

ANALISIS PENGARUH DIAMETER SEDIMEN TERHADAP KESTABILAN LERENG BAWAH AIR DI PERAIRAN DANGKAL (STUDI EKSPERIMENTAL)

Hidriansyah Idhan Akbar*, Muhammad Yunus Ali, Andi Makbul Syamsuri

Program Studi Magister Teknik Sumber Daya Air, Universitas Muhammadiyah Makassar,
Makassar, Sulawesi Selatan

*Email: HidriansyahIdhanAkbar_ST@yahoo.com

Abstrak

Kestabilan lereng bawah air pada area pengerukan dipengaruhi oleh karakteristik butiran dan perubahan geometri lereng selama pembebanan hidrodinamik. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh variasi diameter sedimen yang direpresentasikan oleh sampel D16, D50, dan D100 terhadap parameter sudut geser dalam semu dan faktor keamanan relatif lereng bawah air di perairan dangkal. Metode yang digunakan adalah studi eksperimental laboratorium dengan pengamatan pada kedalaman air 13, 21, dan 23 cm serta lama pembebanan gelombang 5, 10, dan 15 menit. Parameter yang dianalisis meliputi sudut runtuh, tinggi sedimen, proyeksi horizontal lereng, dan perubahan geometri sesudah pengujian. Hasil menunjukkan bahwa rerata parameter sudut geser dalam semu tertinggi diperoleh pada D16 sebesar 15.43° , kemudian D100 sebesar 13.46° , dan D50 sebesar 13.38° . Faktor keamanan relatif sesudah pengujian menunjukkan nilai tertinggi pada D50 sebesar 0.935, diikuti D16 sebesar 0.910 dan D100 sebesar 0.908. Diameter sedimen memengaruhi kestabilan lereng bawah air, tetapi pengaruhnya terhadap faktor keamanan tidak hanya ditentukan oleh sudut runtuh, melainkan juga oleh perubahan geometri lereng akibat erosi dan redistribusi sedimen selama pengujian. Kontribusi penelitian ini terletak pada pembacaan simultan antara parameter material dan perubahan geometri lereng untuk mengevaluasi kestabilan lereng bawah air skala laboratorium.

Kata kunci: diameter sedimen, faktor keamanan, lereng bawah air, perairan dangkal, sudut geser dalam semu

Abstract

The stability of underwater excavation slopes is governed by grain characteristics and slope-geometry changes during hydrodynamic loading. This study analyzes the influence of sediment diameter variation, represented by D16, D50, and D100 samples, on the apparent internal friction angle and the relative factor of safety of underwater slopes in shallow water. A laboratory experimental approach was used with water depths of 13, 21, and 23 cm and wave-loading durations of 5, 10, and 15 minutes. Observed parameters included collapse angle, sediment height, horizontal slope projection, and post-test geometric change. The highest mean apparent internal friction angle was obtained for D16 (15.43°), followed by D100 (13.46°) and D50 (13.38°). The highest post-test relative factor of safety was found for D50 (0.935), followed by D16 (0.910) and D100 (0.908). The results indicate that sediment diameter affects underwater slope stability, but its effect on the safety factor is controlled not only by collapse angle but also by geometric modification caused by erosion and sediment redistribution during testing.

Keywords: *apparent internal friction angle, relative safety factor, sediment diameter, shallow water, underwater slope*

1. PENDAHULUAN

Lereng bawah air pada area pengerukan dan perairan dangkal bekerja dalam kondisi yang berbeda dengan lereng darat, karena kestabilannya dipengaruhi secara simultan oleh sifat butiran, berat isi material, geometri lereng, dan gangguan hidrodinamik dari gelombang atau gerakan air. Dalam mekanika tanah, perubahan kecil pada parameter kuat geser dan sudut lereng dapat menghasilkan perubahan nyata pada kondisi stabilitas lereng, terutama pada material nonkohesif seperti pasir yang dominan dikontrol oleh gesekan antarbutir (Terzaghi dkk., 1996; Duncan dkk., 2014). Di lingkungan pantai dan perairan dangkal, proses hidrodinamik juga berperan mempercepat pengikisan kaki lereng, perubahan sudut lereng, dan redistribusi sedimen sehingga kondisi kestabilan bersifat dinamis, bukan statis (Dean dan Dalrymple, 2002; Soulsby, 1997; Chen dkk., 2024).

