

PENGARUH GERAKAN GELOMBANG TERHADAP DISTRIBUSI TEKANAN HIDROSTATIK DI BAWAH BLOK REVETMEN

Oleh :

*Dr. Ir. Nur Yuwono Dip.HE. *)*

Intisari

Untuk mengevaluasi stabilitas blok revetmen terhadap pengaruh gerakan gelombang, sangat diperlukan informasi mengenai distribusi tekanan hidrostatis di bawah blok revetmen yang disebabkan oleh gerakan gelombang tersebut. Untuk mengetahui distribusi tekanan ini telah dikembangkan teori gerakan oskilasi muka air di lapisan filter yang dikaitkan dengan gerakan gelombang di tebing. Dengan teori ini gaya up-lift pada blok revetmen dapat ditentukan. Model matematik sederhana telah dikembangkan untuk mengetahui pengaruh berbagai parameter yang terkait. Dan dengan model matematik ini dapat disimpulkan bahwa besar tekanan hidrostatis di bawah blok revetmen besarnya sangat tergantung pada parameter filter-gap (λ), bilangan Iribarren (ξ) dan rasio tinggi gelombang dan panjang blok (H/L).

Pendahuluan

Suatu tebing ("sloping bank") yang bertemu dengan massa air yang cukup besar seperti laut, reservoir, sungai ataupun jalan air ("waterway") akan mengalami proses pelapukan atau pengikisan oleh gelombang. Apabila proses ini tidak terkontrol maka tebing tersebut akan ter-erosi, tidak stabil dan akhirnya akan runtuh.

Bertahun-tahun, para ahli bangunan telah berusaha untuk mengontrol proses ini dengan bangunan pelindung tebing yang biasa disebut revetmen ("revetment = slope protection"). Perlindungan tersebut telah dilaksanakan baik di bidang kepantiaian, persungai, bendungan ataupun jalan air. Namun

demikian tidaklah seluruh konstruksi tersebut berhasil. Kegagalan perlindungan tebing dapat menyebabkan ketidak nyamanan pemakai ataupun bencana yang luar biasa. Telah tercatat dalam sejarah bahwa kegagalan bendungan ataupun perlindungan pantai dapat menyebabkan bencana yang sangat besar dan menelan korban baik harta maupun jiwa yang tidak ternilai harganya. Sebagai contoh jebolnya tanggul pantai di Belanda.

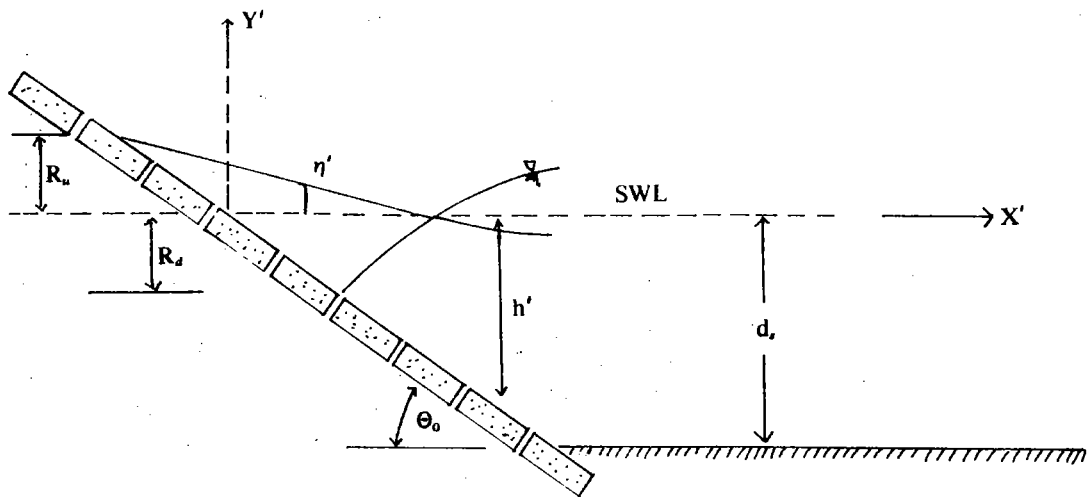
Gerakan air di tebing mengikuti persamaan massa dan momentum sebagai berikut (keterangan lihat gambar 1).

$$\frac{\partial}{\partial t'} (\eta' + h') + \frac{\partial}{\partial x'} U' (\eta' + h') = 0. \quad (1)$$

$$\frac{\partial U'}{\partial t'} + U' \frac{\partial U'}{\partial x'} + g \frac{\partial \eta'}{\partial x'} = 0 \dots \dots \dots (2)$$

*) Staf Pengajar Jurusan Teknik Sipil FT UGM.

