

GERUSAN LOKAL DI KAKI STRUKTUR IMPERMEABLE BERDINDING MIRING

Dalrino¹⁾ dan Karuniadi Satrijo Utomo²⁾

¹⁾ Jurusan Teknik Sipil, Politeknik Universitas Andalas

Kampus Unand, Limau Manis, Padang, email: dalrino74@yahoo.co.id

²⁾ Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Semarang (UNNES)

Kampus Unnes Gd E4, Sekaran, Gunungpati, Semarang 50229, email: utomo.unnes@gmail.com

Abstract: Toe scour was one of phenomenon that frequently experienced by coastal structures and realized as the causative factor to structure failure. When a coastal structure was placed at coastal environment, existence of that structure would rapidly affect to the flow pattern around its area, one of them was breaking wave position. When breaking wave happened, energy dissipation caused by breaking process would be compensated in the form of vortex and improvement of flow intensity that have ability to move bed material from its original rest position around the toe. This research was focused on the breaking wave condition that produce local scouring at toe of impermeable sloping wall structure. Testing variable consists of wave height (H), wave period (T), water depth at toe (ds), beach slope ($\tan \beta$), and angle of structure (α). Physical Modeling was conducted at wave flume with 40 m length, 0.6 m width and 1.1 m height in Balai Hidraulika and Geoteknik Keairan (BHGK) PUSAIR, Bandung. Riset result shows that improvement of toe scour was affected by breaking wave characteristics and their interaction with the structure. Improvement of depth of scour was in relation with water depth at toe, height of wave breaking, surf similarity parameter, bed agitation caused by breaking process, and downrush flow velocity.

Keywords: local scouring, toe structure, breaking wave, impermeable, sloping wall

Abstrak: Gerusan kaki merupakan fenomena yang sering dialami oleh struktur-struktur bangunan pantai dan disadari sebagai faktor penyebab kegagalan struktur. Saat struktur ditempatkan di lingkungan pantai, keberadaan struktur tersebut akan segera mempengaruhi pola aliran sekitarnya, salah satunya adalah posisi gelombang pecah. Saat terjadi gelombang pecah, disipasi energi akibat proses pecahnya gelombang akan terkompensasi dalam bentuk vortex dan peningkatan intensitas aliran yang memiliki kemampuan untuk memindahkan material dasar dari posisi awalnya di kaki struktur. Penelitian ini difokuskan pada kondisi gelombang pecah yang menghasilkan gerusan lokal di kaki pada struktur impermeable berdinding miring. Variabel pengujian terdiri atas tinggi gelombang (H), periode gelombang (T), kedalaman air di kaki struktur (ds), kemiringan pantai ($\tan \beta$), dan sudut kemiringan struktur (α). Pemodelan fisik dilakukan pada saluran gelombang dengan panjang 40 m, lebar 0,6 m dan tinggi 1,1 m di Balai Hidraulika dan Geoteknik Keairan (BHGK) PUSAIR, Bandung. Hasil penelitian memperlihatkan terjadinya peningkatan gerusan kaki sebagai akibat dari karakter gelombang pecah dan interaksinya terhadap struktur. Peningkatan kedalaman gerusan sebagai hubungan dari kedalaman air di kaki struktur, tinggi gelombang pecah, parameter *surf similarity*, gangguan terhadap dasar di kaki struktur akibat proses pecah gelombang, dan kecepatan aliran *downrush*.

Kata kunci: gerusan lokal, kaki struktur, gelombang pecah, impermeable, dinding miring

PENDAHULUAN

Gerusan lokal di kaki struktur (*toe scour*) merupakan salah satu fenomena yang banyak dialami oleh struktur bangunan pantai yang terkena serangan gelombang, arus atau pun kombinasi keduanya. Hal ini telah disadari sebagai salah satu faktor penyebab terjadinya kegagalan pada struktur bangunan pantai.

Proses gerusan lokal disebabkan oleh adanya peningkatan kapasitas transpor massa

material dasar yang meninggalkan lokasi awalnya di sekitar kaki struktur. Hal itu akibat pengaruh peningkatan intensitas aliran di sekitar kaki struktur tersebut. Dengan mempertimbangkan aksi gelombang sebagai faktor penyebab, mekanisme dan proses gerusan dapat dibedakan atas gerusan akibat gelombang tidak pecah (*non-breaking wave*) dan gerusan oleh akibat gelombang pecah (*breaking wave*).

Saat gelombang pecah terjadi di sekitar kaki struktur, disipasi energi akibat proses pecahnya gelombang terkompensasi dalam bentuk peningkatan intensitas aliran yang memiliki kemampuan untuk menggerakkan materil dasar dari posisi diamnya di sekitar kaki struktur. Peningkatan intensitas aliran yang terjadi dan interaksi antara gelombang pecah dengan struktur akan mempengaruhi pola transpor dan gerusan di kaki struktur.

Peregrine (1983) dalam Fredsøe dan Deigaard (1992) menyatakan bahwa *vortex* yang muncul setelah terjadinya gelombang pecah mengakibatkan gangguan pada material di dasar dan terjadinya lubang gerusan. Berdasar penelitian atas mekanisme pecahnya gelombang tipe *plunging* yang memicu gerusan, Shibayama et al (1986) menyatakan pula terjadinya lubang gerusan disebabkan oleh adanya *vortex* yang terbentuk setelah gelombang pecah dan mekanisme transpor oleh aliran terjadi baik *onshore* dan *offshore*. Namun penelitian itu masih difokuskan pada perubahan profil pantai di daerah *surfzone* tanpa meninjau permasalahan gerusan lokal apabila terdapat struktur bangunan di pantai.

Gerusan kaki pada struktur *vertical seawall* yang ditempatkan pada daerah antara posisi gelombang pecah dan garis pantai telah diteliti oleh beberapa peneliti, di antaranya: Herbich dan Ko (1968), Sato, Tanaka, dan Irie (1968), Song dan Schiller (1973), Jones (1975), Fowler (1992), Powell dan Lowe (1994), dan McDougal et al (1996). Hasil-hasil penelitian itu memperlihatkan terjadinya peningkatan kedalaman gerusan dengan peningkatan jarak relatif struktur terhadap lokasi gelombang pecah.