Ukuran butiran merupakan salah satu variabel penting karena memengaruhi susunan butir, tingkat penguncian antarpartikel, porositas, dan respons sedimen terhadap getaran atau impuls gelombang. Pada material granular, perubahan gradasi dan diameter representatif dapat mengubah sudut runtuh, sudut repose, dan parameter kuat geser yang secara praktis dipakai sebagai indikator kemampuan lereng mempertahankan

bentuk geometrinya (Lambe dan Whitman, 1969; Budhu, 2011; Das dan Sobhan, 2018). Kajian terbaru juga menegaskan bahwa hubungan ukuran butir–kemiringan lereng tetap relevan pada sistem pantai dan sedimen dangkal, meskipun respons akhirnya dipengaruhi pula oleh gelombang, pasang surut, dan evolusi morfologi lereng (Arias dkk., 2025; Pan dkk., 2023; Yao dkk., 2025).

Berbagai acuan geoteknik telah menjelaskan hubungan antara sudut geser dalam, geometri lereng, dan faktor keamanan, namun kajian eksperimental yang secara langsung membandingkan beberapa kelas diameter sedimen pada lereng bawah air skala laboratorium masih relatif terbatas, terutama pada konfigurasi pengujian sederhana yang dirancang untuk mendekati kondisi pengerukan dangkal. Selain itu, pada praktik laboratorium, parameter sudut geser dalam sering diperkirakan melalui pendekatan sudut runtuh atau sudut lereng kritis ketika uji geser langsung tidak dilakukan secara khusus (ASTM, 2011; Bowles, 1996). Perkembangan studi terbaru tentang ketidakstabilan lereng bawah air juga menunjukkan bahwa kestabilan tidak hanya ditentukan oleh kuat geser material, tetapi oleh interaksi antara karakter butir, perubahan geometri, seepage, dan gangguan hidrodinamik selama pengujian (Alhaddad dkk., 2024; Wang dkk., 2024). Oleh karena itu, penelitian ini menggunakan sudut runtuh sebagai parameter sudut geser dalam semu untuk membandingkan respons sedimen D16, D50, dan D100.

Rumusan masalah penelitian ini adalah: (1) bagaimana hubungan antara diameter butiran sedimen dan parameter sudut geser dalam terhadap kestabilan lereng pengerukan; dan (2) bagaimana pengaruh variasi diameter butiran terhadap faktor keamanan lereng pengerukan. Tujuan penelitian adalah menganalisis kecenderungan perubahan sudut geser dalam semu dan faktor keamanan relatif berdasarkan data eksperimen laboratorium sehingga diperoleh interpretasi awal mengenai kelas diameter sedimen yang paling stabil untuk lereng bawah air di perairan dangkal. Kontribusi ilmiah penelitian ini terletak pada perbandingan langsung tiga kelas diameter representatif sedimen di bawah kondisi hidrodinamik yang sama, penggabungan parameter sudut runtuh dan perubahan geometri lereng dalam satu kerangka interpretasi kestabilan, serta penyediaan basis data eksperimen awal untuk evaluasi lereng pengerukan bawah air skala laboratorium.

2. METODOLOGI

Penelitian ini menggunakan data eksperimen laboratorium pada tiga kelompok sedimen yang diberi kode D16, D50, dan D100. Dalam konteks artikel ini, kode tersebut merujuk pada diameter karakteristik hasil distribusi ukuran butir, yaitu D16 sebagai diameter saat 16% material lebih halus, D50 sebagai diameter median, dan D100 sebagai diameter maksimum representatif pada sampel. Penggunaan tiga kode ini dipilih agar respons lereng dapat diamati pada fraksi halus, menengah, dan kasar di bawah skenario pengujian yang sama. Pengelompokan ukuran dan persiapan material mengacu pada prinsip analisis saringan dan pengendalian kerapatan relatif material granular (ASTM, 2017; ASTM, 2016a; ASTM, 2016b). Setiap kelompok sedimen diuji pada beberapa kombinasi kedalaman air dan lama pembebanan gelombang sehingga memungkinkan evaluasi pengaruh diameter butiran terhadap perubahan geometri lereng bawah air.

