

UJI MODEL FISIK STABILITAS UNIT LAPIS LINDUNG PEMECAH GELOMBANG PELABUHAN SANUR

PHYSICAL MODEL TEST ON THE STABILITY OF BREAKWATER ARMOUR UNITS IN SANUR PORT

¹Oki Setyandito, ²Haryo Dwito Armono, ³Nur Yuwono.

¹Jurusan Teknik Sipil, Universitas Bina Nusantara, ²Departemen Teknik Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, ³Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Universitas Gadjah Mada

²armono@oe.its.ac.id

Abstrak

Analisis stabilitas suatu struktur pemecah gelombang sebaiknya tidak hanya berdasarkan rumus-rumus empiris atau model matematik semata. Meskipun perkembangan teknologi informasi dan komputasi telah sedemikian berkembang, formula empiris dan metode numerik dalam pemodelan matematik belum mampu menunjukkan secara nyata proses fisik dan mekanisme keruntuhan unit lapis lindung pemecah gelombang. Proses gelombang pecah dan interaksinya dengan unit lapis lindung juga tidak bisa terlihat lengkap dalam suatu model matematik. Untuk itu, uji model fisik diperlukan untuk memastikan bahwa unit lapis lindung struktur pemecah gelombang yang akan dibangun memiliki stabilitas dan memberikan kinerja yang cukup baik. Makalah ini menjelaskan proses persiapan dan pengujian yang dilakukan dalam mengkaji stabilitas unit lapis lindung pemecah gelombang pada pelabuhan Sanur. Uji model fisik dilaksanakan di saluran gelombang yang tersedia di Balai Teknologi Infrastruktur Pelabuhan dan Dinamika Pantai (BTIPDP), Yogyakarta. Berdasarkan teori kesebangunan Froude, telah dilakukan uji model pemecah gelombang 2 dimensi untuk mengkaji stabilitas unit lapis lindung utama. Model pemecah gelombang diuji dengan gelombang acak yang dibangkitkan mesin pembangkit gelombang buatan HR Wallingford (Inggris) yang baru saja dipasang di saluran uji 2 dimensi BTIPDP tahun 2019 lalu. Hasil uji model fisik telah digunakan untuk merancang pemecah gelombang di pelabuhan Sanur, Denpasar, Bali agar dapat diketahui kerusakan struktur pada berbagai tinggi gelombang. Dari hasil pengujian ini dapat ditetapkan ukuran berat lapis lindung / armour unit yg masih diijinkan rusak 0,5 % pada tinggi gelombang rencana dengan kala ulang 100 tahun.

Kata kunci: uji model fisik, Tetrapod, BPPT-lock, breakwater, gelombang acak

Abstract

Analysis of the stability of a breakwater structure should not only depend on empirical formulas or mathematical models alone. Although computing and information technology have been so developed, the empirical formulas and numerical methods in mathematical modeling not able to clearly show the physical processes and failure mechanisms of the breakwater armor unit. The process of breaking waves and their interactions with the breakwater armor unit cannot be seen in a mathematical model. For this reason, a physical model test is needed to ensure that the breakwater armor unit has stability and provides a good performance. This paper describes the testing carried out in assessing the stability of the breakwater armor unit at the port of Sanur based on Froude's similarity. The physical model test was performed in the wave channel at the Port Infrastructure Technology Center and Coastal Dynamics (BTIPDP), Yogyakarta. The model was tested with random waves generated by a wave generator made by HR Wallingford (UK) which was just installed in the BTIPDP in 2019. Based on the tests, the weight of the armor unit was determined for 0.5% damage at the design wave height with a return period of 100 years.

Keywords: physical model test, Tetrapod, BPPT-lock, breakwater, random waves

PENDAHULUAN

Pelabuhan sejak lama merupakan fasilitas utama transportasi laut yang menghubungkan kegiatan perniagaan antar wilayah. Di tempat-tempat wisata seperti Sanur, Denpasar, Bali, selain untuk keperluan niaga, pelabuhan juga berfungsi dan diperlukan untuk memberikan layanan transportasi penghubung bagi para turis dan pelancong untuk menikmati keindahan alam dan budaya di pulau-pulau sekitar pulau Bali, seperti pulau Nusa Penida, pulau Nusa Ceningan dan pulau Nusa Lembongan, serta pulau Gili Terawangan, Lombok, Nusa Tenggara Barat. Pemerintah, melalui Kementerian Perhubungan sejak 2019 (Kementerian Perhubungan RI, 2019) telah merencanakan proyek Pelabuhan Sanur, dan pada awal tahun 2020 telah dimulai pelaksanaan kegiatannya. 0 berikut menunjukkan lokasi pelabuhan Sanur, Denpasar.

