

STUDI KINERJA BLOK BETON BERKAIT SEBAGAI PELINDUNG PANTAI

PERFORMANCE STUDY OF INTERLOCKING CONCRETE BLOCK AS COASTAL PROTECTION

I Putu Samskerta¹⁾, Dadang Karmen²⁾, Rahmat³⁾

^{1,2,3)}Balai Pantai – Pusat Litbang Sumber Daya Air,
Jl. Raya Gilimanuk - Singaraja Km. 122, Desa Musi, Kec. Grogak Kab. Buleleng
Email: samskerta@yahoo.com

Diterima: 28 November 2012; Disetujui: 6 Februari 2013

ABSTRAK

Terbatasnya batu alam dengan ukuran dan berat tertentu, telah mendorong penelitian blok beton untuk menggantikan batu sebagai lapis lindung pada revetmen. Loka Pengembangan Teknologi Pantai – Pusat Litbang Sumber Daya Air telah melakukan berbagai pengujian revetmen dengan berbagai bentuk armor. Salah satu hasil penelitian Loka Pengembangan Teknologi Pantai adalah Blok Beton Berkait (3B). Berbagai skenario diterapkan di dalam uji fisik dua dimensi (2D) untuk mengetahui koefisien stabilitas (K_D) dari berbagai modifikasi armor 3B. Dengan menerapkan skala 1:10 pada model tidak terdistorsi dan menggunakan persamaan Hudson diperoleh: blok beton full rongga memiliki nilai K_D 5,6, blok beton berkait dengan wave reflection memiliki nilai K_D 31,09, sedangkan blok beton berkait dengan wave reflection terkunci memiliki nilai K_D 24,29. Blok beton berkait tipe wave reflection memiliki kinerja terbaik dalam meredam hempasan gelombang dibandingkan 2 struktur lainnya. Jika dibandingkan 3 modifikasi armor 3B, prototip yang telah dibangun di Pantai Banyupoh memiliki nilai koefisien stabilitas ($K_D = 52,624 \approx 53$) yang lebih besar dibandingkan dengan 3 modifikasi armor 3B. Dari uji model fisik 2D diperoleh gerusan lokal pada blok beton berkait dipengaruhi oleh tinggi gelombang, lokasi gelombang pecah dan kedalaman air.

Kata kunci: Revetmen, armor, blok beton berkait, uji model fisik 2D, koefisien stabilitas, rayapan gelombang, gerusan lokal

ABSTRACT

Limited sources a certain size and weight of stone has been driven research of armor concrete blocks to replace stone as armor layer of revetment. The Experimental Sub-Station for Coastal Engineering (ESSCE) has examined revetment with various shape of armor layer. One research that conducted by ESSCE is armor layer made by interlocking concrete block (3B). Some scenarios have been carried out in two dimensional (2D) physical modelling to examine stability coefficient (K_D) the modification of 3B types of concrete block. By using undistorted model on 1:10 scale and Hudson formula, is known that full hollow of 3B type provides $K_D = 5.6$, 3B type with wave reflection has $K_D = 31.09$, and interlocked 3B type with wave reflection has $K_D = 24.29$. The 3B type of concrete block with wave reflection gives the best performance in reducing wave impact than two other structures. Comparing with modification of 3B armors, rubble mound revetment covered by 3B type armor layer which was constructed in Banyupoh has greater stability coefficient ($K_D = 52.624 \approx 53$) than modification of 3B armors. The 2D physical modeling shown that local scouring of 3B type concrete block is influenced by the type of wave height, wave breaking location and depth of the water.

Key words: Revetment, armor, interlocking concrete block, two dimensional physical model, stability coefficient, run-up, local scouring

PENDAHULUAN

Penanganan pantai tererosi dengan revetmen telah dikenal sejak lama dan telah diterapkan di berbagai pantai di seluruh dunia (Pilarczyk 2010). Khusus untuk pantai wisata dimana akses menuju

pantai sangat diperlukan, revetmen dibuat lebih landai sehingga memudahkan orang untuk turun ke area pantai. Namun pada pantai-pantai yang relatif curam, keterbatasan lahan menjadi masalah tambahan dalam pengaplikasian revetmen dengan kemiringan besar tersebut. Pengembangan berbagai

bentuk revetemen dengan bentuk seragam pun dilakukan agar nilai pemanfaatan pantai bisa ditingkatkan.

Untuk mempertahankan kondisi struktur pengaman pantai dari hantaman gelombang, pada bagian depan bangunan biasanya dipasang lapis pelindung atau armor, dari batu alam atau beton. Terbatasnya batu alam dengan ukuran dan berat tertentu, telah mendorong penelitian dan pengembangan yang menghasilkan batu pengganti, yang dikenal dengan armor blok beton (Bakker, et al. 2003). Unit armor pada umumnya berukuran besar dan dibangun dengan menggunakan alat berat, sehingga sulit dibangun secara swadaya oleh masyarakat. Oleh karena itu Loka Pengembangan Teknologi Pantai – Pusat Litbang Sumber Daya Air melakukan berbagai penelitian tipe bangunan pengaman pantai dengan mengembangkan maupun memodifikasi unit armor agar mudah diterapkan di lapangan (Puslitbang SDA, 2011). Berbagai jenis unit armor telah melewati beberapa skenario uji model fisik 2 dimensi (2D) di laboratorium. Salah satu hasil penelitian Loka Pengembangan Teknologi Pantai adalah armor Blok Beton Berkait (3B).

Guna menguji keandalan armor 3B dalam meredam serangan gelombang, Loka Pengembangan Teknologi Pantai telah melaksanakan uji coba skala penuh armor tipe 3B di Pantai Banyupoh. Hasil evaluasi dan monitoring menunjukkan, revetmen dengan armor 3B masih kokoh berfungsi sebagai pelindung pantai setelah dibangun selama 2 tahun (Puslitbang SDA, 2011). Namun terjadi kerusakan ringan pada bagian bawah revetmen akibat pukulan batu-batu kerikil berdiameter 2 – 10 cm karena hampasan gelombang. Kerusakan ringan juga terjadi pada kaki prototip diakibatkan gerusan lokal (*local scouring*). Penelitian lanjutan guna mengembangkan armor ini pun terus dilakukan dengan memodifikasi bentuk dan berat satuan armor. Modifikasi ini bertujuan untuk meningkatkan angka stabilitas, mengurangi tinggi rayapan gelombang dan gerusan lokal. Untuk mengetahui efektivitas modifikasi bentuk armor 3B dalam meredam energi gelombang, maka dilakukan uji model fisik 2D pada beberapa modifikasi struktur armor.

Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui nilai koefisien stabilitas (K_D), tinggi rayapan dan gerusan lokal yang terjadi yang terjadi pada modifikasi armor 3B.

TINJAUAN PUSTAKA

Revetmen adalah struktur pelindung pantai yang dibuat sejajar pantai dan biasanya memiliki permukaan miring (Breteler, Pilarczyk and Stoutjesdijk, 1998). Struktur lapis lindung (armor)

revetmen biasanya terdiri beton, timbunan batu, karung pasir, dan beronjong (gabion). Karena permukaannya terdiri dari timbunan batu atau blok beton dengan rongga-rongga diantaranya, maka revetmen lebih efektif untuk meredam hampasan gelombang (Mangor, 2004).

