

## UJI MODEL FISIK 2 DIMENSI STABILITAS LAPIS PELINDUNG STRUKTUR JETTY MUARA SUNGAI TUKAD UNDA

Ma'ruf Hadi Sutanto\*, Ida Ayu Irawati Diah Ratna Putra, Bayu Purnama,  
M. Hendro Setiawan, Irham Adrie Hakiki, Adi Prasetyo

Balai Teknik Pantai, Direktorat Jenderal Sumber Daya Air, Kementerian PUPR

\*maruf.hadi@pu.go.id

Pemasukan: 3 November 2022 Perbaikan: 23 Mei 2023 Diterima: 24 Mei 2023

### Intisari

Tukad Unda yang bermuara di Pantai Jumpai, Kabupaten Klungkung telah mengalami perubahan arah alur akibat perubahan arah gelombang dan penutupan mulut muara sungai. Selain itu kawasan muara Tukad Unda juga akan jadi bagian dari Pusat Kebudayaan Bali (PKB). Bangunan jetty tegak lurus pantai yang diletakkan pada kedua sisi muara sungai, menggunakan tumpukan batu sebagai lapis pelindung mengalami kerusakan pada bagian kepala jetty. Sebagai pengamanan terhadap struktur jetty agar tidak bertambah rusak direncanakan menambah lapis pelindung pada bagian kepala dan badan jetty dengan menggunakan tambahan armor BPPT-lock. Sebagai unit lapis pelindung struktur jetty harus dilakukan pengujian model fisik dalam skala laboratorium. Pengujian model fisik dalam skala laboratorium ini dilakukan sebagai verifikasi terhadap kehandalan struktur armor BPPT-lock. Pada skenario pengujian Tipikal 1 (FF P8-P10), dengan skema pemasangan acak dari kaki sampai *slope* atas serta perubahan geometri struktur yaitu tanpa menggunakan *berm*, nilai prosentase kerusakan yang terbesar pada gelombang desain  $N_d = 1,85\%$  (FF-P10), sehingga unit lapis pelindung relatif stabil untuk diterapkan ( $N_d < 2\%$ ).

Kata Kunci: BPPT-lock, stabilitas, uji model fisik, jetty, gelombang

### Latar Belakang

Tukad Unda yang bermuara di Pantai Jumpai, Kabupaten Klungkung telah mengalami perubahan arah alur akibat perubahan arah gelombang dan penutupan mulut muara sungai oleh pasang surut, debit sungai serta sedimentasi akibat lahar dingin yang berasal dari letusan gunung Agung. Selain itu kawasan muara Tukad Unda juga akan menjadi bagian dari Pusat Kebudayaan Bali (PKB). Sebagai upaya untuk menanggulangi perubahan arah alur akibat gelombang dan penutupan muara sungai oleh pasang surut, direncanakan bangunan pengaman muara sungai yaitu berupa jetty yang berfungsi untuk mengendalikan sedimentasi yang berada di muara Tukad Unda.

Beberapa bulan setelah pekerjaan selesai terjadi kerusakan pada bagian kepala struktur jetty sisi barat, kerusakan diperkirakan mulai terjadi pada tanggal 26 Mei

2021 yaitu ketika fenomena *super moon*, di mana tunggang pasang yang terjadi cukup tinggi. Sebagai pengamanan terhadap struktur jetty agar tidak bertambah luas kerusakan yang terjadi (Gambar 1), direncanakan akan menambah lapis pelindung pada bagian kepala dan badan jetty yang sebelumnya menggunakan lapis pelindung batu boulder, ditambahkan dengan menggunakan lapis pelindung BPPT-lock.

Selain pertimbangan keunggulan teknis, BPPT-lock mampu mereduksi biaya apabila dibandingkan dengan penggunaan struktur lain, yaitu dengan batu, tetrapod maupun jenis armor yang lain. Dari dasar pertimbangan tersebut, maka Balai Wilayah Sungai (BWS) Bali Penida memilih struktur armor BPPT-lock untuk digunakan sebagai tambahan lapis pelindung. Hasil pengujian dan penerapan BPPT-lock di PLTU Pacitan (Jauzi dkk., 2020) juga menjadi pertimbangan penggunaan lapis pelindung tersebut, beberapa penelitian lainnya di antaranya (Wurjanto dkk., 2022), (Istiyanto dkk., 2021) dan (Setyandito, Armono and Yuwono, 2021). Formula Hudson cukup populer di Indonesia dalam menentukan kebutuhan berat lapis pelindung (Hudson, 1961), di mana kriteria perencanaan ditentukan berdasarkan nilai koefisien stabilitas (KD). Van Der Meer dalam penelitiannya menambahkan formula Hudson dengan memperhatikan parameter gelombang pecah (Van der Meer, 1999) serta geometri struktur (Van der Meer dkk., 2014).