Salah satu fasilitas laut yang diperlukan dalam sebuah pelabuhan adalah pemecah gelombang atau *breakwater*. Struktur ini berfungsi menahan gelombang sehingga dapat tercipta kolam yang tenang untuk berlabuh kapal dalam melakukan kegiatan bongkar muat barang dan penumpang. Di lokasi Pelabuhan Sanur, akan dibangun dua buah *breakwater* untuk menahan gelombang dari arah Timur Laut dan Tenggara, serta melindungi kolam labuh dari endapan sedimen yang keluar dari muara sungai di sekitar kolam

pelabuhan. Dalam kegiatan pembangunan (*design and built*) fasilitas Pelabuhan Laut Sanur Provinsi Bali, perlu dilakukan pengujian model fisik stabilitas *breakwater* pelindung kolam pelabuhan. Tujuan pengujian ini untuk mendapatkan gambaran kinerja stabilitas batu pelindung yang direncanakan akan dipasang di pelabuhan Sanur tersebut. Makalah ini menjelaskan proses persiapan dan pengujian yang dilakukan dalam mengkaji stabilitas unit lapis lindung pemecah gelombang pada pelabuhan Sanur.

Permasalahan teknik hidraulik seperti stabilitas *breakwater* dapat diselesaikan dengan model fisik, model matematis (numerik) dan model campuran (Yuwono, Triatmadja, Nurfaida, & Bhakty, 2021). Namun, proses analisis stabilitas suatu struktur pemecah gelombang (*breakwater*) sebaiknya tidak hanya berdasarkan rumus-rumus empiris seperti formula Hudson (Hudson, 1958), Van der Meer (Meer, 1988) atau model matematik (Latham, Xiang, & Higuera, 2015). Meskipun teknologi informasi dan komputasi telah sedemikian berkembang dengan cukup menggembirakan, formula empiris dan metode numerik dalam pemodelan mate-matik belum mampu menunjukkan secara nyata proses fisik dan mekanisme keruntuhan unit lapis lindung pemecah gelombang. Proses gelombang pecah dan interaksinya dengan unit lapis lindung juga tidak bisa terlihat lengkap dalam suatu model matematik.



Gambar 1. Lokasi dan *breakwater layout* pelabuhan Sanur

Sumber: BTIPDP, 2021

Dalam buku Perencanaan Model Skala Hidraulis, (Yuwono, Triatmadja, Nurfaida, & Bhakty, 2021) ditunjukkan bahwa dalam penyelesaian masalah perencanaan dengan melibatkan uji model fisik, terdapat tiga kegiatan yang saling terkait, yaitu pemodelan, penyelesaian dan interpretasi hasil pemodelan. Tahap pemodelan adalah proses membuat model, yaitu proses mereplika masalah yang ada di prototipe dengan skala yang lebih kecil dan dilakukan dengan cara-cara yang benar. Setelah dilakukan pemodelan, kemudian dicari penyelesaian masalah yang terjadi pada model tersebut. Penyelesaian masalah ini hanya khusus berlaku di model tersebut, namun hasil penyelesaiannya dapat diinterpretasikan untuk di terapkan ke prototipe. Proses interpretasi ini merupakan tahap terakhir. Proses interpretasi dilakukan dengan cara yang sama pada saat permasalahan prototipe dibawa ke bentuk model, yaitu dengan menggunakan hukum skala (*scale law*) dan kriteria kesebangunan (*scale condition*) (Yuwono, Triatmadja, Nurfaida, & Bhakty, 2021). Untuk memastikan bahwa gaya-gaya yang bekerja pada model dan prototipe memiliki pola yang sama, maka diperlukan kesebangunan dinamik. Kesebangunan dinamik bisa dicapai apabila perbandingan gaya-gaya inersia terhadap gaya-gaya lain yang bekerja pada model dan prototipe (misalnya gaya gesekan, tegangan permukaan, tekanan, gaya gravitasi, dan sebagainya) memiliki skala yang sama. Dalam kegiatan ini Uji Model Fisik Pelabuhan Sanur ini, kesamaan dinamik antara prototipe dan model di laboratorium dicapai dengan menskalakan kebutuhan berat unit lapis lindung (*armour*) prototipe *breakwater* ke berat *armour unit* model yang tersedia di laboratorium. Dalam kegiatan ini akan digunakan skala model berdasarkan bilangan Froude karena gaya gravitasi dan inersia lebih dominan dibanding gaya-gaya lain dalam pengujian dan pemodelan *breakwater* ini (Hughes, 1993). Pada model *breakwater* ini,

batu-batu pelindung juga terpengaruh oleh gaya drag (seret) pada saat terlampaui gelombang. Untuk mengurangi efek skala dan untuk menghilangkan efek tegangan permukaan pada model yang dibangun (Hudson, 1975), maka pengujian dilakukan pada bilangan Reynold yang cukup besar, yaitu di atas 3×10^4 . Bilangan Reynold tersebut dihitung dengan formula berikut: (Hudson, 1975)

