7	7,5 – 14,4	1,05 – 2,16	12
9	tetrapods	regular	57,6	11,2 – 24,6	1,05 – 2,16	12
10	tetrapods	regular	65,7	11,6 – 24,9	1,05 – 2,10	12
11	tetrapods	irregular	57,6	7,6 – 14,2	1,08 – 1,95	12
12	tetrapods	irregular	65,7	7,3 – 19,5	1,08 – 2,16	12

Saluran gelombang tidak dilengkapi dengan perangkat *active wave absorber* untuk memitigasi multi-refleksi. Keterbatasan ini dikompensasi melalui serangkaian langkah *post processing* sebagai upaya kontrol kualitas data pada setiap tes uji.

Disipasi energi gelombang

Dengan asumsi tidak terjadi limpasan (*overtopping*) selama tes uji berlangsung, adaptasi dilakukan pada persamaan yang diberikan oleh Ahrens (1987). Dengan asumsi parameter muka air serta tinggi dan periode gelombang yang tetap selama tes uji, dapat diterapkan hukum kekekalan energi (energi direpresentasikan oleh luasan kurva spektrum); bahwa jumlah energi gelombang selalu sama pada kondisi tersebut. Tanpa memasukkan energi gelombang transmisi ($E_T = 0, K_t = 0$), energi gelombang akan selalu memenuhi persamaan berikut:

$$E_I = E_R + E_D$$

$$1,0 = K_r^2 + K_d^2$$

Dimana:

- E_I = energi gelombang datang,
- E_R = energi gelombang refleksi,
- E_D = energi gelombang yang terdisipasi,
- K_r = koefisien refleksi, dan
- K_d = koefisien disipasi.

Run-up gelombang

Nilai *run-up* diperoleh melalui pengamatan visual melalui video dokumentasi. Nilai *run-up* dikuantifikasi dengan cara menghitung jarak vertikal antara elevasi titik rayapan gelombang tertinggi dengan elevasi muka air tenang (*still water level, swl*) pada tiap tes uji. Selisih antara kedua jarak tersebut yang kemudian dinotasikan sebagai *Ru*. Nilai *Ru* yang mewakili satu tes uji

adalah nilai maksimum yang terjadi di sepanjang durasi pengujian.

Analisis kerusakan lapisan armor

Data kerusakan lapisan armor diambil setelah setiap tes uji selesai dilakukan. Beberapa gambar digital diambil pada setiap akhir tes dari posisi tegak lurus permukaan tanggul yang tetap. Perhitungan dilakukan pada awal dan akhir dari setiap tes. Perpindahan unit armor secara kuantitatif dibedakan ke dalam dua jenis pergerakan; ekstraksi dan pergeseran. Unit terekstraksi didefinisikan sebagai unit yang telah berpindah lebih dari satu diameter nominal ($>D_n$) ke area warna yang berbeda dari penempatan awal. Sedangkan unit bergeser didefinisikan sebagai unit yang titik beratnya telah keluar ($>0,5 D_n$) dari garis batas warna penempatan awalnya. Pengamatan lapisan armor pada pengujian ini dibatasi pada unit-unit lapis armor atas yang berpindah searah dengan gelombang datang. Kedua jenis pergerakan ini diberikan bobot yang sama dalam perhitungan kerusakan.

Pada kajian ini, kerusakan lapisan armor didefinisikan berupa perpindahan, dalam persentase dari total unit armor lapis atas, yang berada di dalam rentang $SWL \pm 1,5 H_s$. Kuantifikasi kerusakan lapis armor menggunakan parameter N_d . Nilai N_d diperoleh dari perbandingan antara unit armor yang memenuhi kriteria pergeseran dan ekstraksi dengan jumlah awal unit armor lapis atas yang berada di dalam area observasi.

Analisis pada studi ini berfokus untuk mengetahui perkembangan kerusakan armor yang terbentuk dalam suatu badai progresif. Maka dari itu, dalam analisis diambil nilai rerata dari *spectral moments* dan kerusakan secara kumulatif dalam satu seri, bukan per individual tes uji.



Gambar 6 Visualisasi pengamatan tinggi *run-up* gelombang

HASIL DAN PEMBAHASAN

Refleksi Gelombang

Refleksi gelombang pada ketiga lapis armor disajikan dengan melihat pengaruh parameter *spectral surf similarity* ($\xi_{m-1,0}$) pada Gambar 7. Parameter $\xi_{m-1,0}$ diperoleh menggunakan formula yang diperkenalkan oleh Zanuttigh *et al* (2006) untuk memasukkan pengaruh dari berm yang berada pada *swl* atau di atasnya.