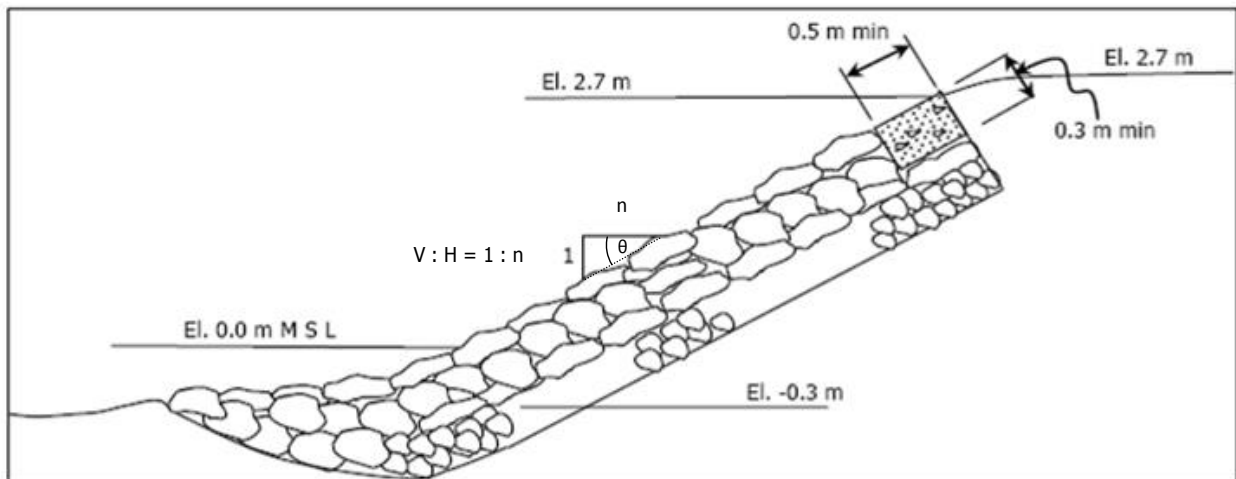
Revetmen sangat sesuai apabila dibangun pada pantai berpasir dan banyak terjadi aktivitas di depannya. Susunannya yang miring membuat masyarakat masih bisa menikmati keindahan pantai dan memanfaatkan pantai untuk tujuan wisata. Berbagai variasi kemiringan dan bahan, membuat revetmen banyak dipilih dalam mengatasi erosi pantai, khususnya pantai wisata. Di atas revetmen biasanya dibangun pedestrian atau jalan, yang bisa dimanfaatkan warga dan wisatawan (Puslitbang SDA, 2007).

Pemilihan tipe dan bahan revetmen sangat menentukan keberhasilan suatu revetmen dalam mengatasi erosi pantai dengan dampak yang minimal terhadap masyarakat dan lingkungan. Struktur revetmen terdiri dari unit-unit pelindung yang disusun dengan kemiringan tertentu, dikenal dengan struktur tipe *rubble*, seperti ditunjukkan pada Gambar 1. Unit pelindung pada bagian luar yang dikenal dengan istilah armor ini dapat dibuat dari batu belah atau bulat atau dari blok-blok beton. Blok beton sebagai armor yang sudah dikenal antara lain kubus, tetrapod, akmond, dan dolos (Balitbang PU, 2007).

Stabilitas revetmen jenis *rubble mound* di bawah gelombang telah lama dipelajari oleh banyak peneliti dan para teknisi teknik pantai, tetapi masih mendapat perhatian yang serius karena dianggap sebagai salah satu penyebab keruntuhan bangunan. Oleh karena itu uji model fisik di laboratorium dan lapangan masih sering dilakukan (CIRIA, 2007).

Armor tidak dapat berdiri sendiri-sendiri, tetapi bekerja bersama-sama. Ikatan antar unit yang satu dengan yang lain tergantung dari jenis armor, yang berhubungan erat dengan stabilitas unit armor (U.S. Army Corps of Engineering 1995, US Army Corps of Engineers 2006). Stabilitas unit armor ditentukan oleh koefisien stabilitas yang disingkat K_D .

K_D tergantung pada bentuk batu/beton pelindung, kekasaran permukaan batu/beton, ketajaman sisi-sisinya, ikatan antara butir, dan keadaan pecahnya gelombang. Untuk tinggi gelombang yang sama, makin besar harga K_D , maka berat armor yang diperlukan makin ringan, yang berarti struktur menjadi lebih ekonomis. Nilai K_D dapat dihitung dengan persamaan Hudson



Gambar 1 Revetmen Tipe Rubble Mound (Puslitbang SDA, 2007)

(U.S. Army Corps of Engineering 1995, Matsuda, et al. 2003), berikut:

$$K_D = \frac{\gamma_b \cdot H^3}{w \cdot (S_r - 1)^3 \cdot \cot \theta}$$

Keterangan: γ_b adalah berat jenis armor/batu (kg/m^3), H adalah tinggi gelombang rencana (m), W adalah berat satuan armor (kg), θ adalah sudut kemiringan struktur sisi laut ($^\circ$). S_r adalah kerapatan relatif unit armor terhadap air laut, yang dihitung dengan persamaan (U.S. Army Corps of Engineering 1995):

$$S_r = \frac{\gamma_b}{\gamma_a}$$

Keterangan: γ_a adalah berat jenis air tawar/laut berat jenis air (air tawar = 1000 kg/m^3 dan air laut = 1025 kg/m^3).

Parameter desain revetmen lainnya yang diamati melalui uji model fisik adalah rayapan gelombang. Rayapan atau *run-up* didefinisikan sebagai jarak vertikal yang dapat dicapai oleh gelombang di atas elevasi muka air tenang (*still water level*). Tinggi rayapan diperhitungkan pada kondisi elevasi muka air desain (tertinggi) sehingga konstruksi aman terhadap limpasan (Pullen, et al. 2007). Gelombang pada saat menghantam revetmen akan menimbulkan luncuran air pada permukaan revetmen tersebut, dan luncuran air tersebut dinamakan rayapan gelombang atau *wave run-up*. Puncak tertinggi yang dicapai oleh rayapan tersebut dinamakan tinggi rayapan gelombang (R_u). Tinggi rayapan gelombang merupakan fungsi kekasaran permukaan dinding revetment, kemiringan revetmen (θ), tinggi gelombang (H), periode gelombang (T) atau panjang gelombang (L_o) di laut dalam. Tinggi rayapan gelombang dapat

diformulasikan sebagai berikut (US Army Corps of Engineers 2006, CIRIA, CUR and CETMEF 2007):

$$\frac{R_u}{H} = f \cdot (I_r) \quad 1)$$

I_r atau angka Iribaren dihitung dengan persamaan (US Army Corps of Engineers 2006, CIRIA, CUR and CETMEF 2007):

$$I_r = \frac{\tan \theta}{\left(\frac{H}{L_o}\right)^{1/2}} \quad 2)$$

Suatu model fisik sedapat mungkin mendekati keserupaan geometrik (*geometric similarity*), kinematik (*kinematic similarity*) dan dinamik (*dynamic similarity*). Keserupaan geometrik yang merupakan fungsi dari dimensi panjang (L) mensyaratkan model dan prototip sebanding ukurannya dalam segala arah, sehingga diperoleh bentuk yang sama antara prototip dan model. Perbandingan skala panjang dinyatakan sebagai : $(L_r) = L_m/L_p$. Dimana indeks r, m, dan p masing-masing menyatakan rasio, model dan prototip. Dengan demikian L_r harus sama untuk semua bagian model. Keserupaan kinematik dapat dicapai bila keserupaan geometrik terpenuhi dan setiap partikel yang sebanding berada pada posisi yang sebanding pada setiap waktu. Dalam hal model bangunan pelindung pantai, keserupaan geometrik dipenuhi bila dimensi lebar, panjang, tinggi, kemiringan dan dimensi batu pada model sebanding dengan prototip (Hughes, 1993).