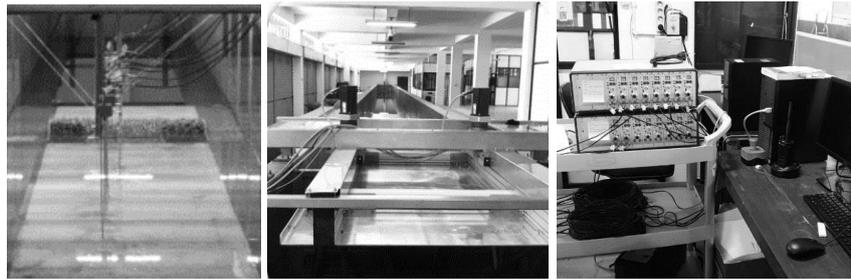
$$Re = \frac{l_a \sqrt{gH}}{v} \quad (1)$$

l_a adalah dimensi batu [m], g adalah percepatan gravitasi bumi [m/det²], H adalah tinggi gelombang yang dibangkitkan [m] dan ν adalah viskositas kinematik air (pada suhu 28°C nilainya $8.3e-7$ m²/det). Berdasarkan formula di atas, dimensi batu yang digunakan pada suatu model fisik, minimal berdiameter 4 cm dengan tinggi gelombang yang dibangkitkan juga minimal 4 cm.

METODOLOGI PENELITIAN

Pengujian model secara 2 dimensi akan dilakukan di saluran uji gelombang (*wave flume*) yang berada di Balai Teknologi Infrastruktur Pelabuhan dan Dinamika Pantai (BTIPDP), yang bernaung di bawah Kedeputian Teknologi Industri Rancang Bangun dan Rekayasa (TIRBR), Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi (BPPT), Yogyakarta. Fasilitas pengujian untuk model 2 dimensi yang tersedia di saluran gelombang adalah sebagai berikut:

- Dimensi : lebar 1,9 m, panjang 40 m, tinggi 1,6 m
- Kedalaman Operasional Maksimal : 1.0 m
- Periode Gelombang : 0,4 – 5 detik (frekuensi 0,2 Hz to 2,5 Hz)
- Tinggi Gelombang Signifikan : 0,25m (acak / irreguler)
- Tinggi Gelombang Teratur : 0,52m (reguler)



Gambar 2. Saluran gelombang, pembangkit gelombang dan ruang kontrol
Sumber: BTIPDP, 2021

Tabel 1. Ketersediaan Model Beton Modifikasi di BTIPDP

Jenis Batu	Berat rata-rata [gram]	Berat Jenis Rata-rata [gram/cm ³]	Jumlah [unit]
Tetrapod	170,5	2,23	2183
	68,75	2,06	3250
BPPT-lock	66,69	1,98	4853

Sumber: BTIPDP, 2021

0 berikut menunjukkan kondisi saluran gelombang (*wave flume*) di beserta ruang kontrol untuk akuisisi data gelombang dan mesin pembangkit gelombang. Dalam uji Model Fisik stabilitas *breakwater* Pelabuhan Sanur ini, karena keterbatasan waktu untuk pencetakan model batu pelindung, maka skala pemodelan akan ditentukan oleh ketersediaan model batu pelindung yang ada di BTIPDP sebagaimana diberikan dalam 0 berikut ini.

Terdapat 2 buah *breakwater* yang direncanakan akan di bangun di Pelabuhan Sanur sebagaimana ditunjukkan posisinya dalam 0. *Breakwater* Selatan yang berfungsi menahan gelombang masuk ke kolam pelabuhan dan *breakwater* Utara yang lebih kecil yang berfungsi untuk menahan sedimen dan sampah dari muara Tukad Ayung (di bagian pangkal *breakwater* Utara) masuk ke kolam pelabuhan. Pengujian stabilitas batu pelindung pada model *breakwater* akan dilakukan untuk bagian kepala (x-1), bagian

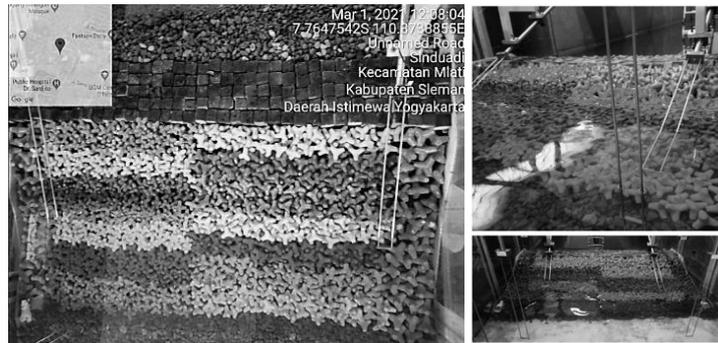
lengan atas (x-5) dan bagian lengan bawah (x-7). Ketiga bagian tersebut dipandang cukup mewakili struktur *breakwater*.