Metode yang lazim digunakan dalam mempelajari gerusan kaki pada struktur ber dinding tegak (*vertical wall structure*) di daerah gelombang pecah adalah dengan melakukan pengujian tanpa adanya struktur untuk mendapatkan posisi gelombang pecah, dan kemudian meletakkan struktur dengan posisi relatif terhadap posisi gelombang pecah tersebut untuk mendapatkan kondisi gerusan yang terjadi. (Shore Protection Manual, 1984; Horikawa, 1988). Cara tersebut sesungguhnya belum menggambarkan secara tepat hasil gerusan yang diakibatkan oleh gelombang pecah saat simulasi. Saat struktur bangunan ditempatkan pada lingkungan pantai, keberadaan struktur tersebut segera akan mengubah pola aliran yang terjadi di sekitarnya, salah satunya adalah terjadinya pergeseran posisi pecah gelombang dari posisi aslinya saat tanpa keberadaan struktur. Dengan demikian, faktor posisi gelombang pecah terhadap struktur saat simulasi merupakan parameter yang dapat mempengaruhi kondisi gerusan kaki yang terjadi, namun tidak terdapat data mengenai hal itu (Sumer dan Fredsøe, 2002).

Permasalahan gerusan kaki pada struktur ber dinding miring (*sloping wall structure*) dan *impermeable* oleh kondisi gelombang pecah di sekitar kaki struktur belum mendapatkan perhatian yang sama seperti halnya kasus struktur ber dinding tegak. Dalam konteks ini, belum terdapat metode yang diterima secara umum untuk memprediksi besar gerusan yang terjadi. Dengan asumsi logis bahwa kondisi gerusan ekstrim terjadi pada struktur yang vertikal dan *impermeable*, metode yang biasa digunakan untuk memprediksi gerusan pada kasus *sloping wall structure* adalah menggunakan persamaan prediksi yang

diberikan untuk kasus-kasus *vertical wall*. (Shore Protection Manual, 1984, Sumer dan Fredsøe 2002, dan Coastal Engineering Manual, 2006).

Pada kasus *sloping wall structure*, posisi pecah gelombang dimungkinkan lebih dekat terhadap kaki struktur dibandingkan dengan pada *vertical wall structure*. Proses interaksi gelombang pecah terhadap *sloping wall structure* dimungkinkan berbeda dengan yang terjadi pada *vertical wall structure*. Hal ini tentunya akan mempengaruhi mekanisme gerusan kaki yang terjadi.

TINJAUAN PUSTAKA

Karakter Gelombang Pecah

Gelombang dari laut dalam merambat menuju pantai yang dangkal akan mengalami transformasi dengan meningkatnya kecuraman gelombang. Saat kecepatan rambat gelombang telah melampaui kecepatan partikel air di puncak gelombang, gelombang tersebut akan pecah.

Pengklasifikasian gelombang pecah masih merupakan sesuatu yang subjektif (Horikawa, 1988). Namun secara umum disepakati terdapat tiga jenis gelombang pecah, yaitu *spilling*, *plunging*, dan *surgings*. Parameter yang digunakan untuk menentukan karakter pecahnya gelombang dikenal sebagai parameter *surf similarity* (ξ_0), yang merupakan rasio kecuraman pantai terhadap kecuraman gelombang dan dituliskan:

$$\xi_0 = \tan \beta / \sqrt{H_0 / L_0} \dots\dots\dots (1)$$

dengan $\tan \beta$: kecuraman pantai, H_0 : tinggi gelombang laut dalam, dan L_0 : panjang gelombang laut dalam. Secara teoritis, gelombang pecah tipe *spilling* terjadi pada $\xi_0 <$

0,5; *plunging* pada $0,5 < \xi_0 < 3,3$; dan *surgings* saat $\xi_0 > 3,3$. (Galvin, 1968). Berdasarkan bentuk pecahnya, *plunging* merupakan tipe pecah yang paling berpotensi untuk menghasilkan gerusan dasar.

Kriteria Pecah dan Tinggi Gelombang Pecah Teoritis

Batasan yang menyatakan terjadinya gelombang pecah secara teoritis dapat didekati dengan mengaplikasikan konsep kekekalan flux energi (Izumiya dan Horikawa, 1983). Hal ini diartikan sebuah gelombang akan mengalami proses pecah jika energi gelombang tersebut telah melampaui batasan nilai energi untuk membuat gelombang tersebut pecah ($E > E_B$), dituliskan:

$$\frac{E_B}{\rho \cdot g h^2} = \frac{1}{1 + a(H_B / h)} \cdot \frac{H_B}{h^2} U_{sB}^{-1/2} \dots\dots\dots (2)$$

$$\left\{ 1 - \frac{2}{1 + a(H_B / h)} U_{sB}^{-1/2} \right\}$$

dengan $U_{sB} = \frac{g H_B T^2}{h^2}$: parameter *Ursell* pada kondisi gelombang laut dangkal, dan a : konstanta empiris ($a = 0,33$).

Beberapa peneliti telah memberikan persamaan pendekatan untuk memprediksi hubungan tinggi gelombang pecah dan kedalaman pecah sebagai berikut.

Miche (1951) dan Hamada (1951), secara terpisah menurunkan satu persamaan untuk memprediksi tinggi dan kedalaman gelombang pecah berdasarkan analisis teoritis:

$$\frac{H_B}{L_B} = 0,142 \tanh \left(2\pi \frac{h_B}{L_B} \right) \dots\dots\dots (3)$$

dengan H_B : tinggi gelombang pecah, L_B : panjang gelombang di lokasi pecah, dan h_B : kedalaman air dil okasi pecah. Persamaan Miche dan Hamada ini belum memasukkan

faktor kemiringan pantai sebagai variabel yang menentukan ketinggian pecah gelombang.