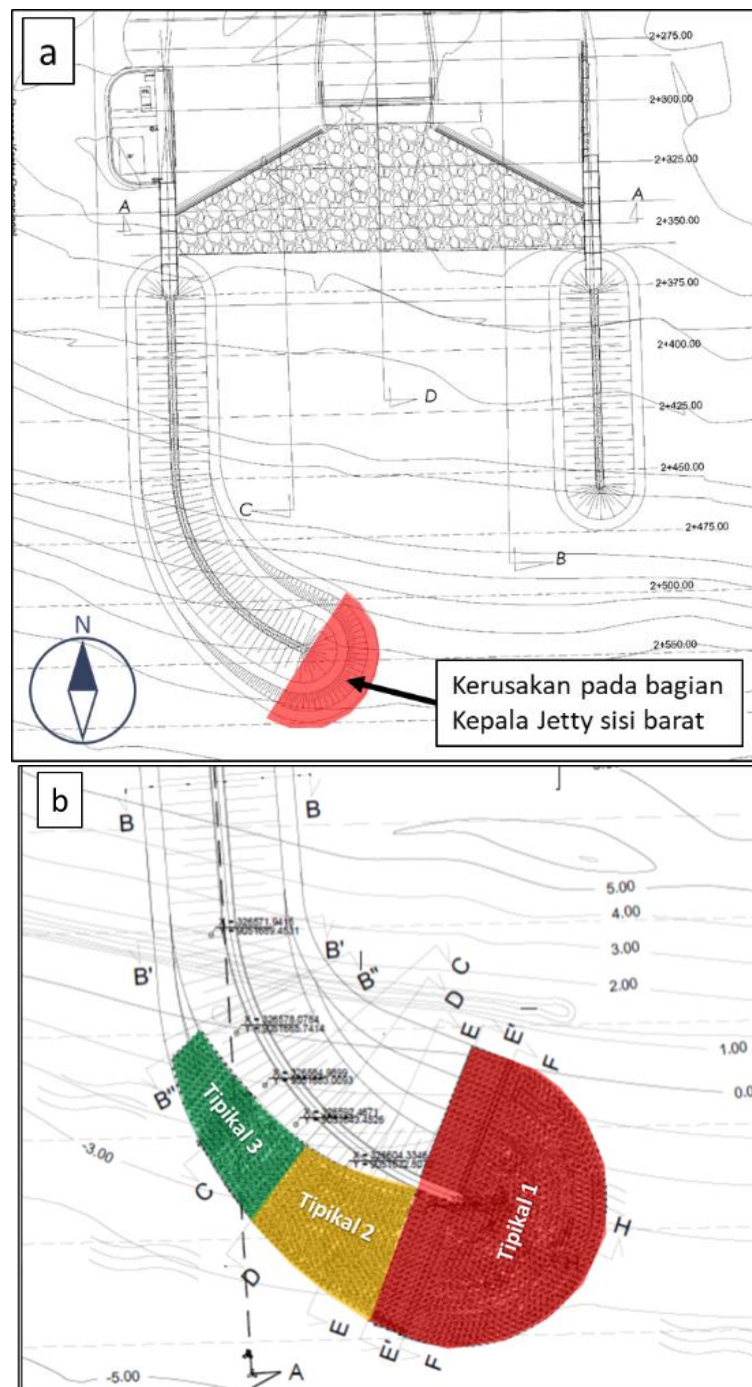
Penelitian terkait stabilitas lapis pelindung yang mirip BPPT-lock yaitu Xbloc diantaranya oleh Bruce dkk., 2009; De Rover dkk., 2014; Salauddin, 2015, sebagai unit lapis pelindung struktur jetty Muara Tukad Unda, maka BPPT-lock yang telah direncanakan dengan parameter desain dengan nilai stabilitas pada kondisi berbeda, harus diuji melalui pengujian model fisik dalam skala laboratorium. Pengujian ini diperlukan untuk mengetahui parameter stabilitas lapis pelindung, dan juga rayapan gelombang yang terjadi dengan beberapa skenario permodelan. Pengujian model fisik dalam skala laboratorium ini dilakukan sebagai verifikasi terhadap kehandalan struktur armor BPPT-lock yang akan dipasang di lapangan sebagai lapis lindung di jetty Muara Tukad Unda.



(Sumber: Balai Teknik Pantai, 2021)

Gambar 1 Struktur Jetty Tukad Unda yang mengalami kerusakan

Adapun layout struktur jetty dengan rencana penambahan armor BPPT-lock yang akan diberikan pada struktur jetty terlihat pada Gambar 2.