METODOLOGI

Pada penelitian ini dilakukan pengumpulan data primer dan data sekunder, pengolahan data

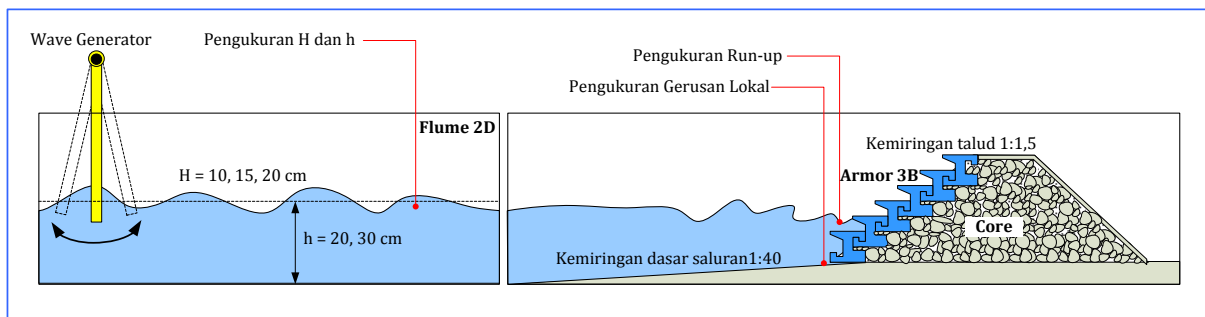
primer dan sekunder, serta uji model fisik dua dimensi (2D). Pengumpulan data primer berupa pengamatan pasang surut, yang dilakukan selama 15 hari dengan interval 1 jam di Pantai Candi Kusuma. Data pasang surut tersebut digunakan untuk menentukan kedalaman muka air pada saluran kaca. Data sekunder berupa data angin 10 tahun (1999-2008) diperoleh dari Stasiun BMKG Banyuwangi. Data tersebut selanjutnya digunakan untuk meramalkan tinggi gelombang signifikan (H_s) di lokasi studi, untuk selanjutnya dimodelkan pada uji model fisik 2D. Hasil uji model fisik 2D selanjutnya dianalisis sehingga diperoleh nilai K_D , tinggi rayapan dan gerusan lokal yang terjadi pada modifikasi armor 3B.

Pelaksanaan Uji Model Fisik 2D

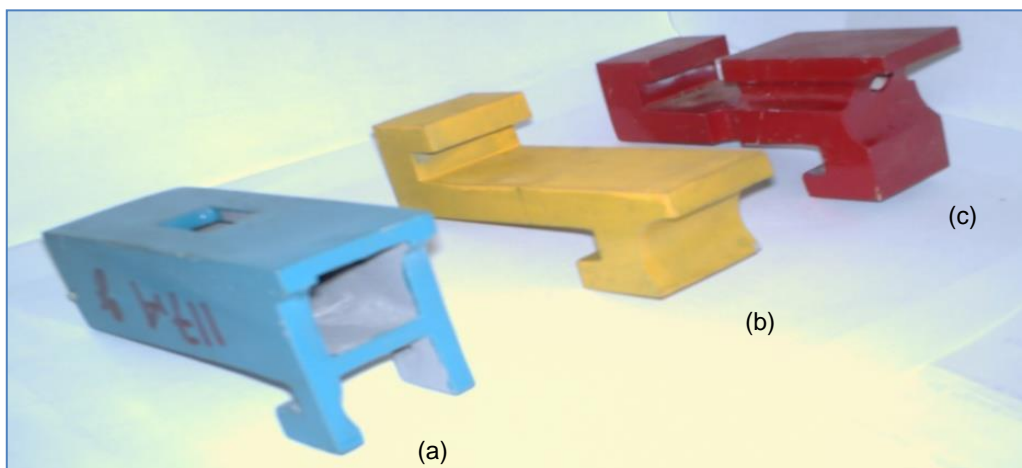
Uji model fisik 2D untuk mengetahui nilai K_D , rayapan gelombang, dan gerusan lokal dilaksanakan pada saluran kaca (*flume*) Puslitbang Sumber Daya Air. Saluran tersebut memiliki panjang total 40 m, lebar 0,6 m dan tinggi 1,2 m. Gelombang dibangkitkan oleh pembangkit gelombang regular

(*regular wave generator*), dengan kondisi pemodelan seperti terlihat pada Gambar 2. Model fisik 2D dibuat dengan pendekatan keserupaan geometris sesuai dengan kriteria Froude, yaitu: skala dalam arah horizontal dan arah vertikal sama atau $n_h = n_v$ (Huges, 1993). Model dibuat sebagai model tanpa distorsi (*undistorted model*), dimana dasar saluran dibangun tetap tidak berubah akibat aliran air. Dengan memperhatikan kemampuan *wave generator*, ukuran model dan kapasitas saluran kaca, maka dipilih skala model 1:10 (L_m/L_p).

Revetmen dengan kemiringan talud 1 : 1,5 dan dilindungi dengan replika armor 3B diuji pada saluran kaca pada kedalaman air 20 dan 30 cm. Tiga modifikasi blok beton seperti terlihat pada Gambar 3 dipasang sebagai armor. Tiga modifikasi armor tersebut diantaranya: blok beton kubus *full* rongga berkait (Gambar 3 (a)), blok beton berkait dengan *wave reflection* (Gambar 3 (b)) dan blok beton berkait dengan *wave reflection* terkunci (Gambar 3 (c)). Armor 3B disusun secara beraturan diuji pada tiga variasi tinggi gelombang, yaitu: 10 cm, 15 cm,



Gambar 2 Skema Pelaksanaan Uji Model Fisik 2D pada Saluran Kaca Pusat Litbang Sumber Daya Air



Gambar 3 Modifikasi Armor Blok Benton Berkait (3B): (a) Blok Beton Kubus *Full* Rongga Berkait; (b) Blok Beton Berkait dengan *Wave Reflection*; (c) Blok Beton Berkait dengan *Wave Reflection* Terkunci

dan 20 cm. Di bawah blok beton dipasang campuran kerikil dengan diameter \varnothing 2 - 3 cm dan pasir sebagai lapisan pengisi. Di sekitar struktur bangunan diberi lapisan pasir dengan diameter 0,1 mm dan ketebalan 6 cm. Sedangkan kemiringan dasar pantai dibuat tetap sebesar 1 : 40. Berat satuan masing-masing struktur (W) adalah: 0,110 kg untuk blok beton kubus *full* rongga berkait, blok beton berkait dengan *wave reflection* 0,15 kg, blok beton berkait dengan *wave reflection* terkunci 0,180 kg.

Hasil pengukuran uji model fisik 2D adalah data tinggi gelombang yang mengakibatkan keruntuhan pada struktur armor, tinggi rayapan dan gerusan lokal. Harga koefisien kestabilan (K_D) dihitung berdasarkan hasil pengukuran tinggi gelombang pada saluran kaca yang mengakibatkan blok-blok beton mulai bergerak, ikatan pada blok beton mulai bergeser sampai akhirnya struktur runtuh secara keseluruhan (Matsuda, et al. 2003). Hasil pengukuran pada uji model fisik 2D tersebut kemudian dianalisis dan dibandingkan dengan hasil *running* model fisik dari prototip yang terpasang di lapangan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Modifikasi Armor 3B

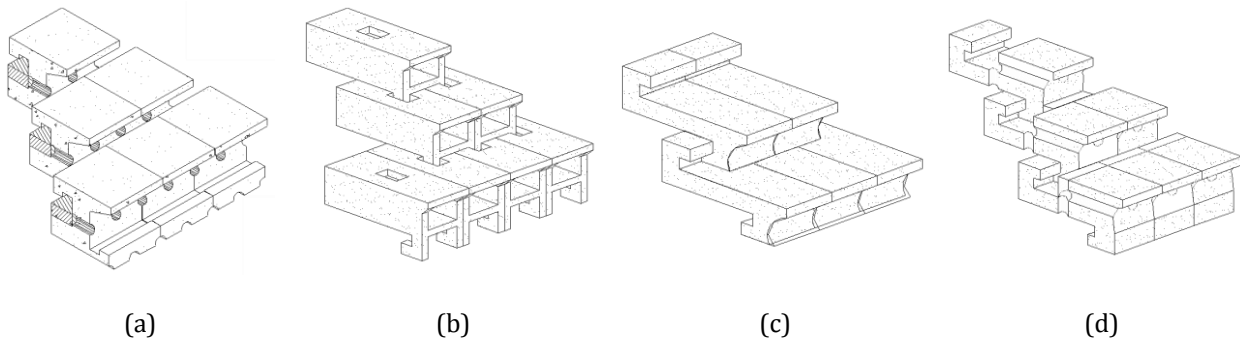
Beberapa hasil penelitian terdahulu menunjukkan revetmen pelindung pantai dengan armor 3B ini tidak dapat diterapkan pada semua jenis pantai (Puslitbang SDA, 2007). Kriteria dan persyaratan desain sesuai dengan karakteristik armor 3B dengan kemiringan trap 1:1,2 hanya efektif diterapkan pada pantai dengan kemiringan maksimal (i) = $0,83^\circ$ (Puslitbang SDA, 2011). Untuk mendapatkan redaman terhadap energi gelombang yang lebih optimal maka dilakukan modifikasi terhadap armor 3B yang telah dipasang di lapangan. Modifikasi terutama dilakukan pada bagian struktur pengunci. Dengan adanya perbaikan pada struktur pengunci, maka armor 3B ini akan menjadi struktur yang masif (Matsuda, et al. 2003). Efek kuncian yang baik memungkinkan unit armor dipasang lebih tegak. Dengan demikian armor bisa diterapkan pada pantai yang memiliki kemiringan lebih besar dari $0,83^\circ$. Dengan adanya modifikasi yang dibuat dengan mengembangkan bentuk armor yang mampu meredam atau memantulkan gelombang, maka gerusan lokal yang pada kaki struktur dapat dikurangi.