Data pada lembar rekap pengujian menunjukkan bahwa analisis sudut runtuh dilakukan pada kedalaman air 13 cm, 21 cm, dan 23 cm, dengan durasi pembebanan gelombang 5 menit, 10 menit, dan 15 menit. Kedalaman air tersebut dipilih untuk merepresentasikan perubahan tinggi kolom air di atas lereng, sedangkan durasi pembebanan dipilih untuk menangkap respons awal, menengah, dan lanjutan dari proses redistribusi sedimen akibat gelombang. Untuk setiap kombinasi tersebut tersedia pengulangan pengamatan, sehingga nilai yang digunakan pada artikel ini merupakan rerata dari data eksperimen. Parameter yang dicatat meliputi sudut runtuh, tinggi sedimen sesudah pengujian, posisi atau elevasi sedimen, serta beberapa pengukuran tambahan yang menggambarkan respons lereng terhadap gelombang. Data geometri lereng sebelum dan sesudah pengujian juga dianalisis dari lembar pengukuran laboratorium untuk memperoleh tinggi lereng dan proyeksi horizontal lereng.

Karena penelitian ini tidak menggunakan uji geser langsung terkontrol untuk memperoleh ϕ secara konvensional, maka sudut runtuh hasil percobaan diperlakukan sebagai parameter sudut geser dalam semu (ϕ_{app}). Pendekatan ini umum digunakan pada material granular untuk studi komparatif awal, selama interpretasinya dibatasi sebagai parameter empiris, bukan parameter desain akhir (ASTM, 2011; Budhu, 2011). Besaran sudut lereng geometrik (β) dihitung dari tinggi sedimen (H_s) dan proyeksi horizontal lereng (L_h) menggunakan Persamaan (1).

$$\beta = \text{ArcTan} \left(\frac{H_s}{L_h} \right) \quad (1)$$

dengan: β = sudut lereng geometrik ($^{\circ}$), H_s = tinggi sedimen (cm), dan L_h = proyeksi horizontal lereng (cm).

Untuk mengevaluasi pengaruh diameter butiran terhadap kestabilan lereng, digunakan faktor keamanan relatif (FSr) dengan pendekatan lereng tak berkoheksi, sebagaimana diperkenalkan dalam analisis lereng sederhana untuk material granular, sehingga perbandingan antarvariasi diameter dapat dilakukan secara konsisten (Abramson dkk., 2001; Duncan dkk., 2014). Dalam penelitian ini, FSr dihitung menggunakan Persamaan (2). Nilai FSr dimaksudkan sebagai indikator komparatif kestabilan relatif antarsampel, bukan sebagai nilai desain lereng permanen.

$$F_{Sr} = \tan \frac{\phi_{app}}{\tan \beta} \quad (2)$$

dengan: FSr = faktor keamanan relatif, ϕ_{app} = sudut geser dalam semu hasil eksperimen ($^{\circ}$), dan β = sudut lereng geometrik ($^{\circ}$).

Analisis data dilakukan melalui tiga tahap. Pertama, dihitung rerata sudut geser dalam semu untuk masing-masing kelas sedimen dari data sudut runtuh. Kedua, dihitung perubahan geometri lereng sesudah pengujian dari data tinggi sedimen dan proyeksi horizontal lereng. Ketiga, dihitung faktor keamanan relatif berdasarkan kombinasi sudut lereng geometrik dan parameter sudut geser dalam semu. Hasil kemudian dibahas secara komparatif untuk menjawab rumusan masalah penelitian. Dengan pendekatan ini, analisis tidak berhenti pada deskripsi angka, tetapi diarahkan untuk membaca mekanisme perubahan geometri dan kestabilan lereng antarkelas sedimen.

Tabel 1. Rerata parameter sudut geser dalam semu menurut kelas sedimen

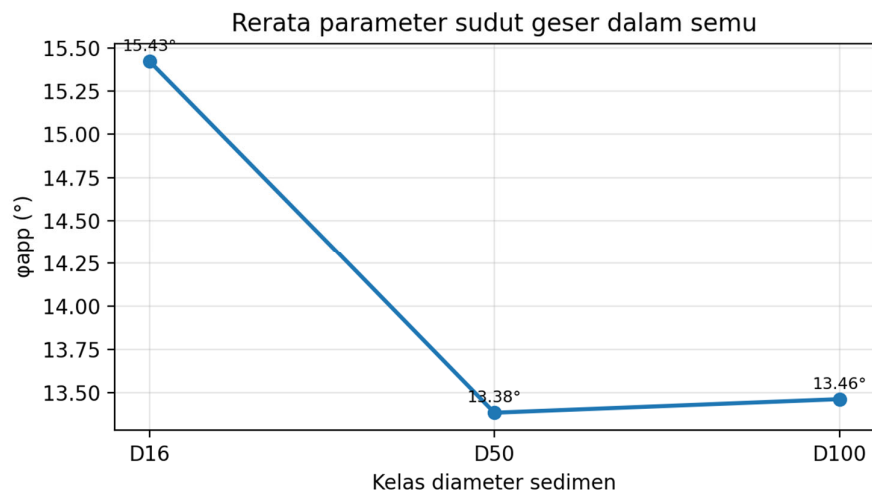
Kelas sedimen	Rerata ϕ_{app} ($^{\circ}$)	Rerata z (cm)	Rerata respons H (cm)
D16	15.43	14.49	3.62
D50	13.38	14.28	3.26
D100	13.46	14.90	3.29