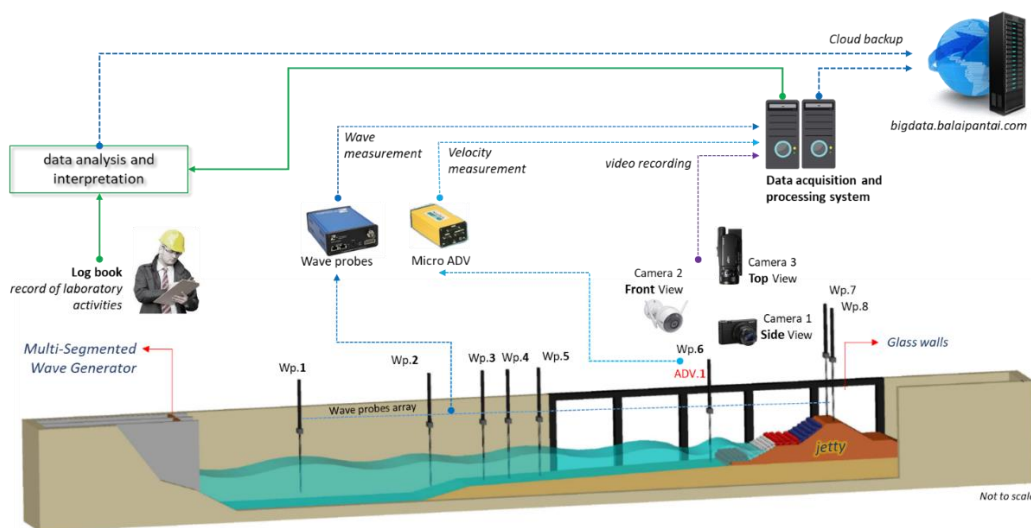
(Sumber: Balai Teknik Pantai, 2022)

Gambar 2 Layout struktur jetty (a) Kerusakan pada bagian kepala jetty, (b) Segmentasi tipikal penanganan dengan armor BPPT-lock

### Metodologi Studi

Pengujian model fisik 2-dimensi dilakukan di saluran gelombang fasilitas yang dimiliki Laboratorium Balai Teknik Pantai, dengan dimensi panjang 45 m, lebar 1

m dan tinggi 1 m, serta digunakan skala pemodelan 1:38 sesuai skala benda uji yang diproduksi oleh BPPT. Uji model fisik ini mengamati gaya-gaya gelombang dan interaksi gelombang, refleksi gelombang, rayapan gelombang, gelombang pecah yang terbentuk akibat struktur, stabilitas lapisan pelindung, serta terjadinya limpasan air pada puncak tanggul jika ada. Tipikal 1 dipilih untuk skenario pengujian, bagian ini yang mengalami kerusakan dengan *setup* struktur yaitu penampang melintang F-F. Gambaran setup saluran gelombang secara keseluruhan dan skema proses akuisisi data dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3 Skema setup instrumen dan proses akuisisi data pengujian

Nilai tinggi dan periode gelombang, elevasi muka air, serta variabel-variabel lain yang menyusun skenario pengujian dihasilkan dari penentuan skala tinggi gelombang desain ( $H_d$ ), ditentukan dari nilai tinggi gelombang ( $H_s$ ) dan periode puncak ( $T_p$ ). Pengujian menggunakan prinsip kesebangunan geometrik sempurna (tanpa distorsi/*undistorted*) yaitu skala panjang arah horizontal ( $n_L$ ) dan skala panjang arah vertikal ( $n_h$ ) adalah sama ( $n_L = n_h$ ). Diperoleh nilai hasil penentuan skala dalam bentuk parameter gelombang desain,  $H_D$  dan  $T_D$  (Tabel 1).

Tabel 1 Penskalaan tinggi dan periode gelombang desain

Parameter	Prototip	Model (1:38)
$H_D$ ( $n_L = n_h = 38$ )	3,59 m	0,094 m
$T_D$ ( $n_T = n_L^{0.5} = 0.16$ )	15,74 detik	2,55 detik

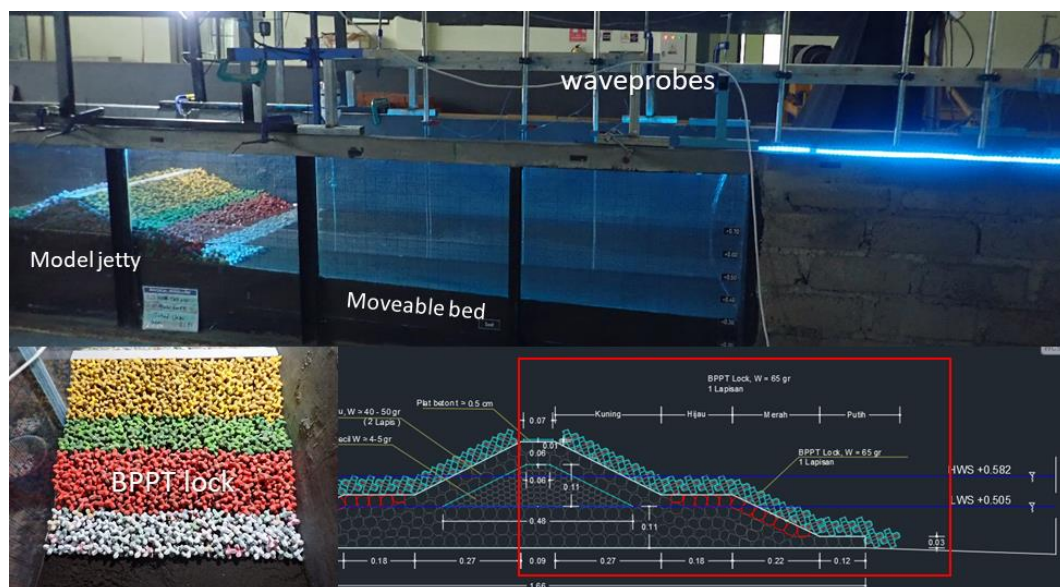
Nilai-nilai tersebut kemudian divariasikan dengan beberapa nilai yang lebih tinggi dan rendah untuk pengujian, agar diperoleh rentang data kajian yang lebih luas. Nilai gelombang yang dipakai dalam pengujian adalah menggunakan parameter nilai gelombang signifikan ( $H_s$ ), gelombang desain ( $H_d$ ) dan gelombang ( $H_1$ ). Variasi parameter pengujian lainnya mengikuti ketentuan skala seperti Tabel 1 di atas sesuai dengan dimensi dari masing-masing parameter (Tabel 2).