Dari armor 3B yang telah dipasang di Pantai Banyupoh seperti terlihat pada Gambar 4 (a),

dikembangkan 3 modifikasi blok beton seperti terlihat pada Gambar 4 (b), Gambar 4 (c), dan Gambar 4 (d). Modifikasi armor 3B pada Gambar 4 (a) dilakukan pada struktur pengunci dan bagian depan armor dengan menambahkan rongga dan *wave reflection*. Modifikasi pertama merupakan blok beton kubus *full* rongga berkait seperti pada Gambar 4 (b). Pada modifikasi pertama rongga blok beton dibuat lebih besar dengan tujuan agar limpasan gelombang pada struktur lebih rendah. Gelombang yang mengenai struktur akan masuk ke rongga beton sehingga limpasan gelombang yang terjadi di atas struktur revetmen menjadi lebih rendah. Modifikasi kedua Gambar 4 (c), adalah armor 3B dengan *wave reflection* (pemantul gelombang). Armor 3B dengan pemantul gelombang pada bagian depan dibuat dengan tujuan mengurangi limpasan pada struktur (Pearson, et al. 2004). Gelombang yang menghantam struktur revetmen dengan *wave reflection* akan terpantulkan ke depan struktur sehingga volume air yang melimpas di atas struktur berkurang. Jenis modifikasi terakhir Gambar 4 (d) adalah armor 3B dengan *wave reflection* terkunci. Pada modifikasi terakhir ini disamping memiliki bentuk melengkung, pada bagian depan armor juga memiliki rongga. Bentuk yang melengkung akan memantulkan gelombang yang datang. Pantulan gelombang pada armor akan menghantam gelombang yang datang sehingga daya rusak gelombang bisa dikurangi. Sedangkan rongga berfungsi untuk mengurangi tinggi limpasan pada struktur revetmen. Kekurangan akibat adanya lubang pada armor 3B jenis ini adalah adanya air yang masuk ke dalam rongga armor, akan meningkatkan daya angkat (*uplift*) pada struktur revetmen.

Stabilitas Armor 3B

Pengamatan dimulai dengan gelombang paling rendah (10 cm) selanjutnya tinggi gelombang ditambah menjadi 15 cm dan 20 cm. Struktur diuji dengan serangan gelombang selama 2 jam berturut-turut. Untuk setiap gelombang datang dilakukan pengukuran tinggi rayapan *run-up* (R_u) dan *run-down* (R_d). Percobaan dihentikan apabila blok beton sudah mulai bergerak atau terjadi keruntuhan. Tinggi gelombang yang menyebabkan keruntuhan struktur pada setiap seri percobaan dicatat pada. Hasil pengamatan 3 modifikasi armor 3B pada uji model fisik 2D seperti terlihat pada Tabel 1, 2 dan 3 berikut.



Gambar 4 Isometri Armor Blok Beton Berkait (a) Prototip di Pantai Banyupoh; (b) Blok Beton Kubus Full Rongga Berkait; (c) Blok Beton Berkait dengan Wave Reflection; (d) Blok Beton Berkait dengan Wave Reflection Terkunci

Tabel 1 Hasil Uji Model Blok Beton Kubus Full Rongga Berkait

Seri	d (m)	H (m)	H _d (m)	H _b (m)	T (s)	L (m)	Cot θ	R _u (m)	R _d (m)	Keterangan
1	0,20	0,10	0,11	0,10	1,8	0,80	1 : 1,4	0,06	0,04	
2	0,20	0,15	0,15	0,15	1,8	1,10	1 : 1,4	0,07	0,04	
3	0,20	0,20	0,20	0,18	1,8	1,20	1 : 1,4	0,08	0,04	
4	0,20	0,10	0,11	0,09	2,5	1,10	1 : 1,4	0,12	0,05	Pada H = 0,095 m struktur bergerak dan runtuh
5	0,20	0,15	0,17	0,13	2,5	1,25	1 : 1,4	0,14	0,05	
6	0,20	0,20	0,21	0,19	2,5	1,50	1 : 1,4	0,18	0,05	
7	0,30	0,15	0,15	0,14	1,8	1,20	1 : 1,4	0,20	0,06	
8	0,30	0,20	0,21	0,20	1,8	1,40	1 : 1,4	0,18	0,06	
9	0,30	0,10	0,12	0,10	2,5	1,15	1 : 1,4	0,06	0,03	
10	0,30	0,15	0,15	0,13	2,5	1,50	1 : 1,4	0,13	0,07	
11	0,30	0,20	0,21	0,19	2,5	1,70	1 : 1,4	0,21	0,07	

Keterangan notasi: d= kedalaman air (m), H =tinggi gelombang di laut dalam (m), H_d= tinggi gelombang sebelum menghantam struktur (m), H_b= tinggi gelombang setelah menghantam struktur (m), T=periode gelombang (detik), L= panjang gelombang (m), Cot θ = kemiringan struktur, R_u =run-up (m), R_d= run-down (m)

Tabel 2 Hasil Uji Model Blok Beton Berkait dengan Wave Reflection

Seri	d (m)	H (m)	H _d (m)	H _b (m)	T (s)	L (m)	Cot θ	R _u (m)	R _d (m)	Keterangan
1	0,20	0,10	0,11	0,10	1,8	0,80	1 : 1,6	0,13	0,04	
2	0,20	0,15	0,15	0,14	1,8	1,10	1 : 1,6	0,13	0,04	
3	0,20	0,20	0,20	0,18	2,5	1,20	1 : 1,6	0,14	0,04	
4	0,20	0,10	0,11	0,09	2,5	1,10	1 : 1,6	0,12	0,03	
5	0,20	0,15	0,17	0,13	2,5	1,25	1 : 1,6	0,18	0,05	
6	0,20	0,20	0,21	0,19	2,5	1,50	1 : 1,6	0,20	0,05	
7	0,30	0,15	0,17	0,14	1,8	1,20	1 : 1,6	0,30	0,06	
8	0,30	0,20	0,21	0,20	1,8	1,40	1 : 1,6	0,33	0,06	Pada H = 0,185 m struktur bergerak dan runtuh
9	0,30	0,10	0,12	0,10	2,5	1,15	1 : 1,6	0,18	0,07	
10	0,30	0,15	0,15	0,13	2,5	1,50	1 : 1,6	0,24	0,07	
11	0,30	0,20	0,21	0,19	2,5	1,70	1 : 1,6	0,33	0,07	