Stabilitas batu pada *breakwater* Utara tidak dikaji dengan uji model fisik karena bagian ini tidak mengalami serangan gelombang secara langsung. Dalam pengujian 2 dimensi ini, profil model *breakwater* akan ditempatkan di tengah-tengah saluran gelombang. Berdasarkan *HYDRALAB: Guidelines for Physical Model Testing of Breakwaters* (Wolters, van Gent, Allsop, Hamm, & Mühlestein, 2009), jarak minimal slope apron batimetri ke *wave generator* adalah sebesar 3 – 5 m, sedangkan jarak dari kaki apron batimetri ke model *breakwater* antara 3-5 kali panjang gelombang. Kemiringan kaki apron batimetri terhadap dasar kolam disarankan maksimal 1:10 sebagaimana ditunjukkan dalam 0 di bawah ini.

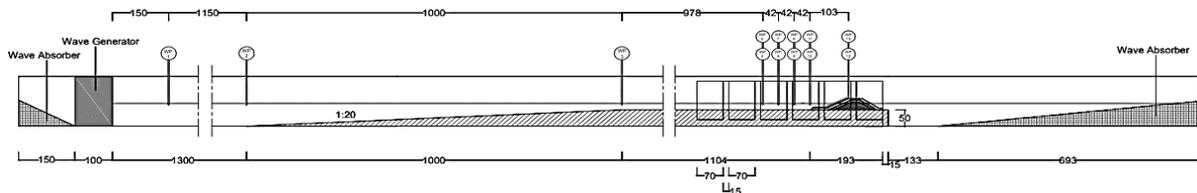


Gambar 3. Panduan Perletakan dalam Uji Model *Breakwater*

Sumber : Wolters, van Gent, Allsop, Hamm, & Mühlestein, 2009



Gambar 4. Peletakan Sensor dan Armour Unit Tetrapod dan BPPT-lock
 Sumber: BTIPDP, 2021



Gambar 5. Tampak Samping Posisi Sensor dan Model Breakwater yang Diuji
 Sumber: BTIPDP, 2021

Tipe batu pelindung yang digunakan dalam pengujian adalah Tetrapod dan BPPT-lock. Kedua jenis *armour unit* akan yang di uji secara bersamaan dan dibandingkan kinerjanya secara langsung serta diletakkan secara berdampingan sebagaimana ditunjukkan dalam 0.

Untuk lapis sekunder dan inti digunakan batu pecah. Sensor pengukur perubahan elevasi muka air dipasang miring pada masing-masing area batu pelindung yang diuji mengikuti slope/kemiringan struktur. Sensor ini akan merekam fluktuasi muka air di bagian depan *breakwater* dan bisa dianalisis lebih lanjut untuk memperkirakan run up yang terjadi. 0 menunjukkan posisi perletakan sensor dan model *breakwater* di dalam saluran uji gelombang. Pengujian dilakukan pada kondisi paling ekstrem, yaitu pada kondisi air

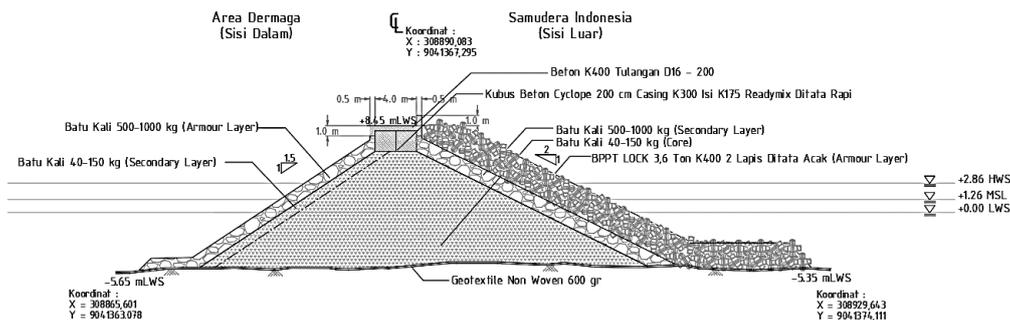
tertinggi (*high water spring – HWS*) pada saat terjadi badai dengan kala ulang 100 tahun.

Berdasarkan skala Froude, lama pengujian 1 jam di laboratorium dianggap sama dengan kondisi badai pada kondisi prototipe. Sehingga untuk setiap tinggi gelombang rencana, mesin pembangkit gelombang akan digerakkan selama 1 jam non stop untuk melihat stabilitas batu pelindung yang terpasang. Pengamatan akan dilakukan secara kontinu dengan pengambilan foto dan video serta pencatatan kondisi batu setiap 15 menit hingga akhir waktu pengujian. Untuk pendinginan dan perawatan / pengecekan mesin pembangkit gelombang, setelah pengujian 1 jam, mesin akan dihentikan selama 5-10 menit sebelum dimulai pengujian dengan target gelombang berikutnya.