Ketiga tipe tanggul armor memantulkan gelombang insiden dengan relatif rendah, dengan tingkat refleksi pada seluruh tes tidak melebihi 20% ($K_r < 0,2$). Penambahan unit armor secara signifikan mengurangi refleksi gelombang apabila dibandingkan dengan struktur serupa dengan permukaan licin ($0,061 < K_r < 0,56$; Larasari *et al.*, 2018). Sebaran nilai refleksi tertinggi diberikan oleh tanggul armor batu, disusul oleh tetrapods, dan terendah oleh kubus beton. Meskipun demikian, pada rentang ini tidak ditemukan performa armor yang mendominasi di atas tipe lainnya.

Meninjau refleksi berdasarkan tipe gelombang, baik uji gelombang regular maupun irregular menghasilkan K_r yang tidak jauh berbeda, berkisar pada nilai 0,05 - 0,2. Nilai $\xi_{m-1,0}$ pada tes gelombang regular memperlihatkan pengaruh yang lebih signifikan dibandingkan pada tipe irregular. Di sisi lain, tinggi muka air tampak memberikan pengaruh berkebalikan pada nilai refleksi, namun dengan selisih nilai yang tidak signifikan.

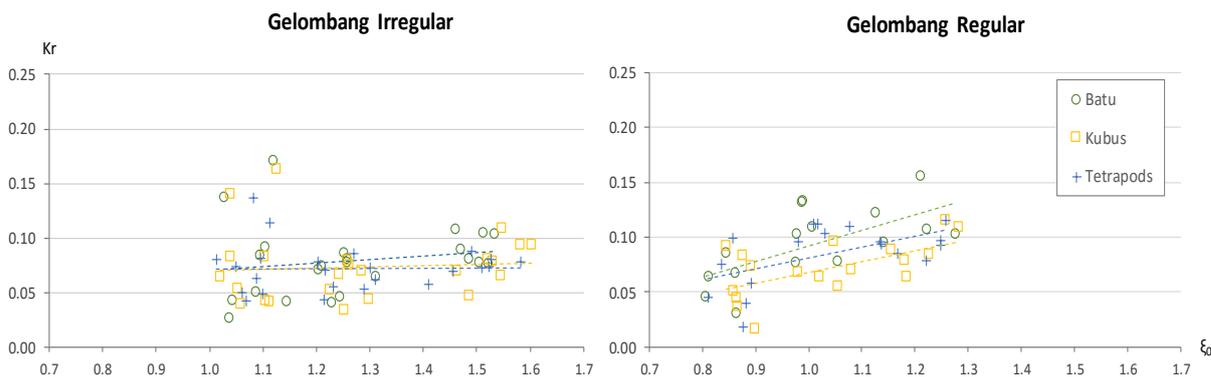
Dilakukan perbandingan antara data pengujian dengan pengujian pemecah gelombang armor batu dengan tanggul tanpa berm, dan data pengujian pemecah gelombang armor batu dengan berm (Lissev, 1997), serta formula yang diusulkan oleh Zanuttigh *et al.*, (2009). Sebagian besar data hasil

pengujian ketiga armor berada di bawah garis formula namun memperlihatkan kecenderungan yang secara keseluruhan cukup sesuai. Perbedaan antara nilai refleksi hasil pengujian dengan formula disebabkan oleh nilai faktor kekasaran γ_f yang bervariasi untuk masing-masing tipe armor (Bruce *et al.*, 2006).