Analisis Gerakan Gelombang di Tebing



Gambar 1. Sketsa Gerakan Air di Tebing

Keterangan :

- g : percepatan gravitasi
- $U'(t', x')$: komponen horisontal kecepatan
- $y' = -h'(x')$: persamaan dasar tebing
- $y' = \eta'(t', x')$: persamaan muka air
- t' : waktu

Untuk daerah $x' \leq d_s \cot(\theta_0)$, berlaku variabel tak berdimensi sebagai berikut :

$$t^* = W t'; \quad x^* = x' \frac{4 W^2}{g \tan(\theta_0)}; \quad y^* = \frac{y'}{R_u} \quad (3)$$

$$\eta^* = \frac{\eta'}{R_u}; \quad U^* = U' \frac{\tan(\theta_0)}{R_u W}; \quad W^2 = \frac{2 \pi g}{L_0} \quad (3)$$

$$\epsilon = \frac{4 R_u W^2}{g \tan^2(\theta_0)}; \quad \tan(\theta_0) = \frac{h'}{x'} \quad (4)$$

Substitusi persamaan (3) dan (4) ke dalam persamaan (1) dan (2) menghasilkan :

$$\frac{\partial \eta^*}{\partial t^*} + \frac{\partial}{\partial x^*} U^*(x^* + \epsilon \eta^*) = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial U^*}{\partial t^*} + \epsilon U^* \frac{\partial U^*}{\partial x^*} + 4 \frac{\partial \eta^*}{\partial x^*} = 0 \quad (6)$$

Kobayashi dan Jacobs (1985) mengusulkan penyelesaian persamaan ini dengan transformasi variabel sehingga persamaan tersebut menjadi persamaan air dangkal linear. Variabel yang dipergunakan untuk transformasi ini adalah :

$$x = x^* + \epsilon \eta^*(t^*, x^*); \quad t = t^* - (\epsilon/4) U^*(t^*, x^*) \quad (7)$$

$$U(t, x) = U^*; \quad \eta(t, x) = \eta^* + (\epsilon/8)(U^*)^2 \quad (8)$$

Substitusi persamaan (7) dan (8) ke dalam persamaan (5) dan (6) menghasilkan :

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial (xU)}{\partial x} = 0 \quad (9)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} + 4 \frac{\partial \eta}{\partial x} = 0 \quad (10)$$

Persamaan (9) dan (10) dapat diselesaikan dengan transformasi Laplace dan Hankel. Apabila kondisi awal yang dipergunakan adalah :

$$U(t=0, x) = 0; \quad \eta(t=0, x) = J_0(\sqrt{x}) \quad (11)$$

maka persamaan gerak gelombang ditebing dapat ditentukan sebagai berikut (Carrier dan Greenspan, 1958) :

$$\eta = J_0(\sqrt{x}) \cos(t) \dots \dots \dots (12)$$

$$U = M_1(x) \sin(t) \dots \dots \dots (13)$$

$$M_1(x) = \frac{2}{\sqrt{x}} J_1(\sqrt{x}) \dots \dots \dots (14)$$

Keterangan :

J_0 = Fungsi Bessel orde 0 (first kind)

J_1 = Fungsi Bessel orde 1 (first kind)

Nilai Ru ('wave run-up') pada persamaan (3) dan (4) dapat ditentukan dengan menggunakan rumus empiris yang diusulkan Nur Yuwono (1990), lihat gambar 3.

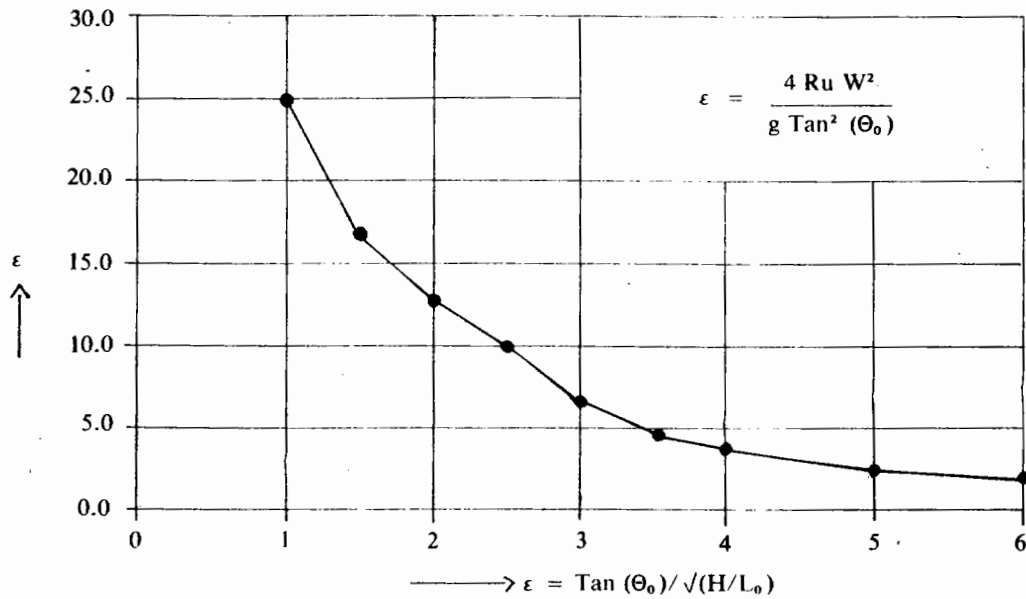
$$\frac{Ru}{H} = \epsilon \quad \text{untuk } \epsilon < 2.5 \dots (15a)$$