Goda (1975) memberikan persamaan berdasarkan variabel kedalaman gelombang pecah, panjang gelombang laut dalam dan kemiringan pantai sebagai berikut:

$$\frac{H_B}{L_o} = A \left[1 - \exp \left\{ - \frac{1,5 \pi h_B}{L_o [1 + 15 \tan^{4/3} \beta]} \right\} \right] \quad (4)$$

dengan $\tan \beta$: kemiringan pantai, A: konstanta empiris ($A = 0,17$), dan L_o panjang gelombang laut dalam ($L_o = 1,56.T^2$). Ostendorf dan Madsen (1979) juga mengembangkan sebuah persamaan dengan memasukkan faktor kemiringan pantai sebagai berikut:

Untuk $\tan \beta < 0,1$

$$\frac{H_B}{L_o} = 0,14 \tanh \left\{ (0,8 + 5 \tan \beta) 2\pi \left(\frac{H_B}{L_B} \right) \right\} \text{ dan}$$

Untuk $\tan \beta > 0,1$

$$H_B / L_B = 0,14 \tanh \{ (1,3) 2\pi \cdot h_B / L_B \} \quad (5)$$

Sunamura (1983) mengusulkan bentuk persamaan empiris lebih sederhana dari dari percobaan laboratorium:

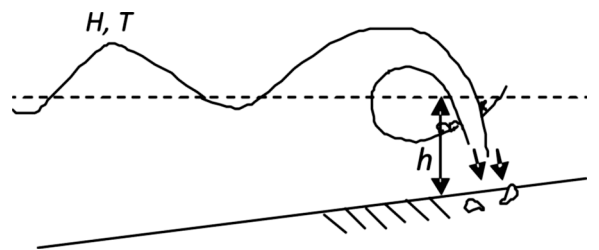
$$\frac{H_B}{h_B} = 1,09 (\tan \beta)^{0,19} \left(\frac{h_B}{L_o} \right)^{-0,1} \dots\dots\dots (6)$$

Gangguan Dasar Akibat Gelombang Pecah

Gangguan dasar yang disebabkan oleh gelombang pecah dapat dianalogikan dengan kasus pada *submerged vertical jet* (Breusers dan Raudkivi, 1991) yang dipengaruhi oleh: (1) kecepatan aliran jet yang dibangkitkan oleh *breaker* (pada titik di mana aliran jet memasuki *main body* aliran), (2) ukuran jet pada titik di mana aliran jet memasuki *main body* aliran, dan (3) kedalaman aliran.

Fredsøe dan Sumer (1997) mengenalkan parameter *plunger* berdasarkan variabel tinggi

dan periode gelombang (H dan T), kedalaman air (h), dan percepatan gravitasi (g), $T \sqrt{gH} / h$. Nilai $T \sqrt{gH}$ mempresentasikan jumlah air di lokasi "*plunging breaker*" yang memasuki "*main body*" aliran dan denominator h merepresentasikan jarak penetrasi *water jet* menuju dasar (Fredsoe dan Sumer, 1997). Besarnya gangguan dasar akibat proses pecah gelombang berpotensi menghasilkan lubang gerusan. Skema gangguan dasar tersebut divisualisasikan pada Gambar 1.



Gambar 1. Skema Gangguan terhadap Dasar Akibat Gelombang Pecah *Plunging*

Medan Aliran di Kaki Struktur Akibat *Downrush Flow*

Saat gelombang datang menuju struktur bangunan pantai, gelombang berkemungkinan pecah baik di depan atau pun di permukaan dinding struktur. Hal ini menghasilkan berbagai variasi karakteristik aliran saat massa aliran kembali (*downrush flow*) menuruni lereng sepanjang dinding struktur. Sesekali aliran *downrush* dapat mencapai kaki struktur dan berpotensi menghasilkan gaya gerusan maksimum di dasar.

Tsai C.P. et al, (1998) mempelajari medan aliran akibat gelombang pecah di kaki struktur *impermeable sloping wall* pada dasar yang *rigid*. Hasilnya mendapatkan terjadinya peningkatan tekanan pada dasar di daerah kaki struktur oleh proses dan kecepatan aliran *downrush flow* dan diindikasikan berpotensi mengakibatkan terjadinya gerusan kaki. Efek gangguan terhadap dasar di kaki struktur akibat

downrush flow dipengaruhi oleh tinggi gelombang laut dalam (H_0), periode gelombang (T), kedalaman air di kaki struktur (ds), dan kemiringan struktur (S). Kriteria terjadinya efek tersebut dinyatakan dalam persamaan:

$$\frac{H_0}{gT^2} \geq 1,452 \left(\frac{ds}{gT^2} \right)^{1,257} S^{0,571} \quad (7)$$

Muller, G. (2007) mendapatkan terjadinya *impact breaker* di kaki struktur *impermeable sloping wall* pada kasus gelombang tidak pecah (*non-breaking wave*). Hasil penelitian memperlihatkan terjadinya *impact breaker* diakibatkan oleh interaksi antara aliran *downrush* saat menuruni lereng struktur dan massa aliran di kaki struktur. Pengamatan visual memperlihatkan posisi *impact breaker* terhadap dasar di kaki struktur berpotensi menciptakan gerusan kaki.

METODE PENELITIAN

Penelitian kali ini difokuskan pada kondisi simulasi di mana gelombang pecah terjadi di sekitar kaki *sloping wall structure*. Variabel pengujian terdiri atas tinggi dan periode gelombang (H dan T), kedalaman air di kaki struktur (ds), kemiringan dasar pantai ($\tan \beta$), dan kemiringan dinding struktur (α).