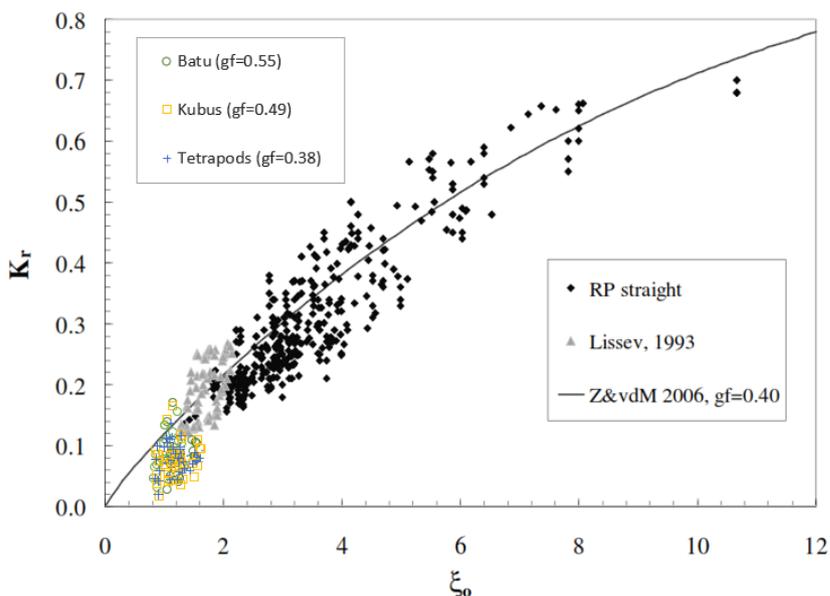
Disipasi Energi

Parameter K_r dan E_D untuk seluruh skenario pengujian diplotkan untuk membandingkan redaman energi pada ketiga lapis armor (Gambar 9). Armor yang disusun acak dalam dua lapis memberikan performa yang baik dalam meredam energi gelombang pada tes gelombang regular maupun irregular. Armor tetrapods memberikan nilai redaman tertinggi ($E_D > 98,1\%$). Hal ini dimungkinkan oleh porositas armor tetrapods yang lebih besar dibandingkan armor lainnya. Porositas yang lebih tinggi meningkatkan redaman oleh proses turbulensi aliran di ruang antara unit armor. Redaman yang sedikit lebih rendah diperlihatkan oleh armor kubus beton ($E_D > 97,3\%$) dan batu ($E_D > 97,1\%$). Meskipun demikian, derajat redaman tersebut jauh meningkat jika dibandingkan dengan struktur berm dengan permukaan halus ($69,0\% < E_D < 99,6\%$; Larasari *et al.*, 2018).

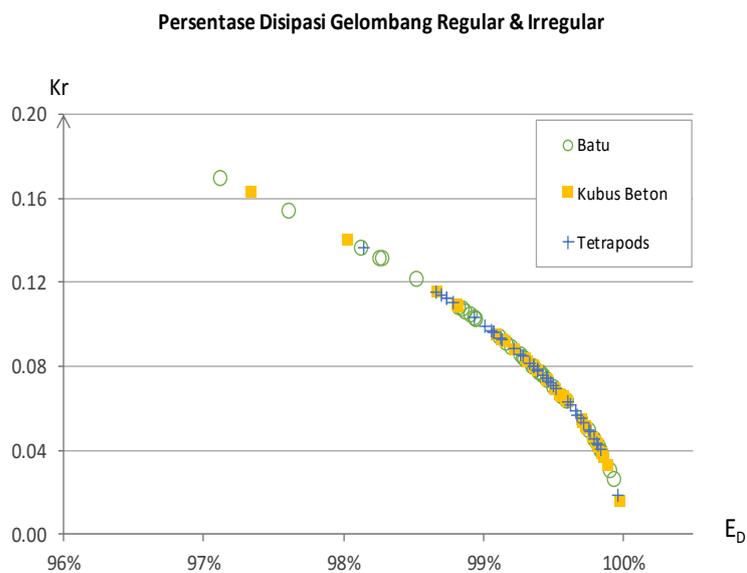
Secara menyeluruh, energi gelombang datang pada seluruh tes teredam lebih dari 97%. Kondisi ini konsisten pada dua kedalaman muka air. Berdasarkan prinsip kekekalan energi, semakin kecil koefisien refleksi yang dihasilkan maka akan makin besar redaman yang terjadi. Tingkat redaman yang dihasilkan cenderung meningkat dengan naiknya tinggi gelombang dan berkurang dengan pertambahan periode gelombang.



Gambar 7 Koefisien refleksi vs parameter surf similarity pada tiga tipe armor



Gambar 8 Perbandingan koefisien refleksi hasil pengujian dengan formula Zanuttigh *et al.* (2009)



Gambar 9 Grafik hubungan refleksi dan disipasi gelombang

Run-up Gelombang

Nilai run-up pada pengujian gelombang regular dan irregular ditampilkan dengan meninjau pengaruh dari parameter spectral surf similarity ($\xi_{m-1,0}$) terhadap run-up maksimum (R_u) yang terjadi pada tiap tes uji (Gambar 10). Berdasarkan grafik tersebut, run-up maksimum yang terukur pada pengujian berada dalam rentang nilai 0,07 – 0,20 m pada uji gelombang regular maupun irregular. Beberapa nilai di atas rentang tersebut terukur pada tes uji armor batu. Pengambilan data run-up melalui observasi visual membuat nilai yang diperoleh berupa pembulatan ke atas, sehingga pengaruh parameter *spectral surf similarity* tampak tidak dominan pada visualisasi rentang data ini. Hasil ini kurang ideal dengan formula yang diajukan oleh Van der Meer (2002). Pada formula tersebut disebutkan bahwa sampai dengan $\gamma_b \xi_0 \approx 1,8$ run-up relatif meningkat secara linear dengan peningkatan nilai $\gamma_b \xi_0$; pada nilai yang lebih tinggi, peningkatan mengecil ke arah garis yang lebih landai.