Tabel 2 Parameter skenario pengujian

Parameter	Prototip	Model (1:38)	Keterangan
Muka Air (m)	0,00; 2,93	0,000; 0,077	LWS; HWS
Tinggi Gelombang (m)	2,62; 3,59; 4,38 (HWS) 0,96; 1,32; 1,60 (LWS)	0,069; 0,094; 0,115 (HWS) 0,025; 0,035; 0,042 (LWS)	$H_s; H_5; H_1$ ( $H_{desain} = H_5 = 3,59$ m)
Periode Gelombang (detik)	14,79; 15,74; 16,34	2,40; 2,55; 2,65	Periode disesuaikan dengan $H_s; H_5; H_1$
Spektrum Gelombang	<i>Irregular</i> (Jonswap)	<i>Irregular</i> (Jonswap)	
Metode Pemasangan Armor BPPT-lock	Teratur/acak	Teratur/acak	
Skenario Tipikal	Tipikal 1	FF-Bagian Kepala Jetty	

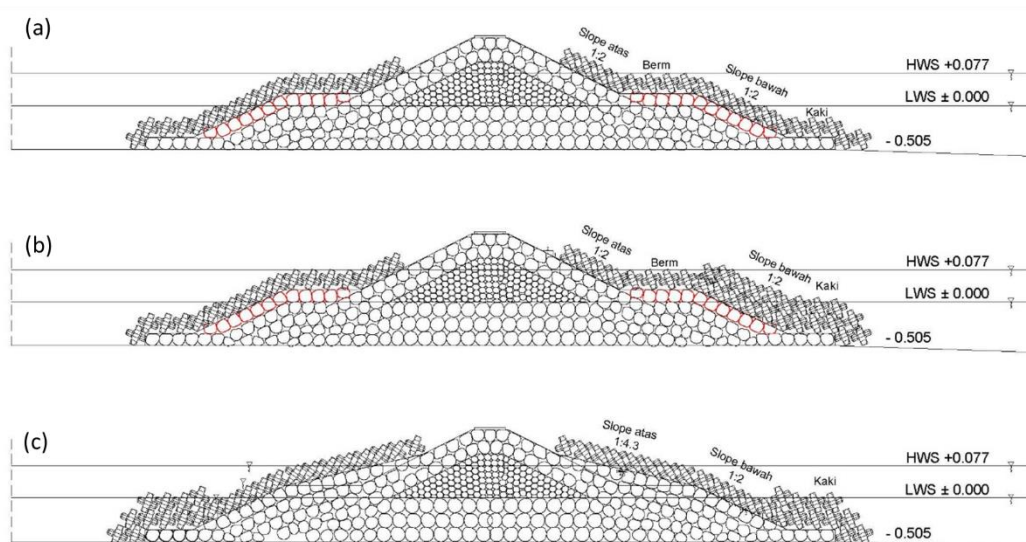
Kajian pada model fisik ini difokuskan pada gaya-gaya gelombang dan interaksi gelombang dengan struktur jetty, yaitu rayapan gelombang dan stabilitas lapis pelindung struktur. Selanjutnya, model diujikan di dalam saluran gelombang (Gambar 4) dengan pembangkitan gelombang menggunakan mesin pembangkit gelombang *irregular*.



Gambar 4 Gambaran setup struktur jetty di saluran gelombang 2 dimensi

Pengujian untuk skenario FF-P1 sampai dengan FF-P6 disimulasikan dengan struktur eksisting jetty Tukad Unda, yaitu dengan bagian struktur terdiri atas pelindung kaki, *slope* bawah, *berm* dan *slope* atas seperti pada Gambar 5a. Pengujian P5 merupakan uji coba di laboratorium pemasangan dalam kondisi dengan pembangkitan gelombang, serta pemasangan unit lapis pelindung kombinasi acak dan tersusun (Gambar 5b). Skenario FF-P5 dilakukan uji coba

metode pemasangan lapis pelindung pada skala laboratorium bersama dengan gelombang yang dibangkitkan dimulai dari bagian kaki struktur hingga ke bagian *slope* bagian atas, hal ini untuk mendapatkan metode yang tepat saat penerapan dilapangan, pada skenario FF-P5 ini tidak dilakukan perhitungan stabilitas.



Gambar 5 Perubahan struktur jetty pada Skenario Tipikal 1 (FF), (a) Tipikal 1 awal, (b) Alternatif 1, (c) Alternatif 2.