Pengujian dilakukan mamakai saluran gelombang (*wave flume*) di laboratorium PUSAIR Bandung. Saluran gelombang terbuat dari kaca setebal 1,5 cm dan memiliki panjang 40 m, lebar 0,6 m dan tinggi saluran 1,1 m. Pada ujung saluran terdapat pembangkit gelombang (*wave generator*) tipe piston dengan motor penggerak bertenaga listrik yang sesuai untuk laut dangkal (pantai). Pengaturan tinggi gelombang ditentukan dengan mengatur panjang bentang gerak piston. Pengaturan

frekuensi dilakukan dengan mengatur posisi jarum pengatur yang terdapat pada rangkaian unit mesin pembangkit. Periode gelombang yang dapat dibangkitkan berkisar antara 1 – 3 detik dengan tinggi gelombang antara 0,07 – 0,30 meter pada kedalaman air berkisar 0,25 – 0,7 meter.

Alat ukur gelombang yang digunakan berupa *Ultrasonic Distance Sensor*. Prinsip pengukurannya berdasarkan kepada jarak yang didapatkan dari fluktuasi muka air yang terjadi dalam interval waktu tertentu. Proses perekaman data dilakukan dengan bantuan software Winspan108.

Untuk mencegah terjadinya kondisi gelombang tidak pecah (*non-breaking*) atau pun lokasi pecah yang terlalu jauh dari struktur (*broken wave*), pengujian awal dilakukan pada kondisi dasar yang *rigid* untuk mendapatkan kondisi gelombang pecah yang diinginkan. Dari hasil pengujian awal didapatkan posisi *setting* alat (panjang lengan *paddle* dan posisi jarum frekuensi) paling sesuai digunakan pada kemiringan dasar dan kedalaman air yang telah ditetapkan untuk mendapatkan kondisi gelombang pecah tersebut. Karakter gelombang pengujian kemudian diukur berdasarkan posisi *setting* alat tersebut.

Untuk mendapatkan kondisi tinggi gelombang *real*, pengukuran dilakukan tanpa adanya model dengan memberikan peredam di ujung saluran (Sumer dan Fredsøe, 2000). Untuk menghilangkan pengaruh refleksi dari struktur peredam itu sendiri maka diterapkan metode pemisahan gelombang menggunakan analisis refleksi gelombang reguler. Hal ini membutuhkan suatu simpul data tinggi gelombang maksimum dan minimum yang didapat dengan menggerakkan alat ukur secara

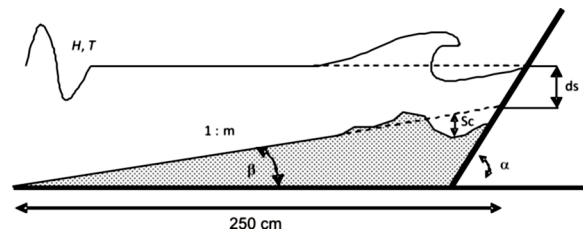
perlahan searah penjalaran gelombang (*slowly moving carriage technique*) (Horikawa, 1988, Dean dan Dalrymple, 1991).

Periode gelombang dihitung memakai metode *zero upcrossing* (Goda, 1980). Data gelombang yang diperlukan berupa *time-series* yang menggambarkan hubungan antara elevasi permukaan dan waktu. Hasilnya kemudian dibandingkan dengan hasil yang diperoleh memakai metode *Fast Fourier Transform* (FFT).

Model struktur *impermeable sloping wall* yang digunakan dalam simulasi terbuat dari kayu lapis 18 mm dengan rangka besi dan ditempatkan dalam saluran gelombang. Untuk mencegah terjadinya pergeseran akibat hantaman gelombang, dudukan rangka besi diberi baut yang ditanamkan pada lapisan mortar di atas dasar saluran gelombang. Pantai pasir dengan kemiringan dasar yang ditentukan kemudian dibentuk didepan model struktur. Diameter rata-rata butiran pasir yang digunakan adalah $d_{50} = 0,2$ mm. Kecepatan jatuh partikel sedimen (w) diprediksi berdasarkan hubungan diameter butiran pada suhu air 20°C dari tabel yang diberikan oleh Fredsoe (Fredsoe dan Deigaard, 1992) dan didapatkan pada kisaran $w = 2,6$ cm/detik. Model struktur diletakkan pada jarak 25 m dari *wave generator*. Posisi ini telah memenuhi syarat 5 kali panjang gelombang seperti yang disarankan oleh Sumer et al (2005). Simulasi model dilakukan dengan memberikan variasi tinggi gelombang (H), periode gelombang (T) dan kedalaman air di kaki struktur (d_s). Variasi kemiringan pantai ditetapkan 1/m dengan m adalah 20, 10 dan 5. Variasi kemiringan struktur digunakan 1 : 1,5 dan 1 : 1.

Untuk memastikan kondisi dasar akhir yang *equilibrium*, dilakukan monitoring dalam

selang waktu 15 menit pada suatu pias tinjauan yang diposisikan dekat kaki struktur. Setelah kondisi dasar *equilibrium* tercapai, mesin dihentikan dan saluran dikeringkan. Selanjutnya dilakukan pengukuran terhadap profil dasar. Pengukuran kedalaman gerusan dilakukan memakai *point gauge* yang ditempatkan ditengah-tengah saluran searah memanjang saluran dengan interval jarak yang ditetapkan. Skema pengujian ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Skema Pengujian Gerusan Kaki

HASIL DAN PEMBAHASAN

Modus Transport Sedimen

Xie (1981) menetapkan kriteria untuk modus transport sedimen yang terjadi oleh pengaruh kecepatan jatuh partikel sedimen (w) pada lingkungan yang didominasi gelombang. Kriteria tersebut telah banyak dipakai para peneliti lainnya (Sumer dan Fredsøe, 2000, Sutherland et al, 2006, Tsai C.P. et al, 2009) dan dituliskan dalam persamaan berikut.

$$\frac{\hat{U}_{\delta} - \hat{U}_{\delta,cr}}{w} \geq Const \quad (8)$$

dengan $Const \geq 16,5$ untuk modus transport *Fine sand* dan $Const < 16,5$ untuk *Coarse sand*. \hat{U}_{δ} : kecepatan orbital partikel aliran di sisi lapis batas gelombang, $\hat{U}_{\delta,cr}$: kecepatan kritik orbital partikel aliran untuk awal gerak traspor sedimen. $\hat{U}_{\delta,cr}$ diberikan oleh Komar dan Miller (1975) (dalam van Rijn, 1993) yang dituliskan:

$$\frac{(\hat{U}_{\delta,cr})^2}{(s-1)g.d_{50}} = 0,21 \frac{(2\hat{A}_{\delta,cr})^{0,5}}{d_{50}} \quad (9)$$

dengan menerapkan persamaan Xie (1981), didapatkan kondisi gerusan pengujian kali ini berada pada *Coarse sand transport mode*.