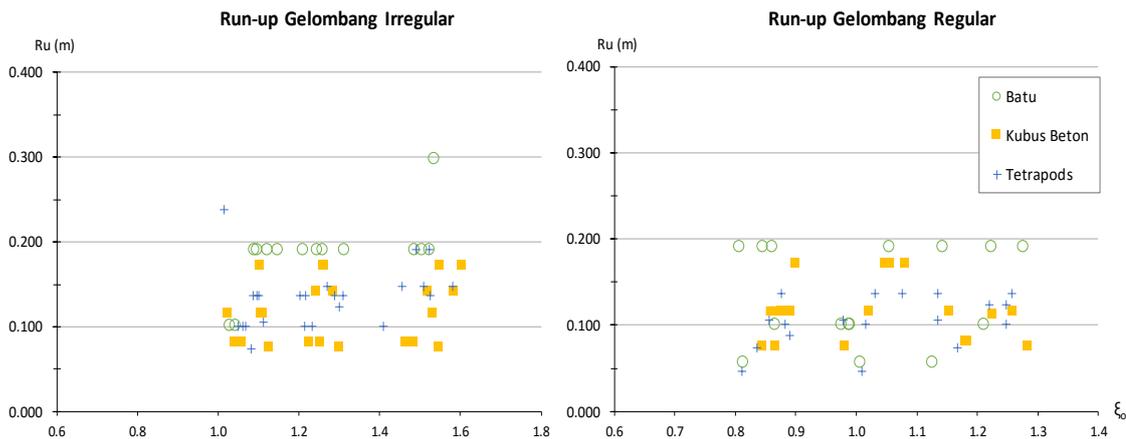
Satu hal yang perlu diperhatikan adalah run-up maksimum pada uji gelombang regular dengan irregular tidak menampakkan perbedaan rentang nilai, meskipun pada tes irregular gelombang dibangkitkan dengan karakteristik yang lebih rendah. Durasi yang lebih lama pada tes uji regular tidak mengubah serangan gelombang pada struktur, sedangkan pada gelombang irregular durasi badai yang lebih panjang memperbesar peluang terjadinya gelombang-gelombang ekstrem yang tinggi. Nilai run-up maksimum yang diperoleh pada uji irregular tersebut disebabkan oleh gelombang-gelombang tertinggi yang terjadi di sepanjang pengujian. Sedangkan, nilai run-up maksimum pada seri uji regular cenderung dikarenakan serangan gelombang insiden periodik di sepanjang durasi pengujian.

Untuk menghilangkan efek dari variasi tinggi gelombang yang dibangkitkan terhadap nilai run-

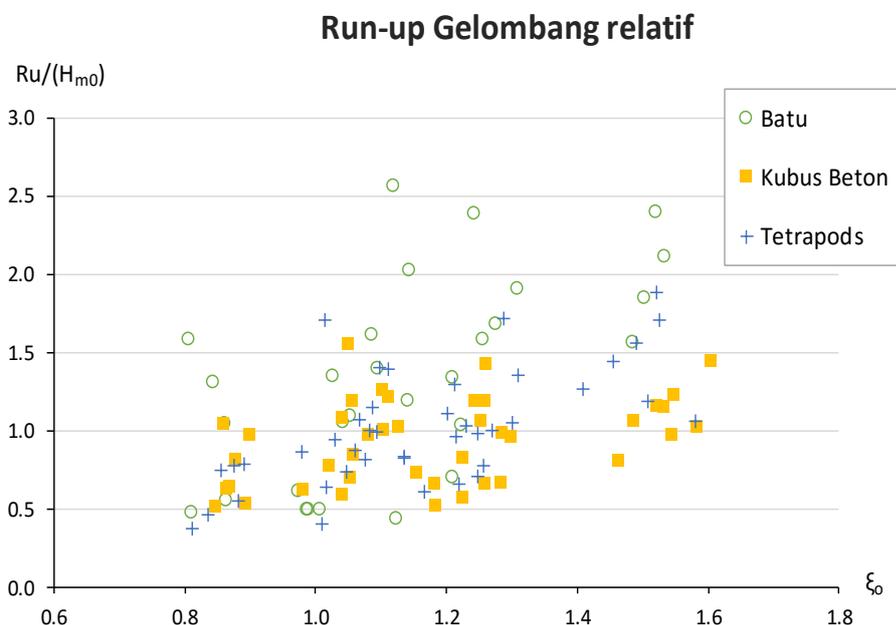
up maksimum, parameter non-dimensional berupa run-up maksimum relatif terhadap tinggi gelombang spektrum (R_u/H_{m0}) diformulasikan untuk seluruh data pengujian, baik uji gelombang regular maupun irregular (Gambar 11). Pada grafik ini data tampak tersebar ke dalam kelompok-kelompok terpisah, yang dikarenakan oleh perbedaan kecuraman gelombang, s_o . Tes uji berkecuraman gelombang besar memiliki nilai $\xi_{m-1,0}$ yang lebih tinggi.