Tabel 2. Skenario Model Gelombang Pengujian Potongan 5

Skenario Uji	Kedalaman air pada saluran [m]	Tinggi Target Gelombang [cm]	Tp input [detik]	Hs input [cm]	Durasi Pengujian tiap gelombang [menit]
CS 2 (x-5)	17,83	6,52	1,50	8	60
		8,70	1,50	5	
		10,87	1,50	19	
		13,04	1,50	22	

Sumber: BTIPDP, 2021



Gambar 6. Potongan Breakwater Selatan untuk Skenario Uji CS 2

Sumber: BTIPDP, 2021

0 di atas menampilkan skenario tinggi dan periode gelombang yang akan dibangkitkan selama pengujian setelah dilakukan proses kalibrasi dan setting peralatan (*Basic Research Test*) di fasilitas saluran uji BTIPDP. Pengujian dimulai dengan membangkitkan gelombang kecil sebesar 75% H_d , kemudian meningkat ke 100% H_d , 125% H_d , dan 150% H_d , dimana H_d adalah gelombang dengan kala ulang 100 tahun (H_{100th}).

Untuk mendapatkan data yang cukup untuk pengolahan dan analisis, pengujian ini dilakukan 3 kali pengulangan, dimana masing-masing pengulangan terdiri dari satu rangkaian pengujian dari 0,75% H_d hingga 150% H_d . Pengujian stabilitas dilakukan untuk 3 skenario potongan melintang dengan posisi yang ditunjukkan pada 0. Skenario uji CS 1 akan menguji potongan *breakwater* selatan pada bagian lengan bawah (potongan 7 atau x-7), skenario CS 2 akan menguji potongan *breakwater* yang mewakili bagian lengan atas (potongan 5 atau x-5), sedangkan CS 3 akan

menguji bagian kepala *breakwater* dan dilakukan secara quasi 3D. Dalam makalah ini hanya hasil-hasil uji stabilitas pada CS 2 (potongan 5 / x-5) pada kondisi *non overtopping* yang akan ditampilkan dalam pembahasan dan diskusi. Hasil-hasil pengujian selengkapny akan disampaikan pada kesempatan lain. 0 berikut menunjukkan detail prototip potongan 5 yang diuji di saluran gelombang BTIPDP.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Potongan 5 merupakan bagian *breakwater* selatan yang terletak pada bagian lengan atau siku. Perencanaan lapis pelindung pada bagian ini menggunakan koefisien kerusakan (KD) pada bagian kepala, karena bagian ini rentan terhadap serangan gelombang dari arah Tenggara. 0 dan 0 berikut menunjukkan hasil serangkaian pengujian dengan 3 kali pengulangan untuk jenis armour unit Tetrapod dan BPPT-lock.

Tabel 3. Koefisien Kerusakan Armour Unit Tetrapod

NO	TINGGI GELOMBANG -Model [cm]	TINGGI GELOMBANG -Prototipe, [m]	KERUSAKAN, (%)	BERAT Model [gram]	BERAT Prototipe [ton]	cot θ	BERAT JENIS MODEL [kg/m ³]	Δ	KOEFISIEN KERUSAKAN (KD)
1a	7.2	2.74	0,29%	170	12.15	2	2230	1.23	1.32
1b	9.1	3.46	0,29%	170	12.15	2	2230	1.23	2.66
1c	10.2	3.88	0,29%	170	12.15	2	2230	1.23	3.74
1d	10.8	4.10	0,29%	170	12.15	2	2230	1.23	4.44
2a	7.4	2.81	0.01%	170	12.15	2	2230	1.23	1.43
2b	9.3	3.53	0.60%	170	12.15	2	2230	1.23	2.84
2c	10.1	3.84	0.60%	170	12.15	2	2230	1.23	3.63
2d	10.9	4.14	0.60%	170	12.15	2	2230	1.23	4.56
3a	7.8	2.96	0,00%	170	12.15	2	2230	1.23	1.67
3b	7.85	2.98	0,00%	170	12.15	2	2230	1.23	1.70
3c	10.6	4.03	0,00%	170	12.15	2	2230	1.23	4.20
3d	10.9	4.14	0,00%	170	12.15	2	2230	1.23	4.56