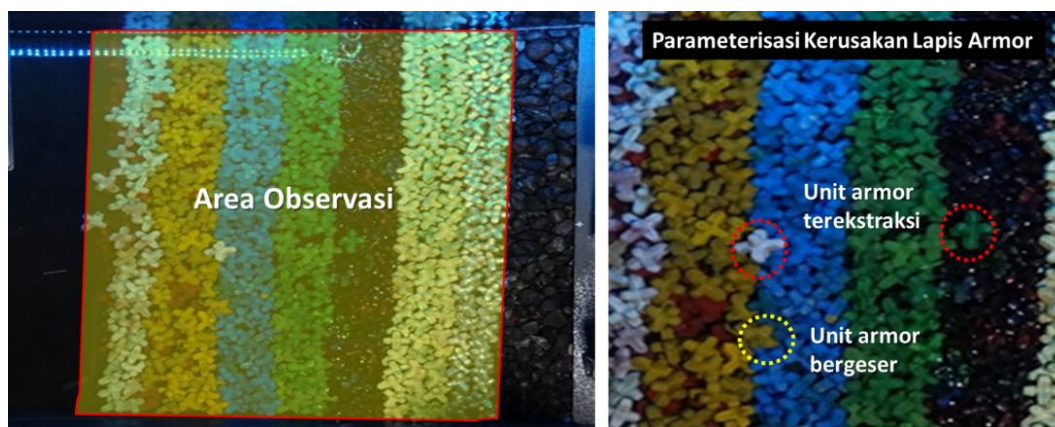
Perhitungan stabilitas lapis pelindung struktur dilakukan pada seluruh skenario pengujian kecuali skenario FF-P5, karena skenario ke-5 (P5) prosedur pengujian stabilitas lapis pelindung struktur tidak dipenuhi. Berdasarkan hasil diskusi dengan inventor (BPPT) dan kunjungan lapangan penerapan BPPT-lock di PLTU Pacitan, diperoleh alternatif metode pemasangan serta perubahan tipikal struktur dengan menghilangkan *berm* pada skenario FF-P7 sampai dengan FF-P10, struktur jetty hanya terdiri atas pelindung kaki, *slope* bawah dan *slope* atas seperti pada Gambar 5c. Metode pemasangan unit lapis pelindung dan jumlah lapisan pada tiap bagian struktur jetty diuraikan pada **Error! Not a valid bookmark self-reference..**

Tabel 3 Metode pemasangan lapis pelindung skenario Tipikal 1 (FF-P1 sd FF P10)

No	Tipikal	Susunan Bagian Struktur				Keterangan
		kaki	<i>slope</i> bawah	<i>berm</i>	<i>slope</i> atas	
1	FF-P1	acak 1 lapis (terkait)	acak 1 lapis (terkait)	acak 1 lapis (terkait)	acak 1 lapis (terkait)	
2	FF-P2	acak 2 lapis (tidak dipastikan terkait)	acak 2 lapis (tidak dipastikan terkait)	acak 1 lapis (tidak dipastikan terkait)	acak 1 lapis (tidak dipastikan terkait)	
3	FF-P3	acak 2 lapis (tidak dipastikan terkait)	acak 2 lapis (tidak dipastikan terkait)	acak 1 lapis (terkait)	acak 1 lapis (terkait)	

No	Tipikal	Susunan Bagian Struktur				Keterangan
		kaki	slope bawah	berm	slope atas	
4	FF-P4	acak 2 lapis (tidak dipastikan terkait)	acak 2 lapis (tidak dipastikan terkait)	acak 1 lapis (terkait)	acak 1 lapis (terkait)	Merupakan skenario pengulangan dari FF-P3.
5	FF-P5	acak 2 lapis (tidak dipastikan terkait)	acak 2 lapis (tidak dipastikan terkait)	teratur berkait 1 lapis	teratur berkait 1 lapis	Trial metode pemasangan, tidak dilakukan perhitungan stabilitas
6	FF-P6	acak 2 lapis (tidak dipastikan terkait)	acak 2 lapis dan kombinasi teratur berkait 2 lapis	teratur berkait 1 lapis	teratur berkait 1 lapis	Kondisi running FF-P6 sama dengan FF-P5.
7	FF-P7	acak 2 lapis (tidak dipastikan terkait)	acak 1 lapis (tidak dipastikan terkait)	tidak ada berm	teratur berkait 1 lapis	Struktur jetty untuk running typical FF-P7 disesuaikan dengan kondisi tanpa berm
8	FF-P8 s/d FF-P10	acak 2 lapis (tidak dipastikan terkait)	acak 1 lapis (tidak dipastikan terkait)	tidak ada berm	acak 1 lapis	Struktur jetty untuk running typical FF-P8 disesuaikan dengan kondisi tanpa berm