Melalui visualisasi Gambar 11, terlihat dengan lebih jelas sebaran nilai run-up maksimum pada tiap tipe armor tanpa dipengaruhi oleh tinggi gelombang. Nilai R_u/H_{m0} yang tinggi diperlihatkan oleh pengujian armor batu, disusul oleh tetrapods dan kubus beton yang memiliki rentang nilai di bawahnya. Nilai-nilai tertinggi lebih banyak dihasilkan pada uji armor batu menggunakan gelombang irregular pada muka air rendah. Pada kedua tipe armor lainnya run-up maksimum pada pengujian muka air rendah juga relatif lebih tinggi dibandingkan muka air tinggi. Peningkatan efisiensi berm pada pengujian muka air tinggi merupakan aspek yang berperan dalam mengurangi rayapan gelombang pada studi ini. Muka air tinggi memiliki elevasi yang lebih dekat dengan berm, dengan nilai $R_c/d_s = 0,05$ dan $0,16$ secara berturut-turut untuk hwl dan lwl .

Pengaruh kekasaran permukaan dan permeabilitas lapis armor secara eksplisit dan terpisah tidak tampak melalui pengujian ini. Salah satu faktor yang berpengaruh dominan adalah perbedaan ukuran unit antara ketiga lapis armor. Unit armor kubus beton memiliki diameter nominal yang secara dominan lebih besar dibanding dua unit lainnya, dengan penyusunan yang cenderung lebih rapat dibanding lainnya (porositas awal, $p_o = 0,33$). Pada armor kubus run-up direduksi dengan mekanisme gelombang datang menubruk sisi permukaan unit-unit kubus, yang kemudian secara dominan menahan dan mereduksi aliran yang bergerak ke atasnya.



Gambar 10 Run-up maksimum pada pengujian gelombang irregular dan gelombang regular



Gambar 11 Run-up maksimum relatif

Kerusakan Lapisan Armor

Kerusakan lapis armor disajikan pada grafik yang telah ditampilkan pada beberapa kondisi hidraulik pengujian yang berbeda (Gambar 12). Melalui grafik, diperlihatkan hubungan antara angka stabilitas (N_s) terhadap persentase kerusakan lapis armor kumulatif (N_d) dalam satu seri yang merepresentasikan simulasi dari badai progresif.

Lapis armor batu menghasilkan derajat kerusakan tertinggi hampir di setiap tes uji dan dengan nilai yang signifikan pada akhir seri. Melalui representasi badai progresif, ketiga alternatif lapis armor menunjukkan kerusakan dengan laju perkembangan bervariasi. Kerusakan armor batu pada tes uji yang berurutan meningkat