Tabel 4. Koefisien Kerusakan Armour Unit BPPT-lock

NO	TINGGI GELOMBANG -Model [cm]	TINGGI GELOMBANG -Prototipe, [m]	KERUSAKAN, (%)	BERAT Model [gram]	BERAT Prototipe [ton]	cot θ	BERAT JENIS MODEL [kg/m ³]	Δ	KOEFISIEN KERUSAKAN (KD)
1a	8	3.04	0,01%	66.69	2.71	2	1980	0.98	8.08
1b	9.6	3.648	0,83%	66.69	2.71	2	1980	0.98	13.95
1c	10.8	4.104	1,65%	66.69	2.71	2	1980	0.98	19.87
1d	10.8	4.104	1,65%	66.69	2.71	2	1980	0.98	19.87
	7.9		0.15%						7.78
2a	8	3.04	0,21%	66.69	2.71	2	1980	0.98	8.08
2b	9.5	3.61	0,21%	66.69	2.71	2	1980	0.98	13.52
2c	10.6	4.028	0,21%	66.69	2.71	2	1980	0.98	18.79
2d	10.6	4.028	0,21%	66.69	2.71	2	1980	0.98	18.79
3a	7.4	2.812	0,01%	66.69	2.71	2	1980	0.98	6.39
3b	9.3	3.534	0,05%	66.69	2.71	2	1980	0.98	12.69
3c	10.5	3.99	0,60%	66.69	2.71	2	1980	0.98	18.26
3d	10.9	4.142	0,60%	66.69	2.71	2	1980	0.98	20.43

Kolom tinggi gelombang berisi hasil pencatatan sensor tinggi gelombang yang berada di depan model *breakwater*. Kolom kerusakan (dinyatakan dalam %) dihitung berdasarkan jumlah perpindahan *armour* unit saat pengujian. Persentase kerusakan adalah persentase jumlah *armour* unit yang berpindah dari posisinya dibandingkan keseluruhan *armour* unit yang digunakan dalam pengujian. Kerusakan ini dihitung secara kumulatif. Kolom berat prototipe dan koefisien kerusakan (KD) diperoleh berdasarkan hasil analisis

kesebangunan dengan menggunakan formula Hudson (Hudson, 1958) yang diberikan pada persamaan berikut:

$$W_0 = \frac{\gamma_r H_d^3}{KD \Delta^3 \cot \theta} \quad (2)$$

dimana :

- W : Berat Armor Unit
- Hd : Tinggi gelombang rencana
- KD : Koefisien Kerusakan

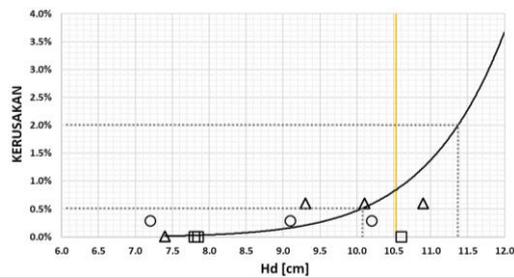
Δ : (Sr-1); Sr adalah rasio berat unit *armour* terhadap berat unit air laut. $S_r = \frac{\gamma_r}{\gamma_w}$ dimana γ_r adalah berat jenis *armour* unit; untuk prototipe 2,2 ton/m³ dan untuk model sebagaimana diberikan pada 0. Sedangkan γ_w adalah berat jenis air laut (1,025 ton/m³) untuk prototipe atau berat jenis air tawar (1,0 ton/m³) pada model

θ : Kemiringan lereng struktur

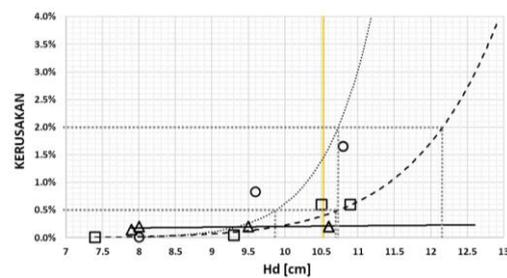
Dalam baris paling atas pengulangan pengujian kedua pada 0 di atas, ditambahkan kondisi gelombang 75%Hd sebesar 7,5 cm dimana pada kondisi gelombang tersebut, tidak menyebabkan terjadinya kerusakan pada *breakwater*. Definisi kerusakan adalah nilai persentase antara 0 sampai 0,05%. Nilai-nilai dalam 0 dan 0 di atas akan ditampilkan dalam bentuk grafik yang menunjukkan hubungan

antara tinggi gelombang Hd dan koefisien kerusakan KD terhadap persentase kerusakan yang terjadi saat pengujian sebagaimana ditunjukkan dalam 0 dan 0.

Titik-titik segitiga, kotak dan lingkaran dan garis regresi lurus putus-putus dan tipis, menunjukkan hasil pengulangan saat pengujian stabilitas *armour* unit. Berdasarkan 0 dan 0 diatas, bisa didapatkan rata-rata nilai KD masing-masing untuk Tetrapod dan BPPT-lock, pada persentase kerusakan 0,5% dan 2% yang selanjutnya disusun dalam bentuk tabel perbandingan hasil uji antara Tetrapod dan BPPT-lock. Nilai 2% ini ditetapkan sebagai batas atas kerusakan batu lapis lindung *breakwater*, sementara persentase kerusakan di bawah 0,5% berarti tidak ada kerusakan yang terjadi pada lapis lindung.