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Hubungan kelas diameter sedimen dan parameter sudut geser dalam semu

Rekapitulasi hasil analisis sudut runtuh menunjukkan bahwa kelas sedimen D16 mempunyai rerata parameter sudut geser dalam semu tertinggi, yaitu 15.43° , sedangkan D50 dan D100 berturut-turut sebesar 13.38° dan 13.46° . Selisih D16 terhadap D50 sebesar 2.05° dan terhadap D100 sebesar 1.97° . Secara eksperimental, hal ini mengindikasikan bahwa fraksi yang direpresentasikan oleh D16 mampu mempertahankan kemiringan kritis lebih besar sebelum runtuh. Fenomena tersebut dapat dijelaskan oleh susunan butir yang lebih rapat dan peningkatan penguncian antarpartikel pada konfigurasi media uji, sehingga deformasi yang diperlukan untuk mencapai kondisi gagal menjadi lebih besar (Lambe dan Whitman, 1969; Das dan Sobhan, 2018; Yao dkk., 2025).

Pengaruh lama pembebanan gelombang juga tampak jelas. Pada D16, rerata ϕ_{app} turun dari 16.39° pada 5 menit menjadi 14.78° pada 15 menit atau turun sekitar 9.82%. Pada D50 penurunan terjadi dari 14.22° menjadi 12.62° atau 11.25%, sedangkan pada D100 dari 13.89° menjadi 13.00° atau 6.41%. Penurunan ini menunjukkan bahwa energi gelombang tidak hanya memicu relokasi butir di permukaan lereng, tetapi juga mengurangi keteraturan struktur lereng sehingga sudut kritis yang dapat dipertahankan menjadi lebih kecil. Dengan kata lain, semakin lama lereng menerima gangguan hidrodinamik, semakin besar peluang terjadi pelonggaran struktur, erosi lokal di kaki lereng, dan redistribusi material ke arah lereng bawah (Dean dan Dalrymple, 2002; Soulsby, 1997; Pan dkk., 2023).



Gambar 1. Hubungan kelas sedimen dengan rerata parameter sudut geser dalam semu. (hasil analisis)

Tabel 2. Rerata sudut geser dalam semu menurut durasi pembebanan gelombang

Kelas sedimen	5 menit (°)	10 menit (°)	15 menit (°)
D16	16.39	15.11	14.78
D50	14.22	13.22	12.62
D100	13.89	13.50	13.00