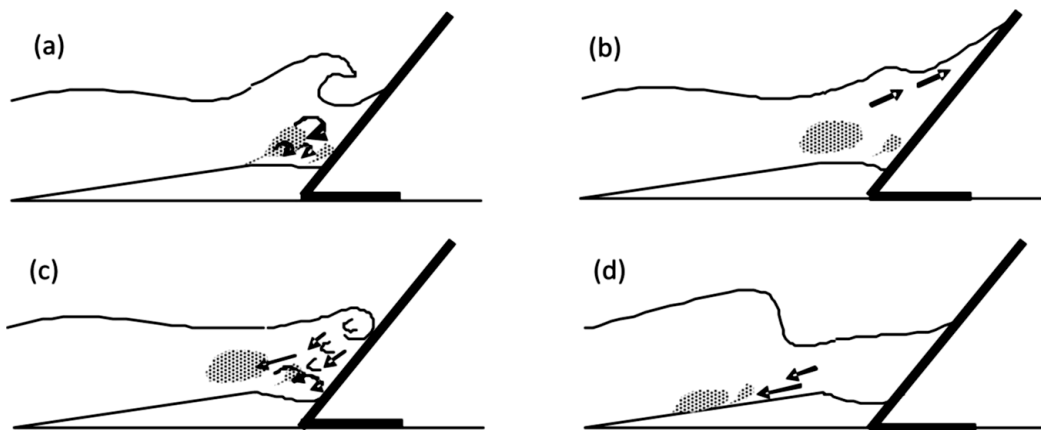
Mekanisme Proses Gerusan Kaki

Gambaran umum mekanisme gerusan kaki dapat diuraikan sebagai berikut, cermati Gambar 3.

- (a) Saat proses gelombang pecah, terjadi pengangkatan partikel sedimen dasar di sekitar lokasi pecah gelombang yang disebabkan oleh gangguan terhadap dasar akibat proses pecahnya gelombang.
- (b) Akibat keberadaan struktur di depannya dan dengan sisa energi setelah gelombang pecah

terjadi *uprush flow* berupa naiknya massa aliran ke lereng struktur.

- (c) Saat aliran *uprush* telah mencapai kondisi maksimal yang dapat dicapainya di lereng struktur tersebut, kemudian aliran berbalik (*downrush flow*) menuju arah kaki struktur dengan kecepatan tertentu. Kecepatan aliran dan besarnya masa aliran *downrush flow* yang menjangkau kaki struktur memberikan tekanan pada dasar yang terindikasi memberikan pengaruh terhadap kondisi gerusan kaki.
- (d) Aliran kembali ke arah *offshore* dengan membawa partikel sedimen yang kemudian mengendap pada lokasi tertentu dari kaki struktur.



Gambar 3. Mekanisme Gerusan Kaki Akibat Proses Gelombang Pecah pada Struktur *Impermeable Sloping Wall* (Hasil Pengamatan)

Kedalaman Gerusan Kaki Relatif

Hasil pengujian memperlihatkan hubungan antara kedalaman gerusan kaki relatif (Sc/H) terhadap kedalaman air di kaki relatif (ds/L) diperlihatkan pada Gambar 4. Hasil pengujian mendapatkan peningkatan kedalaman gerusan kaki relatif (Sc/H) terhadap peningkatan panjang gelombang atau penurunan kedalaman air di kaki (ds/L).

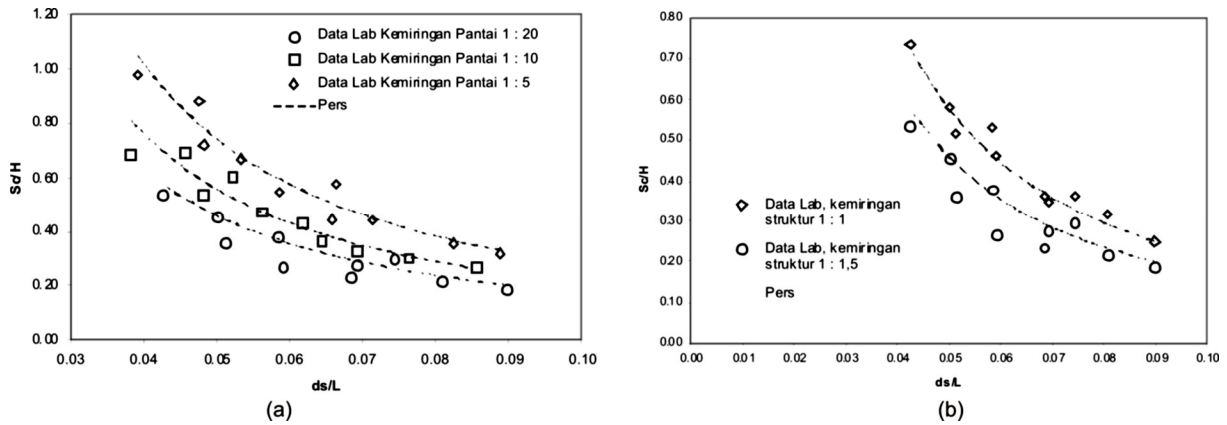
Bentuk persamaan yang didapat berdasarkan hasil *fitting* terhadap hasil pegujian adalah sebagai berikut:

$$\frac{Sc}{H} = \frac{P \cdot \exp(0,02 \cdot \alpha)}{(\sinh(k \cdot ds))^{1,35}} \dots\dots\dots (10)$$