Keterangan notasi: lihat Tabel 1

Tabel 3 Blok Beton Berkait dengan *Wave Reflection* Terkunci

Seri	d (m)	H (m)	H _d (m)	H _b (m)	T (s)	L (m)	Cot θ	R _u (m)	R _d (m)	Keterangan
1	0,20	0,10	0,11	0,10	1,8	0,80	1 : 1,5	0,13	0,05	
2	0,20	0,15	0,15	0,15	1,8	1,10	1 : 1,5	0,14	0,04	
3	0,20	0,20	0,20	0,18	1,8	1,20	1 : 1,5	0,15	0,05	
4	0,20	0,10	0,11	0,09	2,5	1,10	1 : 1,5	0,13	0,03	
5	0,20	0,15	0,17	0,13	2,5	1,25	1 : 1,5	0,19	0,05	Pada H = 0,184 m
6	0,20	0,20	0,21	0,19	2,5	1,50	1 : 1,5	0,22	0,05	struktur bergerak dan runtuh
7	0,30	0,15	0,17	0,14	1,8	1,20	1 : 1,5	0,30	0,06	
8	0,30	0,20	0,21	0,20	1,8	1,40	1 : 1,5	0,35	0,06	
9	0,30	0,10	0,12	0,10	2,5	1,15	1 : 1,5	0,18	0,06	
10	0,30	0,15	0,15	0,13	2,5	1,50	1 : 1,5	0,25	0,07	
11	0,30	0,20	0,21	0,19	2,5	1,70	1 : 1,5	0,34	0,07	

Keterangan notasi: lihat Tabel 1

Berdasarkan uji model 2D pada saluran kaca diperoleh hasil (Tabel 1, 2, dan 3) bahwa struktur armor 3B masih mampu menahan gelombang dengan tinggi 10 cm. Hal ini terlihat dari susunannya yang masih stabil dan rapi. Untuk armor 3B *full* rongga berkait, terlihat perubahan susunan pada pengujian dengan tinggi gelombang (H) 9,5 cm. Pada pengujian armor 3B berkait dengan *wave reflection*, struktur mulai bergerak dan mengalami keruntuhan untuk tinggi gelombang 18,5 cm, sedangkan struktur armor 3B dengan *wave reflection* terkunci mulai bergerak dan runtuh pada tinggi gelombang 18,4 cm. Berdasarkan hasil pengujian yang telah dilakukan terhadap 3 jenis armor 3B, diketahui bahwa armor 3B dengan *wave reflection* memiliki kestabilan paling tinggi.

Ikatan antar unit yang satu dengan yang lain berhubungan erat dengan stabilitas unit armor yang dinyatakan dalam nilai koefisien kestabilan (K_D). Nilai K_D untuk masing-masing modifikasi armor 3B dihitung dengan menggunakan persamaan Hudson atau persamaan (1) dan (2). Dengan menggunakan persamaan Hudson (1) dan (2), untuk prototip yang terpasang di Banyupoh dimana: $H = 0,19$ m, $W = 0,095$ kg, berat jenis beton (γ_b) = 2400 kg/m^3 , berat jenis air tawar (γ_w) = 1000 kg/m^3 , $\theta = 39,81^\circ$, $\cot \theta = 1,2$, maka diperoleh nilai K_D dari percobaan adalah $52,624 \approx 53$ dan S_r sebesar 2,4. Perhitungan K_D juga dilakukan pada modifikasi armor 3B. Untuk hasil perhitungan K_D dari 3 modifikasi armor 3B diperlihatkan pada Tabel 4

Dari Tabel 4 terlihat, jika dibandingkan dengan hasil uji model fisik 2D terdahulu (prototip telah dibangun di Pantai Banyupoh), 3 modifikasi struktur yang dikembangkan memiliki nilai K_D yang lebih kecil. Pada armor beton yang dipasang di Pantai Banyupoh, susunan dan ikatan blok armor beton mulai longgar akibat serangan gelombang

dengan tinggi 20 cm. Pada pengujian dengan gelombang datang 25 cm, susunan blok beton mengalami kerusakan total, ditandai dengan lepasnya ikatan antar blok beton dan tingkat erosi yang tinggi pada *toe protection*. Jika diteliti lebih lanjut, blok beton mulai bergerak akibat serangan gelombang dengan tinggi 19 cm. Dengan demikian tinggi gelombang maksimum yang masih bisa diterima oleh struktur blok beton adalah 0,19 m.

Dari tiga jenis struktur yang diuji, kemampuan armor 3B *full* rongga berkait paling rendah dalam menahan serangan gelombang. Selain itu, armor 3B *full* rongga berkait memiliki nilai K_D yang paling kecil dibandingkan dengan struktur lainnya. Hal ini terjadi karena rongga yang ada pada unit armor tersebut selain berfungsi mengurangi limpasan, tetapi juga meningkatkan daya angkat (*uplift*) pada struktur secara keseluruhan. Adanya rongga membuat struktur revetmen secara keseluruhan menjadi lebih *permeable* dan bidang kerja gelombang menjadi lebih luas. Semakin luas bidang kerja gelombang, maka semakin besar *uplift* yang terjadi (Kortenhaus, et al. 2004).

Gelombang pecah yang menghantam revetmen dapat menimbulkan tekanan lokal yang sangat tinggi dalam waktu yang singkat, yang biasa disebut tekanan kejut (*impact forces*). Besarnya tekanan ini tidak begitu berpengaruh terhadap stabilitas bangunan, karena waktu bekerjanya sangat singkat. Tekanan gelombang pecah, selain menimbulkan tekanan kejut juga menimbulkan tekanan hidrostatis yang cukup besar, karena sebagian besar energi gelombang diserahkan ke struktur revetmen (Zanuttigh and Meer 2008). Tekanan hidrostatis inilah yang membuat armor 3B dengan rongga menerima *uplift* yang lebih besar dibandingkan tanpa rongga.

Tabel 4 Hasil Perhitungan K_D masing-masing Modifikasi Armor 3B

Tipe armor	H (m)	W (kg)	θ ($^\circ$)	Cot θ	K_D
3B <i>full</i> rongga	0,095	0,110	35,45	1,4	5,6
3B dengan <i>wave reflection</i>	0,185	0,150	32,00	1,6	31,09
3B dengan <i>wave reflection</i> terkunci	0,184	0,180	32,00	1,6	24,29

Keterangan: berat jenis beton (γ_b) = 2400 kg/m³, berat jenis air tawar (γ_w) = 1000 kg/m³, $S_r = 2,4$

Armor 3B dengan *wave reflection* memiliki nilai kestabilan (K_D) paling tinggi dibandingkan dua model lainnya karena *uplift* yang terjadi lebih kecil dibandingkan model lainnya. Armor 3B dengan *wave reflection* dibuat tanpa rongga sehingga tidak memungkinkan adanya air masuk ke dalam struktur.

Adanya *wave reflection* juga akan memantulkan tekanan hidrostatis yang terjadi pada kaki struktur. Gelombang yang terpantul tersebut akan memiliki energi yang kecil sehingga tidak menggoyang satuan armor yang ada di atasnya. Kedua hal tersebut mengakibatkan blok beton berkait dengan *wave reflection* lebih stabil dibandingkan dengan dua struktur lainnya.

Rayapan Gelombang Armor 3B

Di samping kriteria kestabilan struktur, bangunan pantai harus didesain dengan pertimbangan keamanan terhadap rayapan (*run-up*), limpasan (*overtopping*), refleksi gelombang dan tinggi jagaan (*free board*) sesuai dengan fungsi bangunan. Tinggi rayapan dan laju limpasan gelombang masih diijinkan asal tidak merusak struktur bangunan secara signifikan. Dalam penyelidikan di laboratorium proses rayapan gelombang dipengaruhi oleh nilai periode gelombang (T) dan kemiringan talud (θ). Apabila gelombang bergerak menuju bangunan yang miring seperti revetmen atau pemecah gelombang, maka gelombang akan dipantulkan atau pecah didaerah tersebut. Sebagian dari momentum gelombang akan berubah menjadi gerakan air yang meluncur keatas lereng yang disebut *wave run-up* dan yang masuk kebagian bawah permukaan air (SWL) disebut *wave run-down* (US Army Corps of Engineers 2006, Zanuttigh and Meer 2008).

Run-up (R_u) dan *run down* (R_d) serta tinggi gelombang (H) merupakan parameter yang diamati dari model fisik, seperti terlihat pada Tabel 1 sampai 3 atau dihitung dengan persamaan (3). Sedangkan angka Irribaren (I_r) dihitung menggunakan persamaan (4). Dari nilai R_u/H , R_d/H dan angka Irribaren dibuat grafik hubungan R_u/H , R_d/H dan I_r yang menyatakan keamanan terhadap rayapan gelombang. Grafik hubungan R_u/H , R_d/H dan I_r untuk modifikasi armor 3B seperti terlihat pada Gambar 5.