3.2. Pengaruh diameter sedimen terhadap faktor keamanan lereng

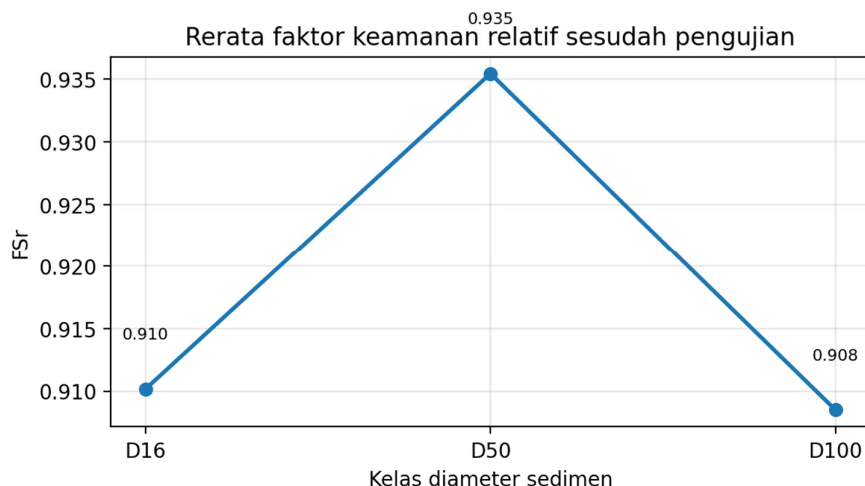
Walaupun D16 memperlihatkan ϕ_{app} tertinggi, faktor keamanan relatif sesudah pengujian tidak menunjukkan pola yang sepenuhnya linear terhadap kelas diameter. Hasil perhitungan dari data geometri lereng menunjukkan FSr rata-rata sesudah pengujian sebesar 0.935 untuk D50, 0.910 untuk D16, dan 0.908 untuk D100. Temuan ini penting karena menunjukkan bahwa kestabilan lereng bawah air tidak dapat dinilai hanya dari satu parameter kuat geser semu. D50 memiliki FSr tertinggi bukan karena ϕ_{app} paling besar, tetapi karena kombinasi antara sudut lereng akhir yang lebih landai ($\beta = 15.22^\circ$) dan sudut geser dalam semu yang masih cukup tinggi ($\phi_{app} = 14.11^\circ$), sehingga rasio kestabilan relatifnya menjadi paling menguntungkan.

Dari data geometri sebelum dan sesudah pengujian, tinggi sedimen rata-rata D50 turun dari 20.30 cm menjadi 15.23 cm, D100 dari 20.31 cm menjadi 15.91 cm, dan D16 dari 20.94 cm menjadi 15.50 cm. Penurunan tinggi ini menunjukkan bahwa pembebanan gelombang menyebabkan penataan ulang massa sedimen dan penurunan puncak lereng. Akan tetapi, respons geometri tersebut berbeda antar kelas sedimen. Pada D50, proses pelandaian tampak menghasilkan bentuk lereng akhir yang lebih stabil secara geometrik, sedangkan pada D16 kekuatan sudut runtuh relatif tinggi namun sudut lereng akhirnya masih cukup curam. Itulah sebabnya FSr D50 justru sedikit lebih tinggi daripada D16. Dengan demikian, fenomena yang terjadi dapat dibaca sebagai kompetisi antara dua mekanisme, yaitu ketahanan material terhadap runtuh dan kemampuan lereng menyesuaikan geometri ke bentuk yang lebih stabil (Abramson dkk., 2001; Bowles, 1996; Duncan dkk., 2014).

Secara umum, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa hubungan diameter butiran sedimen dengan parameter sudut geser dalam semu bersifat nyata, tetapi pengaruh diameter terhadap faktor keamanan relatif bersifat tidak langsung. Diameter yang lebih halus pada konfigurasi uji ini cenderung mempertahankan sudut runtuh lebih tinggi, sedangkan kestabilan akhir lereng lebih ditentukan oleh kombinasi sudut runtuh dan perubahan geometri sesudah pembebanan. Temuan ini memperkuat bahwa evaluasi lereng pengerukan bawah air harus membaca parameter material dan parameter morfologi secara bersamaan, bukan secara terpisah (Craig, 2004; Terzaghi dkk., 1996; Alhaddad dkk., 2024).

Tabel 3. Rekapitulasi geometri lereng dan faktor keamanan relatif sesudah pengujian

Kelas sedimen	Tinggi sedimen akhir (cm)	ϕ akhir (°)	β (°)	FSr
D16	15.50	15.78	17.34	0.910
D50	15.23	14.11	15.22	0.935
D100	15.91	13.89	15.42	0.908



Gambar 2. Hubungan kelas sedimen dengan rerata faktor keamanan relatif sesudah pengujian. (hasil analisis)

3.3. Implikasi kedalaman air, durasi pembebanan, dan kontribusi ilmiah

Jika ditinjau menurut kedalaman air, rerata parameter ϕ_{app} pada D16 relatif paling tinggi pada $h = 21$ cm, sedangkan pada D50 dan D100 kecenderungan nilai tertinggi muncul pada kondisi $h = 13$ cm atau 23 cm tergantung seri pengujian. Temuan ini memperlihatkan bahwa efek diameter tidak berdiri sendiri, melainkan berinteraksi dengan kedalaman air yang mengontrol tinggi kolom air di atas lereng, bentuk transformasi gelombang, dan intensitas redistribusi sedimen selama pembebanan. Pada kedalaman yang lebih kecil, energi gelombang lebih cepat ditransmisikan ke massa sedimen sehingga perubahan bentuk lereng dapat berlangsung lebih intensif. Sebaliknya, pada kedalaman yang lebih besar, sebagian energi dapat teredam, tetapi kestabilan akhir tetap ditentukan oleh susunan butiran dan respons geometri lereng. Hasil seperti ini sejalan dengan temuan bahwa gradien tekanan pori dan transformasi gelombang di sekitar bentukan pasir dangkal dapat mengubah kestabilan dasar secara cepat (Chen dkk., 2024).