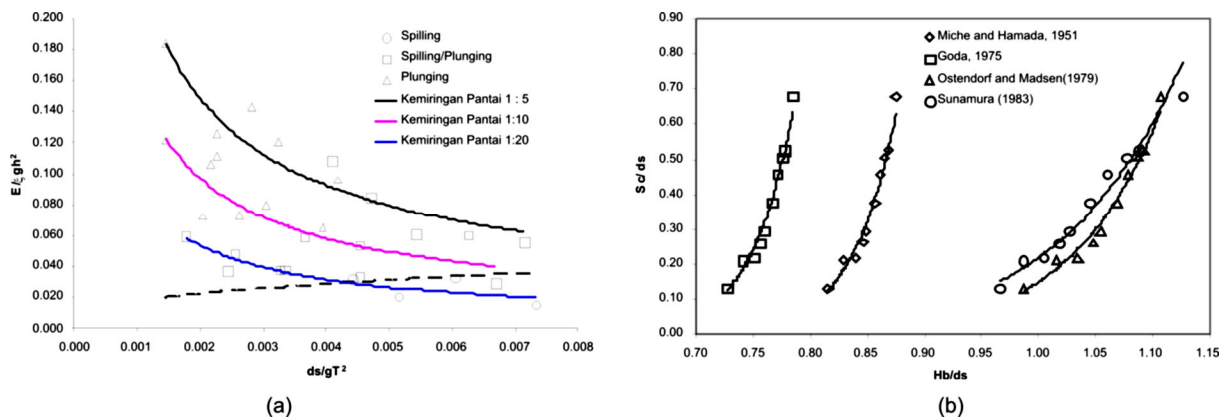
dengan Sc : kedalaman gerusan kaki, H : tinggi gelombang, P : fungsi kemiringan pantai, α : sudut kemiringan struktur, k : angka gelombang ($= 2 \cdot \pi / L$), dan ds : kedalaman air di kaki struktur.

Nilai koefisien P sebagai fungsi kemiringan pantai ($\tan \beta$) didapatkan dari hasil regresi sebagai berikut :

$$P = 0,21 \cdot (\tan \beta) + 0,04 \dots\dots\dots (11)$$



Gambar 4. Kedalaman Gerusan Kaki Relatif Hasil Pengujian
 (a) Variasi Sudut Kemiringan Pantai, 1 : m (m = 20, 10, 5)
 (b) Variasi Sudut Kemiringan Struktur $\alpha = 33,69^\circ$ (1 : 1,5) dan $\alpha = 45^\circ$ (1 : 1)
 pada Kemiringan Pantai (1:20)



Gambar 5. Plot Kedalaman Gerusan Kaki Relatif terhadap:
 (a) Kriteria Pecah Teoritis Izumiya dan Horikawa (1983)
 (b) Tinggi Gelombang Pecah Teoritis

Gambar 5(a) memperlihatkan hubungan antara kriteria pecah teoritis Izumiya and Horikawa (1983) terhadap peningkatan kedalaman gerusan kaki dan tipe pecah gelombang hasil pengamatan. Persamaan teoritis tersebut berlaku pada kondisi alami tanpa adanya struktur. Kurva dengan garis terputus merupakan nilai kriteria batasan pecah gelombang teoritis. Domain pada sisi bagian bawah dari kurva merupakan kondisi di mana gelombang tidak pecah. Namun dari hasil pengujian didapatkan adanya gelombang pecah pada domain tersebut, yang secara visual berupa gelombang pecah tipe *spilling*. Jadi, dengan keberadaan struktur sangat dimungkinkan terjadinya pergeseran dari

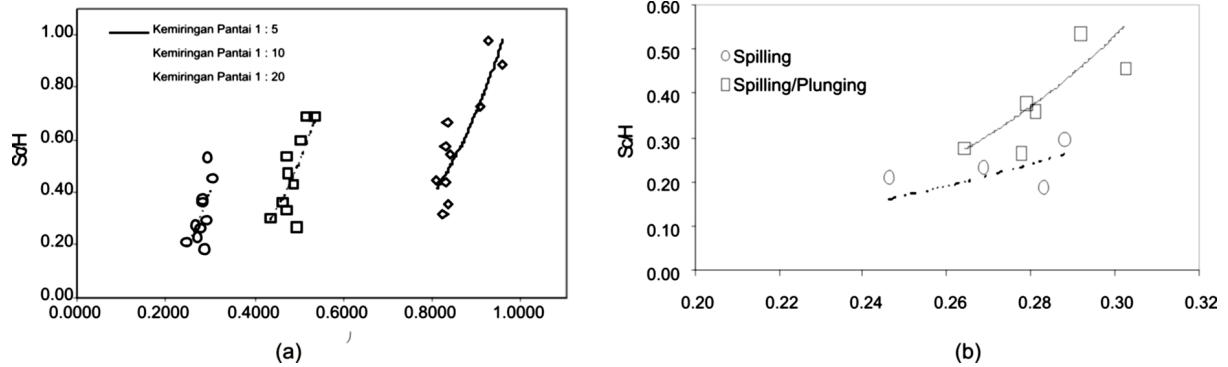
besar yang dihasilkan oleh persamaan tersebut. Hal demikian pernah pula diindikasikan oleh Tsai (2009) bahwa massa air di kaki struktur yang terjadi saat aliran *downrush* dapat menciptakan gelombang pecah tipe *spilling* (Tsai, C.P., 2009).

Gambar 5(b) memperlihatkan ketinggian gelombang pecah teoritis terhadap peningkatan gerusan kaki. Dapat dipahami, makin besar disipasi energi saat gelombang pecah makin berpotensi mengakibatkan terjadinya peningkatan gerusan kaki.

Gambar 6(a) memperlihatkan pengaruh *surf similarity* terhadap peningkatan gerusan kaki relatif. Peningkatat *surf similarity* tampak meningkatkan gerusan kaki relatif. Dengan nilai

surf similarity makin meningkat, karakter pecah gelombang cenderung makin mendekati bentuk pecah *plunging*. Bentuk pecah *plunging* merupakan tipe pecah gelombang paling berpotensi meningkatkan gerusan kaki relatif.