Untuk mengetahui struktur yang mampu menerima rayapan gelombang (*run-up* dan *run down*) paling tinggi, maka nilai R_u/H dan R_d/H ketiga struktur pada Gambar 5 dibandingkan pada nilai I_r yang sama. Dari ketiga grafik pada Gambar 5 di atas, untuk nilai I_r yang sama maka blok beton kubus *full* rongga berkait pada Gambar 5 (a) memiliki nilai R_u/H maupun nilai R_d/H yang paling kecil, dan nilai terbesar dimiliki oleh blok beton berkait tipe *wave reflection* seperti terlihat pada Gambar 5 (b). Hal ini sesuai dengan hasil pengamatan dan perhitungan K_D yang telah dilakukan sebelumnya, dimana blok beton berkait tipe *wave reflection* memiliki kinerja terbaik dalam meredam energi gelombang dibandingkan 2 struktur lainnya. Pada revetmen yang berinding miring, rayapan gelombang yang terjadi akan cukup tinggi (Zanuttigh and Meer 2008, Bruce, et al. 2009). Untuk menghindari revetmen yang terlalu tinggi maka dibuat konstruksi reflektor gelombang, sehingga dengan adanya reflektor ini gelombang akan terpantul kembali ke laut sehingga rayapan gelombang bisa dikurangi, R_u/H terlihat pada Gambar 5 (b) dan (c).

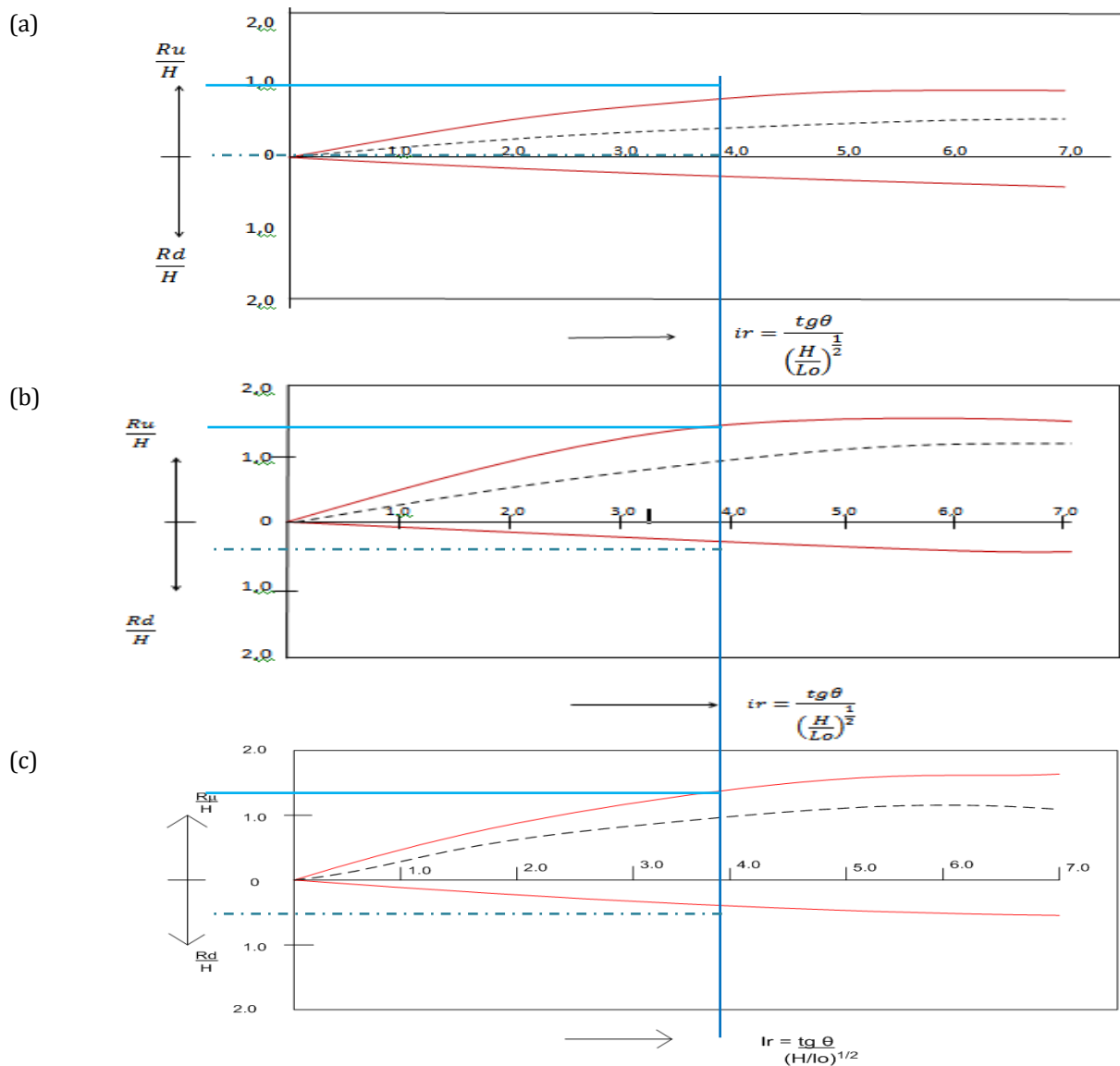
Serangan gelombang pada revetmen akan menimbulkan aliran air yang kompleks di atas dan di dalam struktur (lapis penutup dan filter). Rayapan gelombang naik (*run-up*) akan menghasilkan gaya dengan arah yang berlawanan dengan gaya gravitasi. Oleh karena itu *run-up* akan kurang berbahaya jika dibandingkan dengan rayapan turun (*run-down*). *Run-down* akan mengakibatkan dua mekanisme: aliran air turun akan menambah gaya seret pada lapis penutup dan akan menurunkan garis freatik pada saat bersamaan terjadi penurunan gradien aliran pada lapisan filter. Aliran bebas dalam lapis filter dimana gradiennya sama dengan sudut kemiringan lapisan filter yang berakibat kemungkinan *sliding* pada struktur. Mekanisme kedua, pada saat *run-down* terjadi gelombang datang yang mengakibatkan tumbukan atau benturan gelombang. Sesaat sebelum tumbukan "tembok" air akan memberikan tekanan yang tinggi di bawah titik maksimum *run-down*. Di atas titik maksimum *run-down* permukaan revetmen hampir kering yang mengakibatkan tekanan pada struktur rendah. Tingginya tekanan pada bagian depan akan mengakibatkan aliran naik dalam lapis filter. Aliran

ini akan bertemu dengan aliran yang mengarah ke bawah pada bagian *run-down*. Kejadian ini akan mengakibatkan aliran keluar dan meningkatkan daya angkat (*uplift*) pada titik maksimum *run-down* (Pilarczyk 2010).

Penambahan lengkung *wave reflection* untuk mengurangi besarnya rayapan gelombang hanya bisa dilakukan sampai batas tertentu. Beberapa penelitian menunjukkan reflektor efektif untuk mengurangi *overtopping* hanya pada kondisi jarak puncak dan *freeboard* relatif $R_c/H_s > 1,5$. Beban gelombang pada struktur akan bertambah secara signifikan apabila lengkung reflektor ditambahkan pada *freeboard* rendah $R_c/H_s < 1,2$, dimana R_c adalah jarak antara puncak reflektor dengan muka air saat

tenang dan H_s adalah tinggi gelombang signifikan. Pengurangan besar limpasan lebih dipengaruhi oleh periode gelombang dibandingkan dengan panjang lintasan reflektor dalam horizontal (Kortenhaus, et al. 2004).