Data ini juga menunjukkan bahwa penurunan kestabilan akibat pertambahan waktu pembebanan berlangsung konsisten pada semua variasi diameter. Dengan kata lain, durasi gangguan memiliki peran yang sebanding dengan ukuran butir dalam memicu perubahan lereng. Untuk kepentingan desain awal, hasil ini mengisyaratkan bahwa evaluasi lereng pengerukan bawah air perlu memasukkan dua pertimbangan utama, yaitu karakter material sedimen dan lama eksposur terhadap gangguan hidrodinamik. Pendekatan tersebut sekaligus menjadi kelebihan penelitian ini dibanding studi yang hanya berhenti pada pengamatan sudut runtuh, karena penelitian ini menunjukkan bahwa perubahan morfologi lereng sesudah pengujian berkontribusi langsung terhadap perbedaan faktor keamanan antarkelas sedimen (Wang dkk., 2024; Alhaddad dkk., 2024).

Tabel 4. Rerata parameter sudut geser dalam semu menurut kedalaman air

Kelas sedimen	$h = 13$ cm (°)	$h = 21$ cm (°)	$h = 23$ cm (°)
D16	15.00	15.89	15.39
D50	13.75	13.00	13.44
D100	14.06	13.44	12.89

Tabel 4 memperlihatkan bahwa kelas D16 tetap mempertahankan nilai ϕ_{app} yang relatif tinggi pada seluruh variasi kedalaman air, sedangkan D100 cenderung mengalami penurunan pada kedalaman yang lebih besar. Pola ini memperkuat interpretasi bahwa butiran dengan diameter representatif lebih kecil pada percobaan ini memberi kontribusi lebih baik terhadap kestabilan sudut runtuh, tetapi kestabilan geometrik akhirnya masih dipengaruhi oleh pelandaian lereng selama pengujian. Dengan demikian, data kedalaman air mendukung kesimpulan utama bahwa evaluasi stabilitas tidak cukup hanya berbasis satu parameter, melainkan perlu membaca interaksi antara kelas sedimen, waktu gangguan, dan evolusi bentuk lereng.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis data eksperimen, dapat disimpulkan bahwa diameter sedimen berpengaruh terhadap parameter sudut geser dalam semu lereng bawah air. Kelas D16 memberikan rerata ϕ_{app} tertinggi sebesar 15.43° , sedangkan D50 dan D100 masing-masing sebesar 13.38° dan 13.46° . Dengan demikian, pada konfigurasi percobaan ini kelas D16 menunjukkan resistensi runtuh paling baik.

Variasi diameter butiran juga memengaruhi faktor keamanan lereng pengerukan, tetapi pengaruhnya tidak sepenuhnya linear. Nilai FSr rata-rata sesudah pengujian tertinggi terjadi pada D50 sebesar 0.935, diikuti D16 sebesar 0.910 dan D100 sebesar 0.908. Hal ini menegaskan bahwa kestabilan lereng bawah air ditentukan oleh kombinasi antara sudut geser dalam semu dan perubahan geometri lereng selama pembebanan gelombang.