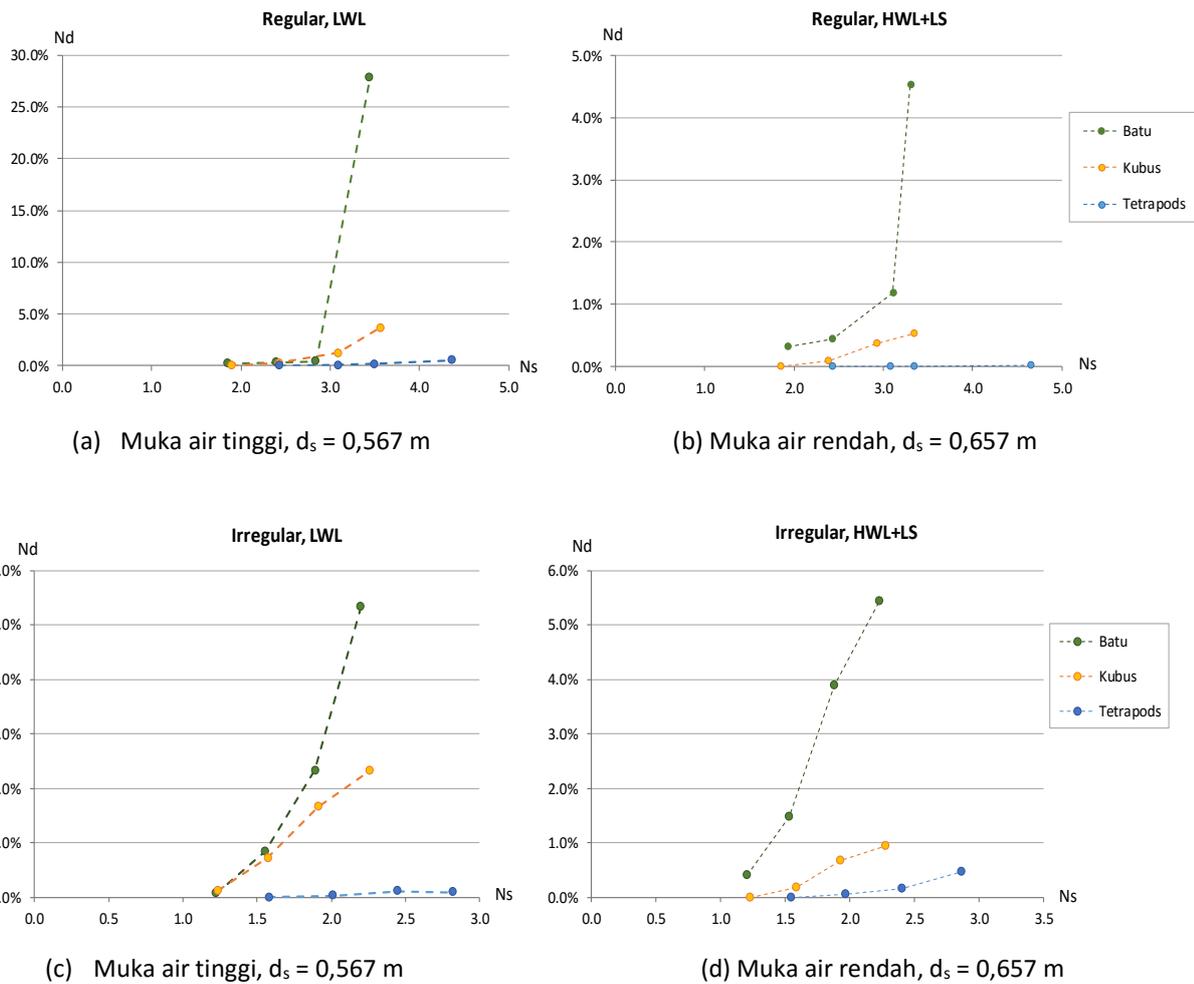
dengan cepat, ditandai dengan garis curam yang menghubungkan tes uji berurutan. Laju perkembangan kerusakan yang tinggi terutama ditemui pada step terakhir uji regular, dimana beban gelombang yang dibangkitkan telah melampaui kondisi desain.

Kerusakan armor kubus beton meningkat dengan derajat yang lebih rendah, sedangkan armor tetrapod menunjukkan stabilitas yang sangat baik di sepanjang seri uji. Hasil ini diperoleh mengingat formula desain unit kubus dan tetrapods diperuntukkan pada kemiringan yang curam (1:1,5). Sebagian lagi dipengaruhi oleh N_s ketiga tipe armor yang tidak setara karena perbedaan sifat karakteristik dari masing-masing armor. Angka stabilitas unit tetrapods yang tinggi disebabkan oleh material dengan massa jenis

tinggi, yang menyebabkan unit tetrapods dapat mencapai berat yang diperlukan dengan dimensi yang kecil, sehingga lebih stabil dalam menghadapi kondisi beban gelombang serupa dibandingkan kedua tipe armor lainnya.

Pada kajian ini, pengujian gelombang regular menghasilkan persentase kerusakan final yang cenderung lebih tinggi dibandingkan gelombang irregular. Namun dalam satu rangkaian seri, gelombang irregular merusak dengan lebih besar pada tiap tahapannya, meskipun parameter gelombang yang dibangkitkan lebih rendah dibandingkan gelombang regular. Durasi yang lebih lama pada seri uji regular tidak mengubah serangan gelombang pada struktur. Sedangkan pada uji gelombang irregular, durasi badai yang lebih panjang memperbesar peluang terjadinya gelombang-gelombang ekstrem yang tinggi. Kondisi tersebut secara berkelanjutan memungkinkan area kerusakan yang lebih meluas dengan derajat kerusakan yang lebih besar dibandingkan gelombang regular.

Terkait pengaruh dari elevasi muka air, uji pada muka air tinggi menghasilkan derajat kerusakan yang lebih rendah dibandingkan pengujian muka air rendah. Perbedaan dimungkinkan oleh pengaruh berm yang meningkat ketika muka air berada lebih dekat dengan elevasi berm. Peranan berm menjadi lebih dominan pada kemiringan rerata permukaan tanggul pada pengujian dengan muka air tinggi. Pada muka air rendah, berm tidak terlalu signifikan dalam mempengaruhi gaya gelombang datang. Pengaruh ini lebih jelas dipelihatkan melalui tes gelombang regular. Secara keseluruhan, kerusakan terbesar lapis armor terbentuk di sekitar swl yang didominasi pada rentang area terjadinya run-down gelombang. Kondisi ini serupa dengan pengamatan Dijkstra (2008), dimana kerusakan pada area tersebut disebabkan tubrukan antara gaya seret arus balik gelombang yang bertemu dengan gelombang insiden dominan.