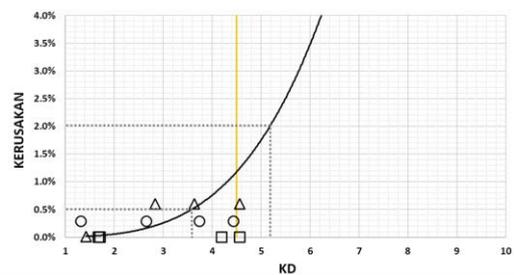


(a). Tetrapod

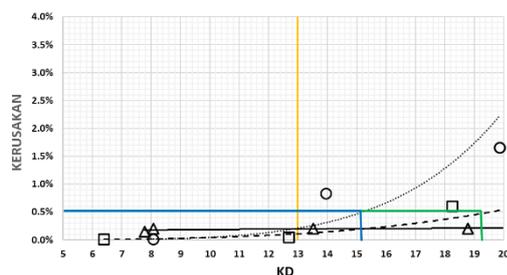


(b) BPPT-Lock

Gambar 7. Pengaruh tinggi gelombang pada kerusakan armour unit



(a). Tetrapod



(b). BPPT-Lock

Gambar 8. Nilai KD pada persentase kerusakan armour unit

Tabel 5. Perbandingan Hasil Uji Armour Unit pada Potongan 5

	Model		Prototipe	
	Tetrapod	BPPT-lock	Tetrapod	BPPT-lock
Gelombang rencana - Hd	10.53 cm	10.53 cm	4.00 m	4.00 m
Berat	170.00 gram	66.69 gram	12.15 ton	2.71 ton
Hs pada 0,5%	10,10 cm	10.29 cm	4.65 m	3.91 m
Hs pada 2%	11,40 cm	11.50 cm	5.24 m	4.37 m
Kerusakan saat Hd	0,90%	0.66%	0,90%	0.66%
KD desain	4,5	13	4,5	13
KD pada 0,5%	3.6	16.60	3.60	17,15
KD pada 2%	5,20	-	5,20	-
Kerusakan KD rencana	1,3%	0.22%	1,3%	0.22%

Tabel 6. Rekapitulasi Tetrapod dan BPPT-lock Potongan

n : 38	Skala Model					Skala Prototipe		Skala Prototipe untuk Perencanaan				
	Hd [cm]	Wm [gram]	Kerusakan (%)	KD	$N_w = \frac{W_p}{W_m}$	Hd [m]	Wp [ton]	Hd [m]	Kerusakan (%)	Wd [ton]	K D	Kerusakan (%)
Jenis	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Tetrapod	7,90	170,0	0,0%	0,00	71444,75	3,00	12,15	4,00	0,9%	10,40	4,5	1,3%
	10,10		0,5%	3,60		3,84						
	11,40		2,0%	5,20		4,13						
BPPT-lock	7,90	66,69	0,0%	0,00	40697,98	3,00	2,71	4,00	0,66%	3,60	13	0,22%
	10,29		0,5%	17,15		3,91						
	11,50		2,0%	-		4,37						

Potongan 5 merupakan bagian *breakwater* selatan yang terletak pada bagian lengan atau siku. Perencanaan lapis pelindung pada bagian ini menggunakan koefisien kerusakan (KD) pada bagian kepala, karena bagian ini rentan terhadap serangan gelombang dari arah Tenggara. Hasil pengujian untuk Tetrapod dan BPPT-lock berdasarkan grafik-grafik yang telah ditampilkan akan dirangkum dalam tabel sebagaimana 0 di bawah ini yang menunjukkan berbagai nilai KD Tetrapod dan BPPT-lock untuk persentase kerusakan 0,5% dan 2% pada bagian potongan 5. Dalam perencanaan, digunakan nilai KD yang dihasilkan dari persentase kerusakan 0,5%, untuk alasan keamanan. Selanjutnya, berat model *armour* unit yang ada di laboratorium (W_m - kolom 2) akan dikonversi dengan skala berat (N_w - kolom 5) untuk mendapatkan berat

batu di prototipe (W_p - kolom 7) dengan mempertimbangkan perbedaan berat jenis material penyusun model *armour* unit. Berat jenis *armour* unit di prototipe diasumsikan sebesar $2,2 \text{ kg/m}^3$ berdasarkan realitas pelaksanaan produksi *armour* unit yang ada selama ini. Selanjutnya berat prototipe (dalam ton) yang dihitung berdasarkan hasil uji model diberikan dalam kolom W_p (kolom 7), dari hasil tersebut didapatkan masing-masing berat yang sebenarnya berdasarkan hasil pengujian di laboratorium. Kolom 9 adalah persentase kerusakan yang terjadi saat tinggi gelombang desain di ujikan pada model *breakwater*, nilainya dilihat berdasarkan grafik-grafik persentase kerusakan terhadap gelombang yang telah ditampilkan pada 0. Sedangkan kolom 12 menunjukkan persentase kerusakan yang terjadi untuk nilai KD desain yang ditampilkan pada 0.