Metode yang digunakan untuk menghitung kerusakan lapis pelindung (armor) pada struktur prototip ataupun skala model adalah dengan menghitung jumlah armor yang berpindah dari posisi awal penempatan. Analisis stabilitas armor akan difokuskan terhadap prosentase kerusakan lapis armor menggunakan parameter  $N_d$  yaitu rasio antara jumlah unit armor yang mengalami perpindahan dari posisi awal dengan total unit terobservasi. Nilai  $N_d$  diperoleh dari perbandingan antara unit armor yang memenuhi kriteria pergesaran dan ekstraksi dengan jumlah unit lapis pelindung (armor) yang berada di dalam area observasi (Gambar 6). Pemilihan parameter ini didasari oleh sebagian besar pengujian dilaksanakan pada unit armor buatan serta didukung oleh referensi literatur-literatur terdahulu yang menggunakan  $N_d$  (O'Donoghue, 2014), sebagai parameter untuk mendefinisikan derajat kerusakan lapisan armor yang tersusun dari unit armor artifisial (armor beton). Klasifikasi kerusakan unit lapis pelindung dengan parameter unit yang berpindah ( $N_{od}$ ) dan prosentase kerusakan ( $N_d$ ), ditentukan dengan batas yang dapat diterima yaitu 2% (Tabel 4), maka hasil dari setiap pengujian nilai prosentase kerusakan dievaluasi berdasarkan kriteria tersebut.



Gambar 6 Area observasi beserta parameterisasi kerusakan lapis armor

Tabel 4 Klasifikasi kerusakan struktur (Gerding, 1993)

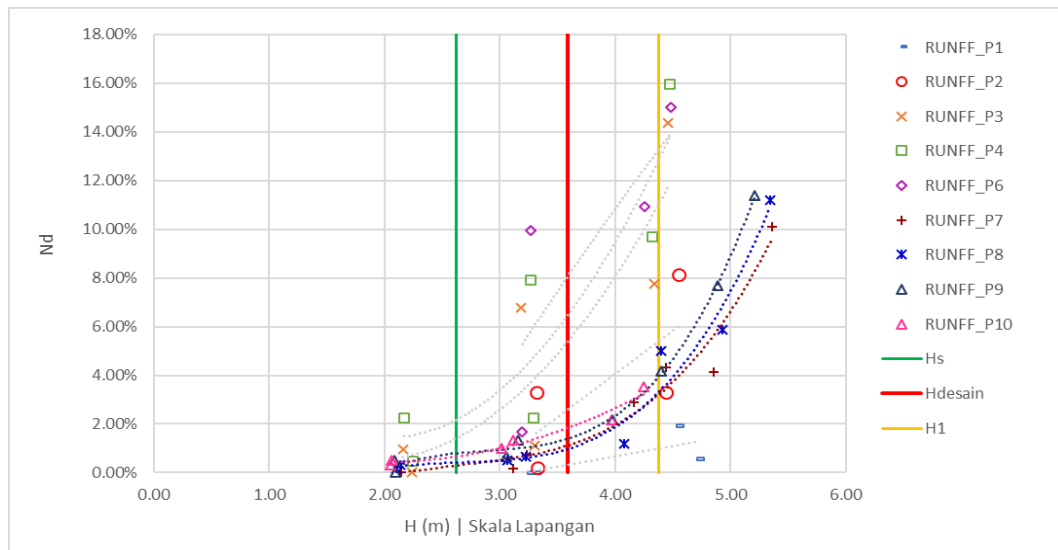
$N_{od}$	Penjelasan
$< 0,5$	Hampir tidak ada kerusakan
$0,5-2$	Kerusakan dapat diterima, memenuhi kriteria desain
$>4$	Kerusakan tidak dapat diterima, struktur kaki kehilangan fungsinya

### Hasil Studi dan Pembahasan

Serangkaian pengujian yang telah dilakukan pada skenario Tipikal 1 (F-F), dimulai dari skenario P1 sampai dengan P10, dengan hasil analisis prosentase kerusakan ( $N_d$ ) dibandingkan dengan Tinggi Gelombang (H) pada skala lapangan disajikan pada Gambar 7. Prosentase kerusakan pada skenario P1 terlihat relatif sangat kecil yaitu 0,34% dengan kondisi tinggi gelombang desain ( $H_5$ ), namun demikian pengujian skenario P1 metode pemasangan unit lapis pelindung BPPT-lock dengan memastikan seluruh unit lapis pelindung terkait, hal ini cukup mudah dilakukan pada skala laboratorium dengan menggunakan tangan, tetapi akan sangat sulit diterapkan di lapangan. Skenario pengujian P2 sampai dengan P6 terlihat hasil prosentase kerusakan melebihi kriteria yaitu di atas 2%, nilai prosentase kerusakan tertinggi pada pengujian P4 yaitu 6,55%.

Diperlihatkan secara jelas juga tren kerusakan pada skenario P7-P10, diperoleh dari hasil pengujian nilai prosentase kerusakan masih di bawah 2,00 %, prosentase kerusakan tertinggi pada skenario P10 untuk tinggi gelombang desain yaitu 1,83%. Secara lengkap hasil analisis nilai prosentase kerusakan ( $N_d$ ) unit lapis pelindung untuk setiap skenario disajikan pada Tabel 5.