Gambar 12 Perpindahan armor pada gelombang regular (a dan b) dan irregular (c dan d)

KESIMPULAN

Berdasarkan uji eksperimental lapis armor batu, kubus beton, dan tetrapods pada tanggul dengan berm pada studi ini, dapat diambil beberapa kesimpulan berikut ini. Kajian respon hidraulik yang terdiri dari gelombang refleksi, disipasi energi, rayapan gelombang mengindikasikan bahwa penambahan ketiga lapis armor secara efektif meningkatkan performa pada parameter-parameter tersebut dengan tingkat efisiensi yang bervariasi. Secara dominan, armor tetrapods menunjukkan tingkat kerusakan lapis armor terendah, dibawah 0,5%, dalam menghadapi simulasi badai progresif. Rendahnya kerusakan yang terbentuk merepresentasikan tingginya stabilitas tetrapods dibanding alternatif armor lain pada eksperimen ini.

Mengingat banyaknya variabel dan parameter relevan yang mempengaruhi stabilitas, kajian lebih mendalam diperlukan untuk secara utuh mengkarakterisasi stabilitas hidraulik lapis armor pada struktur dengan berm. Rentang lebar berm dan kemiringan yang berbeda dapat diuji untuk menemukan kombinasi yang optimum sesuai kondisi hidrodinamik lokasi di Teluk Jakarta Untuk mengatasi over-design lapis armor, faktor pengali stabilitas (Dijkstra, 2008) dapat diaplikasikan untuk memperoleh ukuran unit yang optimal pada tanggul dengan berm.

Tinjauan parameter respons dan stabilitas hidraulik tiga alternatif lapis armor yang terkumpul pada studi ini diharapkan dapat menyediakan informasi pada proses pembuatan detail desain tanggul laut Teluk Jakarta.

UCAPAN TERIMA KASIH

Studi ini merupakan kegiatan dukungan Puslitbang Sumber Daya Air Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat untuk Program Pengembangan Terpadu Pesisir Ibukota Negara (PTPIN/NCICD). Penulis berterima kasih kepada Kepala Pusat Litbang Sumber Daya Air dan Kepala Balai Litbang Pantai serta seluruh staff yang terlibat dalam studi ini.

DAFTAR PUSTAKA

Ahrens, J. P. (1987). *Characteristics of Reef Breakwaters* (No. CERC-TR-87-17). Mississippi: Coastal Engineering Research Center Vicksburg Ms.

- Bachtiar, H., Badriana, R., Sembiring, L., Adytia, D., Samskerta, I. P., Andonowati, A., & van Groesen, E. (2017). Optimasi desain rencana tanggul lepas pantai NCICD di Teluk Jakarta terhadap kemungkinan tsunami akibat letusan Gunung Anak Krakatau. *Jurnal Sumber Daya Air*, 13(1), 1-10.
- Bachtiar, H., Larasari, A., Adytia, D., Azhar, R. M., & Eliasta, L. (2019). Hydraulic Response of NCICD Conceptual Design Outer Sea Dike subjected by Tsunami Generated by Krakatau Explosion. INTAKINDO International Conference on Construction Technology and Innovation on 20-21 March 2019, Jakarta (submitted).
- Badriana, M. R., Bachtiar, H., Adytia, D., Sembiring, L., Andonowati, & van Groesen, E. (2017). Wave run-up of a possible Anak-Krakatau tsunami on planned and optimized Jakarta Sea Dike. *In AIP Conference Proceedings* (Vol. 1857, No. 1, p. 090004). AIP Publishing.
- Bruce, T., Van der Meer, J. W., Franco, L. & J. Pearson, (2006). A comparison of overtopping performance of different rubble mound breakwater armour. *Proc. ICCE 2006*, vol. 5, 4567-4579.
- Burcharth, H. F., Hedar, P. A., Ouemeraci, H., Martinez, A., Hamer, B. A., Lamberti, A., & Archetti, R., (2003). *State-of-the-Art of Designing and Constructing Berm Breakwaters*. PIANC General Secretariat.
- Dijkstra, O.P.J. (2008). *Armour stability on a bermed slope breakwater*. M.Sc. thesis, Delft University of Technology, Delft.
- Hudson, R.Y., (1959). *Laboratory investigation of rubble mound breakwaters*. ASCE J. Waterw. Harbors Div., 85 (WW3): 93-121.
- KOICA KRC. (2018). *Conceptual Design Report: Review of key technical points*. Jakarta: National Capital Integrated Coastal Development Consulting (unpublished).
- Larasari, A. A., Husrin, S., Bachtiar, H., & Sembiring, L.E. (2018). Preliminary Studies Of Dike Profiles For Jakarta Outer Sea Dike : Physical Model Test Results. *Proceedings of the 21st IAHR-APD Congress 2018*, Yogyakarta, Indonesia.
- Lissev, N., & Tørum, A. (1997). *Influence of the core configuration on the stability of berm breakwaters*. In Coastal Engineering 1996 (pp. 1735-1747).
- Losada, M. A., Desire, J. M., & Alejo, L. M. (1986). Stability of blocks as breakwater armor units. *Journal of Structural Engineering*, 112(11), 2392-2401