Hasil pengujian *breakwater* pada potongan 5 menunjukkan bahwa Tetrapod dengan berat 12,15 ton memiliki persentase kerusakan 0,5% dengan nilai KD sebesar 3,6. Sedangkan BPPT lock dengan berat 2,71 ton memiliki persentase kerusakan 0,5 % dengan untuk nilai KD sebesar 17,15. Nampak terlihat dalam 0 bahwa untuk Tetrapod dengan gelombang rencana 4,0 m tersebut kerusakan yang terjadi sekitar 0,9% sedangkan pada BPPT-lock hanya sebesar 0,66% saja sebagaimana terlihat pada kolom 9 di 0 di atas. Sedangkan perencanaan dengan menggunakan nilai KD 4,5 untuk Tetrapod, menghasilkan kerusakan 1,3% dan 0,22% untuk BPPT-lock dengan menggunakan nilai KD 13. Perencanaan dengan Tetrapod memiliki nilai kerusakan di atas 0,5% jadi tidak disarankan untuk digunakan sebagai *armour* unit.

SIMPULAN

Untuk mendapatkan persentase kerusakan yang lengkap, diperlukan pengujian gelombang sebesar 75%Hd, 100%Hd, 125%Hd, dan 150%Hd. Pengujian dilakukan secara berulang minimal 3 kali, dan mungkin masih diperlukan tambahan pengulangan uji stabilitas dengan peningkatan tinggi gelombang, apabila *armour* unit yang di uji masih cukup stabil (kerusakan di bawah 2%). Berat *armour* unit yang paling ideal dicapai apabila kerusakan dibawah 0,5%, karena *armour* unit tidak mengalami kerusakan / berpindah sama sekali. Pengulangan ini dilakukan untuk mendapatkan gambaran stabilitas yang cukup lengkap.

Nilai KD yang digunakan dalam formula Hudson dalam perencanaan berat *armour* unit tidak memberikan informasi yang jelas mengenai persentase kerusakan yang terjadi. Hasil pengujian fisik menunjukkan bahwa kerusakan yang terjadi dengan pemakaian KD = 4,5 untuk Tetrapod memberikan kerusakan 1,3%, sementara pemakaian KD = 13 untuk BPPT-lock memberikan persentase kerusakan 0,22%.

Berdasarkan hasil uji model fisik 2 dimensi *armour* unit BPPT-lock menunjukkan persentase kerusakan yang lebih kecil dibanding Tetrapod dengan angka stabilitas yang lebih baik. Pada persentase kerusakan 0,5% bagian siku/lengan *breakwater* selatan (potongan 5) hasil pengujian menunjukkan nilai KD untuk Tetrapod sebesar 3,6 sedangkan BPPT-lock memiliki KD sebesar 17,15. Sehingga untuk *breakwater* pelabuhan Sanur, dipilih BPPT-lock sebagai unit *armour* dengan berat 3,6 ton dengan estimasi kerusakan 0,22% pada gelombang rencana H_{100th} sebesar 4 m yang terjadi di sekitar kepala *breakwater* Selatan, atau H_{100th} sebesar 5,22 m yang terjadi di laut lepas untuk gelombang dari arah Tenggara.

DAFTAR PUSTAKA

- BTIPDP., (2021). Laporan Hasil Uji Model Fisik Breakwater Pelabuhan Sanur di Balai Teknologi Infrastruktur Pelabuhan dan Dinamika Pantai. Yogyakarta.
- Hudson, R. Y., (1958). *Design of Quarry-stone Cover Layers for Rubble-mound Breakwaters*. US Army Engineers Waterways Experiment Station. Vicksburg, Mississippi.
- Hudson, R. Y., (1975). *Scale Effects in Rubble-Mound by Variations in the Specific Gravity of the Armor Units and Underlayer Stones*. US Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi.
- Hughes, S. A., (1993). *Physical Models and Laboratory Techniques in Coastal Engineering*. World Scientific, Singapore.
- Kementerian Perhubungan RI., (2019). *Rencana Induk Pelabuhan Sanur Kota Denpasar, Provinsi Bali*. Jakarta.
- Latham, J.-P., Xiang, J., & Higuera, P., (2015). Numerical Modelling of the Stability of Breakwater Armour Systems, *disajikan pada Coastal Structures and Solutions*

- to Coastal Disasters 2015, 9 – 11 September, Boston, Massachusetts
- Meer, Van. der., (1988). *Rock Slopes and Gravel Beaches under Wave Attack*. Ph.D Thesis, Delft University of Technology.
- Wolters, G., van Gent, M., Allsop, W., Hamm, L., & Mühlestein, D., (2009). *HYDRALAB III: Guidelines for physical model testing*, HYDRALAB III Consortium Participants (DHI, HRW, UPC, LNEC) & SOGREAH.
- Yuwono, N., Triatmadja, R., Nurfaida, W., dan Bhakty, E. T., (2021). *Perencanaan Model Skala Hidraulis* (2 ed.). Kanisius, Yogyakarta.