Besar sudut reflektor gelombang pada bangunan pantai telah diuji oleh Univeritas Gajah Mada. Berdasarkan uji unjuk kerja reflektor didapatkan bahwa untuk mendapatkan lengkung reflektor yang efektif perlu menggunakan pedoman perancangan lengkung berupa lingkaran dengan pusat berada 1,5 H dari muka air laut rencana; elevasi mercu tembok laut berada 2,0 H dari muka air laut rencana; awal lengkung dimulai dari muka air laut rencana (Puslitbang SDA, 2011).



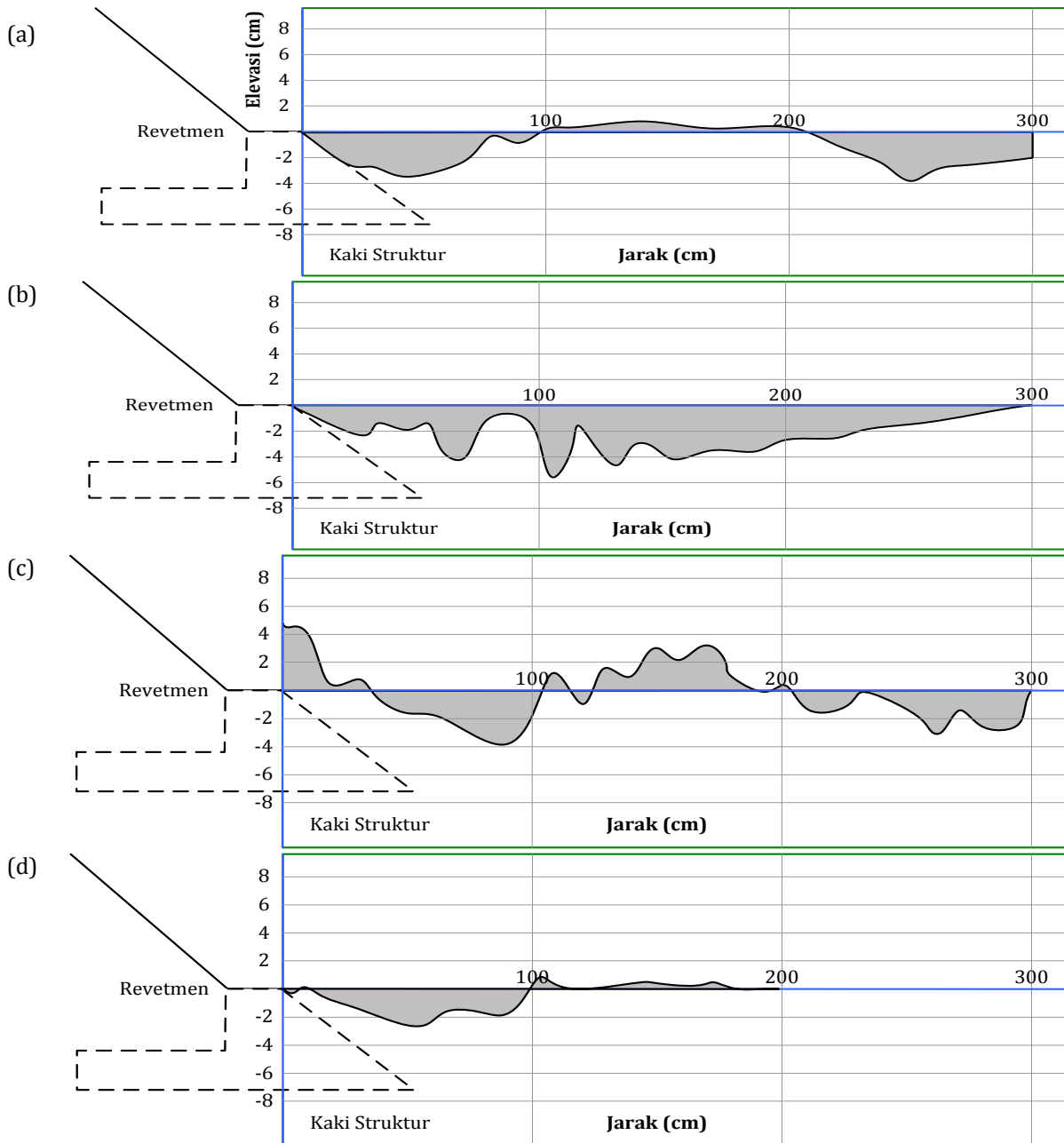
Gambar 5 Grafik Hubungan Koefisien R_u/H dan Bilangan Iribaren; (a) Blok Beton Kubus Full Rongga Berkait, (b) Blok Beton Berkait Tipe Wave Reflection, (c) Blok Beton Berkait Tipe Wave Reflection Terkunci

Gerusan pada Kaki Struktur

Biasanya material dasar laut adalah berupa pasir atau lumpur yang sangat mudah tererosi (Goda 2004). Kegagalan revetmen dapat disebabkan karena proses erosi ini. Profil gerusan lokal yang terjadi berbeda-beda untuk setiap kedalaman muka air (d) ketinggian gelombang (H). Dari 2 variasi kedalaman air pada saluran kaca, tinggi gelombang, dan periode gelombang (T) yang mengenai struktur

maka diperoleh profil gerusan lokal seperti Gambar 6.

Hasil pengamatan uji model fisik 2D pada Gambar 6, menunjukkan gelombang pecah pada sumbu $x = 300$ cm. Pada kedalaman air 20 cm dan periode gelombang 1,8 detik: tinggi gelombang 20 cm (Gambar 6 (b)) mengakibatkan gerusan lokal yang lebih besar dibandingkan dengan tinggi gelombang 15 cm (Gambar 6 (a)). Untuk kedalaman



Gambar 6 Gerusan Lokal pada Kaki Struktur: (a) $d = 20$ cm, $H = 15$ cm, $T = 1,8$ detik; (b) $d = 20$ cm, $T = 1,8$ detik; (c) $d = 30$ cm, $H = 15$ cm, $T = 2,5$ detik; (d) 30 cm, $H = 20$ cm, $T = 2,5$ detik.

air 30 cm dan periode gelombang 2,5 detik: gelombang dengan tinggi 15 cm (Gambar 6 (c)) memberikan efek gerusan yang lebih besar jika dibandingkan dengan gelombang dengan ketinggian 20 cm (Gambar 6 (d)). Pada Gambar 6 (a) dan Gambar 6 (c) untuk tinggi gelombang 15 cm: erosi terjadi pada sumbu $x = 200$ cm sampai $x = 300$ cm dan deposit sedimen pada sumbu $x = 100$ cm sampai $x = 200$ cm. Gerusan terjadi kembali terjadi pada sumbu $x = 0$ sampai $x = 100$ cm. Gerusan pertama menunjukkan gelombang pecah pada $x = 200$ cm sampai $x = 300$ cm, kemudian mengendapkan sedimen pada pada sumbu $x = 100$ cm sampai $x = 200$ cm. Sedangkan pada kondisi kedalaman air 20 cm (Gambar 6 (b)), gerusan lokal terjadi dari gelombang pecah ($x = 300$ cm) sampai dengan kaki struktur ($x = 0$). Untuk Gambar 6 (d) tidak dilakukan analisa karena volume sedimen pada saluran kaca lebih banyak terkumpul pada satu sisi.

Gerusan lokal pada struktur porus merupakan fungsi dari kedalaman kaki, kemiringan dasar laut, karakteristik dan jumlah unit armor (Zanuttigh and Meer, 2008). Dari Gambar 6 terlihat semakin tinggi gelombang, semakin besar gerusan lokal yang terjadi. Gerusan lokal mulai terjadi pada kondisi gelombang pecah. Gerusan terbesar terjadi di depan kaki struktur. Gerusan pada kaki struktur terjadi karena pada bagian ini gelombang akan mengalami pantulan akibat adanya struktur (Stanczak and Oumeraci, 2011). Pantulan gelombang akan menambah kecepatan gelombang sehingga mengangkat dan mengangkut material disekitarnya.

Gerusan yang terjadi di depan konstruksi revetmen dapat dibedakan menjadi dua, yaitu: gerusan yang disebabkan oleh arus, dan gerusan yang disebabkan oleh gelombang. Pada kenyataannya, kedua gerusan ini terjadi bersamaan (Goda 2004). Namun pada percobaan ini gerusan akibat arus tidak diperhitungkan karena keterbatasan alat ukur.