- Losada, I. J., Lara, J. L., Guanche, R., & Gonzalez-Ondina, J. M. (2008). Numerical analysis of wave overtopping of rubble mound breakwaters. *Coastal engineering*, 55(1), 47-62.
- Mansaard, E. P., & Funke, E. R. (1980). The measurement of incident and reflected spectra using a least squares method. In *Coastal Engineering 1980* (pp. 154-172).
- Shore Protection Manual. (1984). US Army Engineer Waterways Experiment Station. US Government Printing Office, Washington, DC, 2.
- National Capital Integrated Coastal Development Project Management Unit. (2017). Some considerations on NCICD Jakarta sea dike. Presentasi dipaparkan pada *Workshop Outer Sea Dike* 12 Desember 2017, Jakarta, Indonesia.
- National Capital Integrated Coastal Development Project Management Unit. (2018). National Capital Integrated Coastal Development: Proteksi, Konservasi, Integrasi, dan Revitalisasi. Presentasi dipaparkan pada workshop 18 April 2018, Jakarta, Indonesia.
- Owen, M. W., & Allsop, N. W. H. (1984). 6 Hydraulic modelling of rubble mound breakwaters. In *Breakwaters Design & Construction* (pp. 71-78). Thomas Telford Publishing.
- Rajendra, K., Balaji, R., & Mukul, P. (2017). Review of Indian research on innovative breakwaters.
- Rao, S., Pramod, C., & Rao, B. (2004). Stability of berm breakwater with reduced armor stone weight. *Ocean Engineering*, 31(11-12), pp.1577-1589.
- Rock Manual. (2007). The use of rock in hydraulic engineering (2nd edition). C683, CIRIA, London
- Sigurdarson, S., Viggoson, G., Tørum, A., & Smarason, O.B. (2001). Stable berm breakwaters. *International Workshop on Advanced Design of Maritime Structures in the 21st Century*. 5 – 7 March 2001, Yokosuka, Japan.
- Van der Meer, J. W. (1988). Deterministic and probabilistic design of breakwater armor layers. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 114(1), 66-80.
- Van der Meer, J. W. (2002). Technical report wave run-up and wave overtopping at dikes. TAW report (incorporated in the EurOtop manual).
- Van Gent, M.R. (2013). Rock stability of rubble mound breakwaters with a berm. *Coastal Engineering*, 78, pp.35-45.
- Van Gent, M., Smith, G.M., & van der Werf, I. (2012). Stability Of Rubble Mound Breakwaters with a Berm. *Coastal Engineering Proceedings*, 1(33), p.10.
- Via, L., Pullen, T., Stewart, T., & Allsop, W. (2013). Damage to Rubble Mound Breakwaters – Extracting Design Guidance from ‘Old’ Test Data. *ICE Publishing*, 140–148. <https://doi.org/doi: 10.1680/fsts.59757.0140>.
- Zanuttigh, B., & Van der Meer, J.W. (2006). Wave reflection from coastal structures. *Proc. ICCE*, vol. 5, 4337-4349.
- Zanuttigh, B., Van der Meer, J.W., Andersen, T.L., Lara, J.L., & Losada, I.J. (2008) Analysis of Wave Reflection from Structures with Berms Through an Extensive Database and 2DV Numerical Modelling. *Proc. Coastal Eng* (2008): 3285-3297.
- Zanuttigh, B., Van der Meer, J.W., Andersen, T.L., Lara, J.L., & Losada, I.J. (2009). To the Surf Similarity Parameter. 1–14.
- Zelt, J. A., & Skjelbreia, J. E. (1993). Estimating incident and reflected wave fields using an arbitrary number of wave gauges. In *Coastal Engineering 1992* (pp. 777-789).