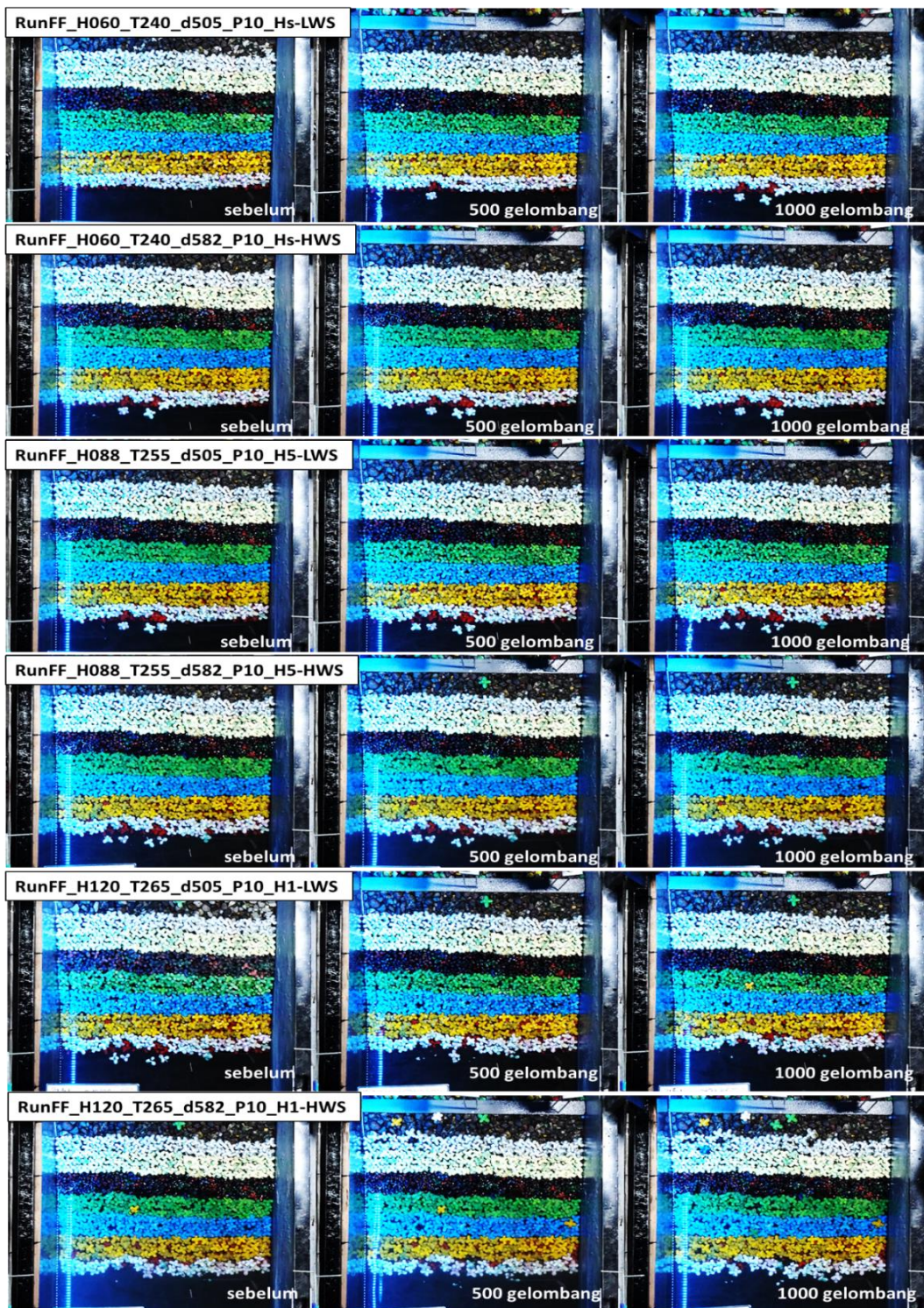


Gambar 7 Analisis stabilitas armor BPPT-lock ( $H$  vs  $N_d$ ) untuk pengujian skenario Tipikal 1 (P1 sd P10)

Tabel 5 Nilai prosentase kerusakan skenario Tipikal 1 (FF P1-P10)

Pengujian	$N_d$ (%)		
	$H_s$	$H_5$	$H_1$
P1	0,00	0,34	1,06
P2	0,00	2,60	5,41
P3	1,39	5,37	11,02
P4	2,21	6,55	12,98
P5	Tidak dilakukan pengukuran/skip		
P6	1,10	8,13	13,37
P7	0,28	1,09	3,15
P8	0,40	0,96	3,32
P9	0,80	1,37	3,89
P10	0,65	1,83	3,54

Gambaran proses pengujian yang dilakukan mulai dari skenario gelombang  $H_s$  hingga  $H_5$ , dengan prosedur yang telah ditentukan disajikan pada Gambar 8, diperlihatkan untuk skenario tipikal 1 (FF-P10). Dimulai dari skenario tinggi gelombang signifikan ( $H_s$ ) pada kondisi LWS, hingga skenario tinggi gelombang desain  $H_5$ . Proses pembebanan gelombang dilakukan bertahap tiap 500 gelombang. Dapat dilihat juga kerusakan pada kaki struktur pada awal pengujian, bahkan telah terjadi pada skenario tinggi gelombang signifikan. Kontribusi kerusakan sangat terlihat pada bagian kaki struktur, dimana pada bagian *slope* bawah hingga *slope* atas relatif stabil. Kerusakan ini kemungkinan besar karena pada bagian kaki struktur metode pemasangannya secara acak dan memastikan tiap unit lapis lindung saling terkait akan sulit dilakukan. Metode pemasangan secara bertahap disarankan pada bagian kaki struktur, untuk memastikan bagian kaki struktur telah cukup stabil, sehingga dapat dilanjutkan pemasangan pada bagian di atasnya.