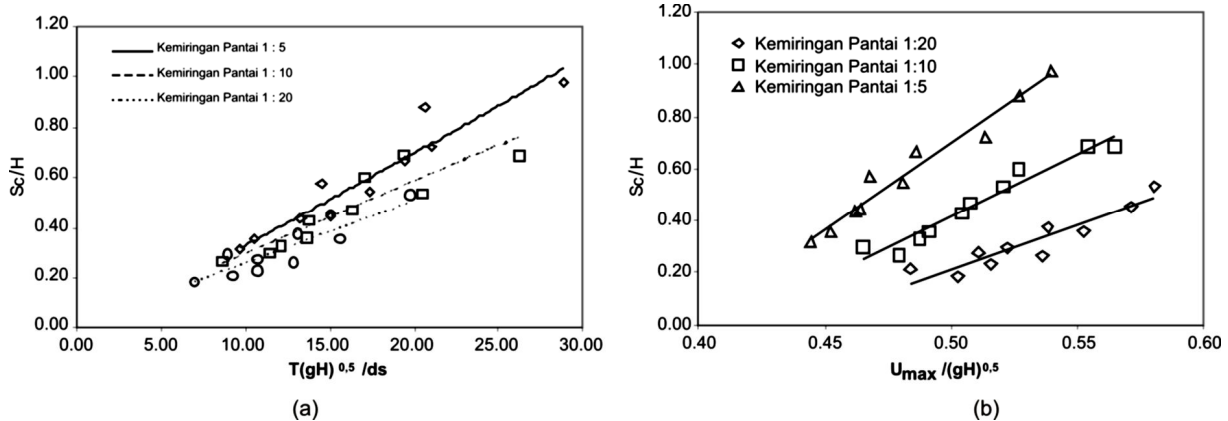
Gambar 6(b) memperlihatkan hubungan tipe pecah gelombang terhadap kedalaman gerusan kaki relatif. Hasil pengujian memperlihatkan bahwa tipe gelombang *plunging* akan memberikan peningkatan terhadap kedalaman gerusan kaki relatif.



Gambar 6. Pengaruh *Surf Similarity* dan Tipe Pecah Gelombang terhadap Peningkatan Gerusan Kaki
 (a) Pengaruh *Surf Similarity* dengan Variasi Kemiringan Pantai
 (b) Pengaruh *Surf Similarity* dan tipe pecah gelombang (Kemiringan Pantai 1 : 20)

Gambar 7(a) menunjukkan peningkatan gerusan kaki relatif akibat peningkatan gangguan dasar berdasar *plunger parameter* (Sumer, B.M., 1997). Hal ini dipengaruhi oleh makin dekatnya jarak penetrasi massa aliran

yang memasuki tubuh aliran untuk mencapai dasar (Gambar 1). Hal ini similar dengan hasil pada Gambar 4, kedalaman gerusan relatif (Sc/H) akan berkurang dengan meningkatnya kedalaman air di kaki relatif (ds/L).



Gambar 7. Pengaruh Gangguan Dasar terhadap Peningkatan Gerusan Kaki
 (a) Peningkatan Kedalaman Gerusan Akibat Peningkatan *Plunger Parameter*
 (b) Peningkatan Kedalaman Gerusan Akibat Peningkatan Kecepatan Aliran *Downrush*

Gambar 7(b) memperlihatkan terjadinya peningkatan gerusan kaki sebagai pengaruh peningkatan kecepatan aliran *downrush*. Makin besar kecepatan aliran *downrush* akan mengakibatkan massa aliran *downrush* makin

kuat saat menuruni lereng struktur untuk dapat menjangkau dasar di kaki struktur tersebut. Hal tersebut akan mengakibatkan peningkatan gerusan kaki.

PENUTUP

Kesimpulan

1. Mekanisme gerusan kaki pada struktur *impermeable sloping wall* akibat gelombang pecah dipengaruhi oleh karakter pecah gelombang yang terjadi dan interaksinya terhadap struktur.
2. Gelombang pecah tipe *plunging* akan memberikan nilai kedalaman gerusan lebih besar dibandingkan tipe *spilling*.
3. Peningkatan kedalaman air di kaki struktur akan mengurangi kedalaman gerusan kaki akibat gelombang pecah.
4. Besar gerusan kaki dipengaruhi oleh besarnya energi gelombang pecah yang direpresentasikan dengan peningkatan tinggi gelombang pecah.
5. Peningkatan gerusan kaki dipengaruhi oleh peningkatan *surf similarity*. Hal ini menggambarkan kecenderungan bentuk pecah gelombang yang mengarah kepada bentuk pecah tipe *plunging*.
6. Peningkatan gangguan terhadap dasar di kaki struktur menyebabkan terjadinya peningkatan gerusan kaki. Peningkatan gangguan dasar di kaki dapat disebabkan oleh proses pecah gelombang maupun peningkatan kecepatan *downrush* massa aliran saat menuruni lereng struktur yang menjangkau daerah kaki.

Saran

1. Penelitian ini terbatas pada kondisi struktur yang *impermeable* dan gelombang pecah. Mencermati kondisi di lapangan banyak dipakai struktur permeable (*rubblemound breakwater*) disarankan untuk melakukan pengujian terhadap jenis struktur tersebut.

2. Permasalahan refleksi akibat karakter struktur belum termasuk dalam penelitian ini. Refleksi yang diakibatkan oleh karakter struktur berkemungkinan memberikan pengaruh terhadap peningkatan gerusan kaki.
3. Pengujian terhadap variasi diameter butiran dasar disarankan untuk dilakukan. Hal ini berkemungkinan berpengaruh terhadap kedalaman gerusan yang terjadi.