Apabila gerusan yang terjadi cukup dalam maka dapat membahayakan konstruksi dan keadaan ini perlu dicegah dengan membuat konstruksi pelindung kaki (*toe protection*). Konstruksi pelindung kaki ini pada bangunan monolit dapat pula berfungsi sebagai fondasi atau *berm*. Pada penerapan di lapangan, jika erosi hanya terjadi selama adanya serangan gelombang besar, maka gerusan bersifat sementara dan akan hilang selama kondisi pantai tenang. Untuk mencegah erosi jangka panjang maka diperlukan model *toe protection* yang fleksibel yang mampu mengikuti penurunan dasar laut selama terjadinya gerusan tanpa menghilangkan stabilitas struktur. Armor 3B ini dirancang semikiam rupa sehingga mudah dipasang

dilapangan, menjadi konstruksi yang masif *semi-rigid* karena adanya ikatan satu sama lain. Pemasangan dengan cara tersusun rapi akan diperoleh harga K_D yang tinggi karena adanya ikatan antar blok beton. Jika terhempas gelombang, sebagian air akan masuk ke dalam rongga atau lubang kemudian diteruskan ke lapisan filter di belakang blok beton. Air tersebut secara perlahan akan keluar pada saat gelombang surut melalui rongga sehingga tekanan tanah di belakang struktur akan berkurang. Rongga juga berfungsi untuk mengurangi limpasan gelombang. Struktur ini tidak merusak estetika pantai, karena dibuat bertangga dan tersusun rapi. Susunan bertangga berguna memudahkan masyarakat untuk turun ke pantai. Dengan tinggi rayapan yang rendah maka elevasi mercu revetmen akan berkurang, sehingga volume bahan akan berkurang sekaligus mengurangi biaya struktur. Lapisan filter terdiri dari susunan kerakal dan batu kosong berfungsi menahan dan menampung air.

KESIMPULAN

Dari hasil penelitian ini dapat ditarik beberapa kesimpulan, diantaranya:

Dari 3 jenis modifikasi armor 3B yang dikembangkan pada penelitian ini, armor 3B kubus *full* rongga berkait memiliki nilai kestabilan K_D paling kecil $5,6 \approx 6$ dan hanya mampu menahan tinggi gelombang (H) 0,095 m skala model. Untuk armor 3B dengan *wave reflection* memiliki nilai K_D terbesar yaitu 31,09, dan mampu menahan gelombang sampai ketinggian maksimum (H) 0,185 m skala model. Sedangkan armor 3B dengan *wave reflection* terkunci memiliki nilai K_D 24,29 dan mampu menahan gelombang maksimum (H) 0,184 m dalam skala model.

Jika dibandingkan dengan hasil uji model fisik 2D terdahulu (prototip telah dibangun di Pantai Banyupoh), 3 modifikasi struktur armor 3B yang dikembangkan memiliki nilai K_D yang lebih kecil, dimana armor beton yang dipasang di Pantai Banyupoh memiliki K_D $52,624 \approx 53$ dan mampu menahan gelombang sampai ketinggian maksimum 0,19 m skala model.

Armor 3B kubus *full* rongga berkait memiliki nilai R_u/H maupun nilai R_d/H yang paling kecil, dan nilai terbesar dimiliki armor 3B dengan *wave reflection*, dengan demikian armor 3B dengan *wave reflection* memiliki kinerja terbaik dalam meredam energi gelombang dibandingkan 2 modifikasi armor 3B lainnya.

Gerusan lokal yang terjadi pada ketiga struktur armor 3B dipengaruhi oleh tinggi gelombang, lokasi gelombang pecah dan kedalaman air. Pada kedalaman air yang sama, gelombang

dengan tinggi 20 cm mengakibatkan gerusan lokal yang lebih besar dibandingkan dengan tinggi gelombang 15 cm. Efek gerusan lokal terbesar terlihat pada lokasi gelombang pecah dan kaki struktur.

DAFTAR PUSTAKA

- Bakker, Pieter, et al. "Development of Concrete Breakwater Armor Units." *1st Coastal, Estuary and Offshore Engineering Specialty Conference*. Moncton, Nouveau-Brunswick, Canada: Canadian Society for Civil Engineering, 2003. CSC-395-12.
- Breteler, M. Klein, K. W. Pilarczyk, dan T. Stoutjesdijk. "Design of Alternatif Revetmen." *Coastal Engineering*, 1998: 1587-1600.
- Bruce, T., J.W. van der Meer, L. Franco, dan J.M. Pearson. "Overtopping performance of different armour units for rubble mound breakwaters." *Coastal Engineering (56)*, 2009: 166 - 179.
- CIRIA, CUR, dan CETMEF. *The Rock Manual. The use of rock in hydraulic engineering (2nd edition)*. Vol. C683. London: CIRIA, 2007.
- Goda, Y. "How Should We Collect Information on Environmental Condition for Shore Protection Projects." *Workshop on Efficient Technology of Port Engineering Between Indonesia and Japan*. Jakarta: Pelindo, Indonesia, 2004. 5-6.
- Hughes, Steven A. *Physical models and laboratory techniques in coastal engineering*. Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 1993.
- Kortenhaus, A., J. Pearson, T. Bruce, N.W.H. Allsop, dan J.W. van der Meer. "Influence of Parapets and Recurves on Wave Overtopping and Wave Loading of Complex Vertical Walls." *Coastal Structure 03*. Portland: ASCE, 2004. 369-381.
- Mangor, Karsten. *Shoreline Management Guidelines*. Hørsholm; Denmark : DHI Water & Environment, 2004.
- Matsuda, Setsuo, Akira Matsumoto, Wakiro Nishigori, Minoru Hanzawa, dan Michio Matsuoka. "Crown Height Effects on Stability of Flat Type Concrete Armor Blocks." *The Thirteenth (2003) International Offshore and Polar Engineering Conference*. Honolulu, Hawaii, USA: The International Society of Offshore and Polar Engineers, 2003. 631-638.
- Pearson, J., T. Bruce, W. Allsop, A. Kortenhaus, dan J.W. van der Meer. "Effectiveness of Recurve Wave Walls in Reducing Wave Overtopping on Seawalls and Breakwaters." *International Conference on Coastal Engineering*. Lisbon: ASCE, 2004. 4404 - 4416.
- Pilarczyk, Kristyan. "Design of Alternative Revetment." Dalam *Handbook Of Coastal And Ocean Engineering*, oleh Young C. Kim, 479-520. Singapore: World Scientific Publishing, 2010.
- Pullen, T., N.W.H. Allsop, T. Kortenhaus, A. Bruce, A. Schüttrumpf, dan J.W. van der Meer. *EurOtop - Wave Overtopping of Sea Defences and Related Structures: Assessment Manual*. Oxford, UK: Environmental Agency, UK; German Coastal Engineering Research Council, Germany; Rijkswaterstaat, Netherlands, 2007.
- Puslitbang SDA. *Revetmen (Pelindung Pantai) Tipe Blok Beton Bergigi*. Bandung: Puslitbang SDA, Balitbang Departemen PU, 2007.
- Puslitbang SDA. *Teknologi Penanggulangan Erosi Pantai dengan Revetmen Blok Beton Berkait (3B)*. Jakarta: Kementerian PU, 2011.
- Stanczak, Grzegorz, dan Hocine Oumeraci. "Modeling sea dike breaching induced by breaking wave impact-laboratory experiments and computational model." *Coastal Engineering (59)*, 2011: 28 - 37.
- U.S. Army Corps of Engineering. *Design of Coastal Revetments, Seawall and Bulkheads*. Washington, USA: U.S. Army Corps of Engineering, 1995.
- US Army Corps of Engineers. *Coastal Engineering Manual*. USA: US Army Corps of Engineers, 2006.
- Zanuttigh, Barbara, dan Jentsje W. van der Meer. "Wave reflection from coastal structures in design conditions." *Coastal Engineering*, 2008: 771-779.