Gambar 8 *Snapshot* proses pengamatan kerusakan unit armor pada pengujian Tipikal 1 (FF P10)

## Kesimpulan dan Saran

### Kesimpulan

Hasil dari pengujian menunjukkan nilai prosentase kerusakan terendah pada gelombang desain ( $H_s$ ) adalah hasil pengujian pertama (P1) yaitu sebesar 0,34%, namun pada skenario ini metode pemasangan akan sangat sulit diterapkan di lapangan, metode pemasangan dilakukan secara teratur dan dipastikan terkait di setiap bagian struktur jetty. Pada skenario pengujian Tipikal 1 (FF P8-P10), dengan skema pemasangan acak dari kaki sampai *slope* atas serta perubahan geometri struktur yaitu tanpa menggunakan *berm*, nilai prosentase kerusakan yang terbesar pada gelombang desain  $N_d = 1,85\%$  (FF-P10), sehingga unit lapis pelindung relatif stabil untuk diterapkan ( $N_d < 2\%$ ). Diperoleh jumlah unit lapis pelindung tiap luasan  $100\text{ m}^2$  di lapangan yaitu 46 – 48 unit untuk satu lapisan, dan 65 - 70 unit untuk dua lapisan.

### Saran

Metode pemasangan di lapangan sangat perlu diperhatikan, jika memungkinkan disimulasikan dengan unit lapis pelindung pada skala lapangan (prototip). Optimasi desain masih dapat dilakukan untuk kebutuhan berat unit lapis pelindung maupun tipikal melintang struktur. Apabila dilakukan perubahan maka perlu dilakukan perhitungan secara benar, serta jika diperlukan diuji pada skala laboratorium.

### Ucapan Terima Kasih

Terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu terutama kepada rekan-rekan teknisi Laboratorium Balai Teknik Pantai, rekan kerja di Satker Balai Wilayah Sungai Bali Penida, Kementerian PUPR serta rekan di BPPT.

### Daftar Referensi

- Bruce, T. dkk., 2009. 'Overtopping performance of different armour units for rubble mound breakwaters', *Coastal Engineering*. Elsevier B.V., 56(2), pp. 166–179. doi: 10.1016/j.coastaleng.2008.03.015.
- Gerding, E., 1993. *Toe Structure Stability of Rubble Mound Breakwaters*, TU Delft. Delft University of Technology.
- Hudson, R. Y., 1961. 'Laboratory Investigation of Rubble-Mound Breakwaters', Transactions of the American Society of Civil Engineers. *American Society of Civil Engineers*, 126(4), pp. 492–520. doi: 10.1061/taceat.0008346.
- Istiyanto, D. C. dkk., 2021, 'Design of rubble mound slope protection for cellular cofferdam breakwater retrofitting', *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 698(1). doi: 10.1088/1755-1315/698/1/012003.
- Jauzi, M. Z. dkk., 2020. 'BPPT-lock Armor Unit Implementation for Improving Breakwater Sustainability at the Pacitan Power Plant', *Journal of Physics: Conference Series*, 1625(1). doi: 10.1088/1742-6596/1625/1/012047.



- Van der Meer, J. and Sigurdarson, S., 2014. 'Geometrical Design of Berm Breakwaters', *Coastal Engineering Proceedings*, 1(34), p. 25. doi: 10.9753/icce.v34.structures.25.
- Van der Meer, J. W., 1999. 'Design of concrete armour layers', *Proceedings of the International Conference Coastal Structures '99*: Santander, Spain, 7-10 June 1999, Volume 1, pp. 213–221.
- O'Donoghue, T. 2014. *Users Guide to Physical Modelling and Experimentation: Experience of the HYDRALAB Network*, Hydralab. doi: 10.1680/eacm.14.00013.
- De Rover, R., Reedijk, B. and Bakker, P., 2014. 'Xbloc Innovations At Swinoujscie Breakwater', *Coastal Engineering Proceedings*, 1(34), p. 62. doi: 10.9753/icce.v34.structures.62.
- Salaudin, M., 2015. 'Physical model tests on new armour block Crablock for breakwaters to come to preliminary design guidance', (April). Available at: uuid:0d4daf90-d8fc-460f-8b42-fc1e33861b1a.
- Setyandito, O., Armono, H. D. and Yuwono, N., 2021. 'Uji Model Fisik Stabilitas Unit Lapis Lindung Pemecah Gelombang Pelabuhan Sanur', *Jurnal Ilmiah Desain & Konstruksi*, 20(2), pp. 139–149. doi: 10.35760/dk.2021.v20i2.5073.
- Wurjanto, A. and Hardaya, A. P., 2022. 'Quantitative consideration in selection of breakwater concrete armor unit based on unit's internal tensile stress response', *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1065(1), p. 012021. doi: 10.1088/1755-1315/1065/1/012021.