DAFTAR PUSTAKA

- Coastal Engineering Manual*. 2006. Scour and Scour Protection. Chapter VI-5-6, EM 1110-2-1100. Headquarters: U.S. Army Corps of Engineers.
- Shore Protection Manual*. 1984. Washington DC: CERC, WES, US Army Corps of Engineers.
- Breusers, H.N.C dan Raudkivi, A.J. 1991. *Scouring*. IAHR Hydraulics Structures Design Manual 2. Rotterdam: Balkema.
- Dean, R. G. dan Dalrymple, R. A. 1991. *Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists*. Singapore: World Scientific.
- Fowler, J.E. 1992. *Scour Problems and Methods for Prediction of Maximum Scour at Vertical Seawalls*. Technical Report CERC-92-16. Vicksburg: CERC, WES, US Army Corps of Engineers.
- Fredsøe, J. dan Deigaard, R. 1992. *Mechanics of Coastal Sediment Transport*. Singapore: World Scientific.
- Fredsøe, J. dan Sumer, B.M. 1997. *Scour at the Round Head of a Rubblemound Breakwater*. Coastal Engineering Vol. 29. Hal: 231–262.
- Galvin, C. J. 1968. *Breaker Type Classification on Three Laboratory Beaches*. Journal of Geophysical Research. Hal: 3651-3659. Vol. 73. Washington D.C: AGU.
- Goda, Y. 1975. *Irregular Wave Deformation in the Surf zone*. Coastal Eng. in Japan. Vol. 18. Hal: 13–26. Tokyo: JSCE.

- Goda, Y. 1980. *A Review on Statistical Interpretation of Wave Data*. Report of Port and Harbour Research Institute Vol. 16. No.2. Hal: 3–26.
- Hamada, T. 1951. *Breakers and Beach Erosion*. Report of Transportation Tech. Res. Inst., Ministry of Transportation. Japan. No.1.
- Herbich, J.B. dan Ko, S.C. 1968. *Scour of Sand Beaches in Front of Seawalls*. Proc. of the 11th on Coastal Engineering. Hal: 622–643. London: CERC of ASCE.
- Horikawa, K. 1988. *Nearshore Dynamics and Coastal Processes, Theory, Measurement, and Predictive Models*. Tokyo: Univ. of Tokyo Press.
- Izumiya, T., dan Horikawa K., 1983. *Wave energy equation applicable in and outside the surf zone*. Coastal Eng. In Japan. Hal: 119–137. Vol. 27. Tokyo: JSCE.
- Jones, D.F. 1975. *The Effect of Vertical Seawalls on Longshore Currents*. Ph.D Thesis. Univ. of Florida.
- McDougal, W.G., Kraus, N. and Ajiwibowo, H. 1996. *The effects of seawalls on the beach: Part 2, Numerical Modeling of SUPERTANK Seawall Tests*. J. Coastal Research, Vol. 12. No.3. Hal: 702–713. West Palm Beach: Coastal Education and Research Foundation (CERF).
- Miche, R. 1951. in *Shore Protection Manual*. 1984. Washington DC: US Army Corps of Engineers..
- Muller, G. 2007. *Flow fields in Reflected Waves at a Sloped Seawall*. Ocean Engineering 34. Hal: 1786–1789. Piscataway: IEEE Service Center.
- Ostendorf, D. W. dan O. S. Madsen. 1979. *An Analysis of Longshore Currents And Associated Sediment Transport in the Surf Zone*. Hal: 79–13. Massachusetts: MIT Rep. Sea Grant.
- Powell, K.A. dan Lowe, J.P. 1994. *The Scouring of Sediments at the Toe of Seawalls*. Proc. Hornafjordur Int. Coastal Symposium. 20-24 June 1994. Iceland: G. Viggosson.
- Sato, S., Tanaka, N., dan Irie, I. 1968. *Study on Scouring at the Foot of Coastal Structures*. Proc. of the 11th on Coastal Engineering. Vol. I. Hal. 579–598. London: CERC of ASCE.
- Shibayama, T., Higuchi, A., dan Horikawa, K.1986. *Sediment Transport Due to Breaking Waves*, Proc. of 20th ICCE. Hal: 1509–1522. Taipei: ASCE.
- Song, Won Oh, dan Schiller, R. E. 1973. *Experimental Studies of Beach Scour*. C.O.E. Report No. 166 (June). Texas: Texas A&M Sea Grant College.
- Sumer, B.M. dan Fredsøe, J. 2000. *Experimental Study of Two-Dimensional Scour and Its Protection at a Rubble-mound Breakwater*. Coastal Engineering 40 (1), Hal: 59–87.
- Sumer, B.M., Jorgen Fredsøe, Alberto Lamberti, Barbara Zanuttigh, Martin Dixen, Kjartan Gislason, dan Antonio F. Di Penta. 2005. *Local scour at roundhead and along the trunk of low crested structures*. Hal: 995–1025. Coastal Engineering Vol. 52.
- Sumer, B.M. dan Fredsøe, J. 2002. *The Mechanics of Scour in The Marine Environment*. Singapore: World Scientific.
- Sunamura, T. 1983. *Determination of Breaker Height and Depth in the Field*. Ann Rep. Inst. Geoscience. No. 8. Hal: 53–54. Tsukuba: Univ. Tsukuba.
- Sutherland, J., Obhrai, C., Whitehouse, R. J. S., dan Pearce, A. M. C. 2006. *Laboratory Tests of Scour at a Seawall*. Proc. 3rd International Conference on Scour and Erosion (in CD-ROM), Amsterdam: ISSMGE.
- Tsai, C.P., Jiann-Shyang, dan Lin, C. 1998. *Downrush Flow rom Waves on Sloping Seawalls*. Ocean Engineering Vol. 25, No.4-5. Hal: 295–308. Piscataway, New Jerse: IEEE Service Center.
- van Rijn, L.C. 1993. *Principles of Sediment Transport in Rivers, Estuaries, and Coastal Seas*. Amsterdam: Aqua Publications.

Xie, S.L. 1981. *Scouring Patterns in Front of Vertical Breakwaters and Their Influence on The Stability of The Foundations of The Breakwaters*. Report on September. Dep. of Civil Engineering, Netherlands: Delft Univ. of Technology.