Kontribusi utama penelitian ini adalah menunjukkan bahwa evaluasi kestabilan lereng bawah air skala laboratorium menjadi lebih informatif ketika parameter sudut runtuh dibaca bersamaan dengan perubahan geometri lereng sesudah pembebanan. Dengan kerangka tersebut, kelas D16 dapat diinterpretasikan sebagai material dengan ketahanan runtuh tertinggi, sedangkan D50 menghasilkan konfigurasi geometri akhir yang relatif paling aman. Penelitian ini masih menggunakan parameter sudut runtuh sebagai proksi sudut geser dalam, sehingga pada penelitian berikutnya disarankan dilakukan kombinasi dengan uji geser langsung atau uji triaksial untuk memperoleh parameter kuat geser yang lebih representatif. Selain itu, variasi tinggi gelombang, kedalaman air, dan pengukuran tekanan air pori dapat ditambahkan agar model kestabilan lereng bawah air menjadi lebih komprehensif.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada laboratorium yang telah memfasilitasi pengujian model lereng sedimen bawah air dan penyusunan data penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Abramson, L.W., Lee, T.S., Sharma, S., dan Boyce, G.M., 2001, *Slope Stability and Stabilization Methods*, John Wiley & Sons, New York.
- Alhaddad, S., Keetels, G., Mastbergen, D., van Rhee, C., Lee, C.-H., dan Puig Montellà, E., 2024, Subaqueous dilative slope failure (breaching): Current understanding and future prospects, *Advances in Water Resources*, 192, 104708, doi: 10.1016/j.advwatres.2024.104708.
- Arias, A., Almar, R., Regard, V., Bergsma, E.W.J., Castelle, B., dan Garlan, T., 2025, Assessment of Beach Slope and Sediment Grain Size Anywhere in the World: Review of Existing Formulae, Integration of Tidal Influence, and Perspectives from Satellite Observations, *Journal of Marine Science and Engineering*, 13(1), 58, doi: 10.3390/jmse13010058.
- ASTM, 2011, ASTM D3080/D3080M-11 Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions, ASTM International, West Conshohocken.
- ASTM, 2016a, ASTM D4253-16 Standard Test Methods for Maximum Index Density and Unit Weight of Soils Using a Vibratory Table, ASTM International, West Conshohocken.
- ASTM, 2016b, ASTM D4254-16 Standard Test Methods for Minimum Index Density and Unit Weight of Soils and Calculation of Relative Density, ASTM International, West Conshohocken.
- ASTM, 2017, ASTM D6913/D6913M-17 Standard Test Methods for Particle-Size Distribution (Gradation) of Soils Using Sieve Analysis, ASTM International, West Conshohocken.
- Bowles, J.E., 1996, *Foundation Analysis and Design*, Ed.5, McGraw-Hill, New York.
- Budhu, M., 2011, *Soil Mechanics and Foundations*, Ed.3, John Wiley & Sons, Hoboken.
- Chen, M., Zheng, J., Tong, L., Zhang, J., Luo, M., dan Chen, N., 2024, Experimental Study of Wave-Induced Pore Pressure Gradients around a Sandbar and Their Effects on Seabed Instability, *Journal of Marine Science and Engineering*, 12(9), 1630, doi: 10.3390/jmse12091630.
- Craig, R.F., 2004, *Craig's Soil Mechanics*, Ed.7, Spon Press, London.
- Das, B.M., dan Sobhan, K., 2018, *Principles of Geotechnical Engineering*, Ed.9, Cengage Learning, Boston.
- Dean, R.G., dan Dalrymple, R.A., 2002, *Coastal Processes with Engineering Applications*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Duncan, J.M., Wright, S.G., dan Brandon, T.L., 2014, *Soil Strength and Slope Stability*, Ed.2, John Wiley & Sons, Hoboken.
- Lambe, T.W., dan Whitman, R.V., 1969, *Soil Mechanics*, John Wiley & Sons, New York.
- Pan, Y., Qu, X.K., Yang, Y.B., Zhang, J.B., Wang, G., Yin, S., dan Chen, Y.P., 2023, Laboratory experiments on the evolution of a submerged berm driven by low-energy irregular waves, *Coastal Engineering*, 182, 104301, doi: 10.1016/j.coastaleng.2023.104301.
- Soulsby, R., 1997, *Dynamics of Marine Sands: A Manual for Practical Applications*, Thomas Telford, London.
- Terzaghi, K., Peck, R.B., dan Mesri, G., 1996, *Soil Mechanics in Engineering Practice*, Ed.3, John Wiley & Sons, New York.

- Wang, Z., Zheng, D., Gu, Z., Guo, X., dan Nian, T., 2024, A Methodology to Evaluate the Real-Time Stability of Submarine Slopes under Rapid Sedimentation, *Journal of Marine Science and Engineering*, 12(5), 823, doi: 10.3390/jmse12050823.
- Yao, Z., Chen, J., Jiang, C., Wu, Z., Deng, B., Long, Y., Zou, H., Zhang, J., dan Bai, R., 2025, Experimental Study of the Angle of Repose of Coral Sands, *Journal of Marine Science and Engineering*, 13(12), 2410, doi: 10.3390/jmse13122410.