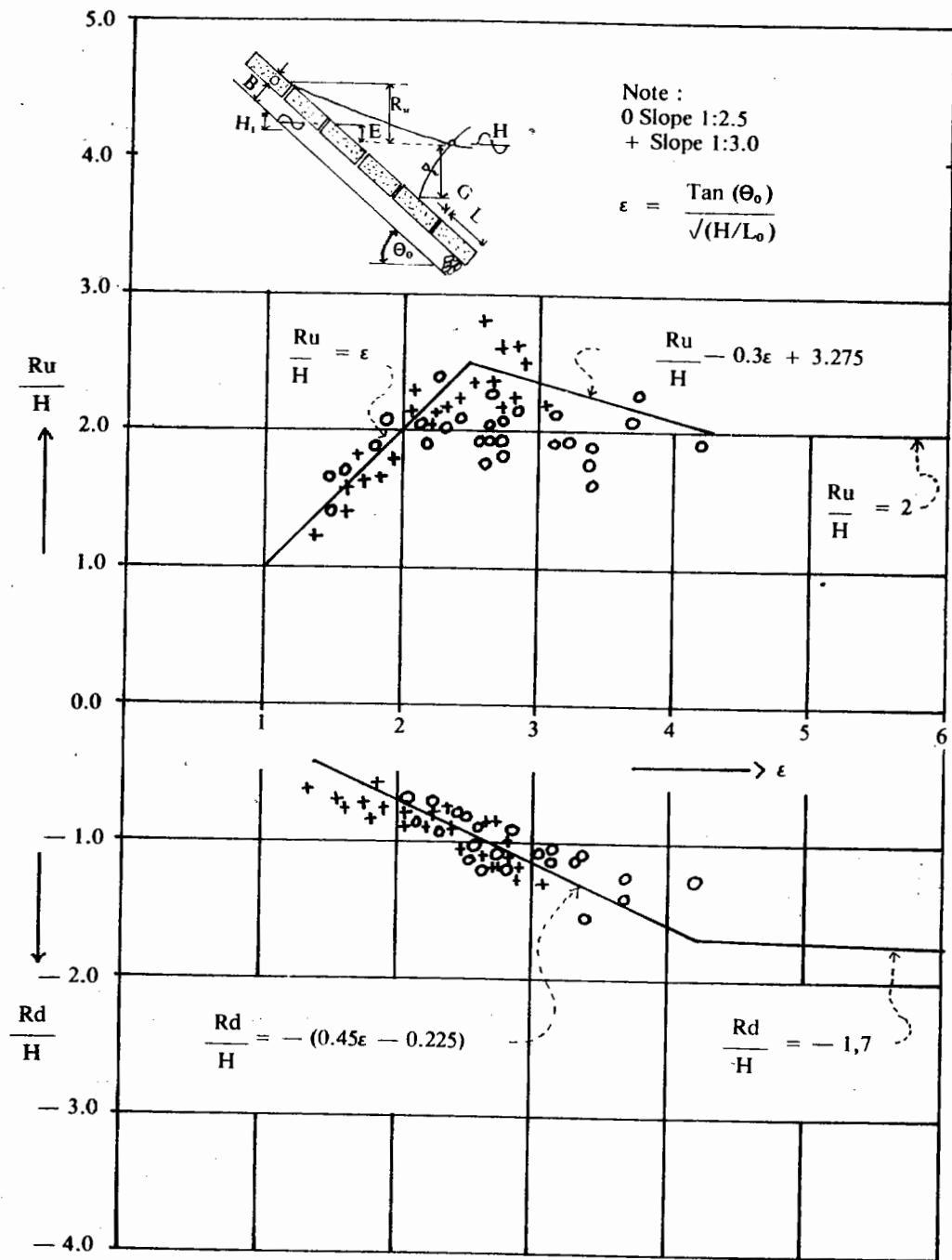
$$\frac{Ru}{H} = -0.3 \epsilon + 3.275 \quad 4.25 > \epsilon > 2.5 \dots \dots \dots (15b)$$

$$\frac{Ru}{H} > 2.0 \quad \epsilon > 4.25 \quad (15c)$$

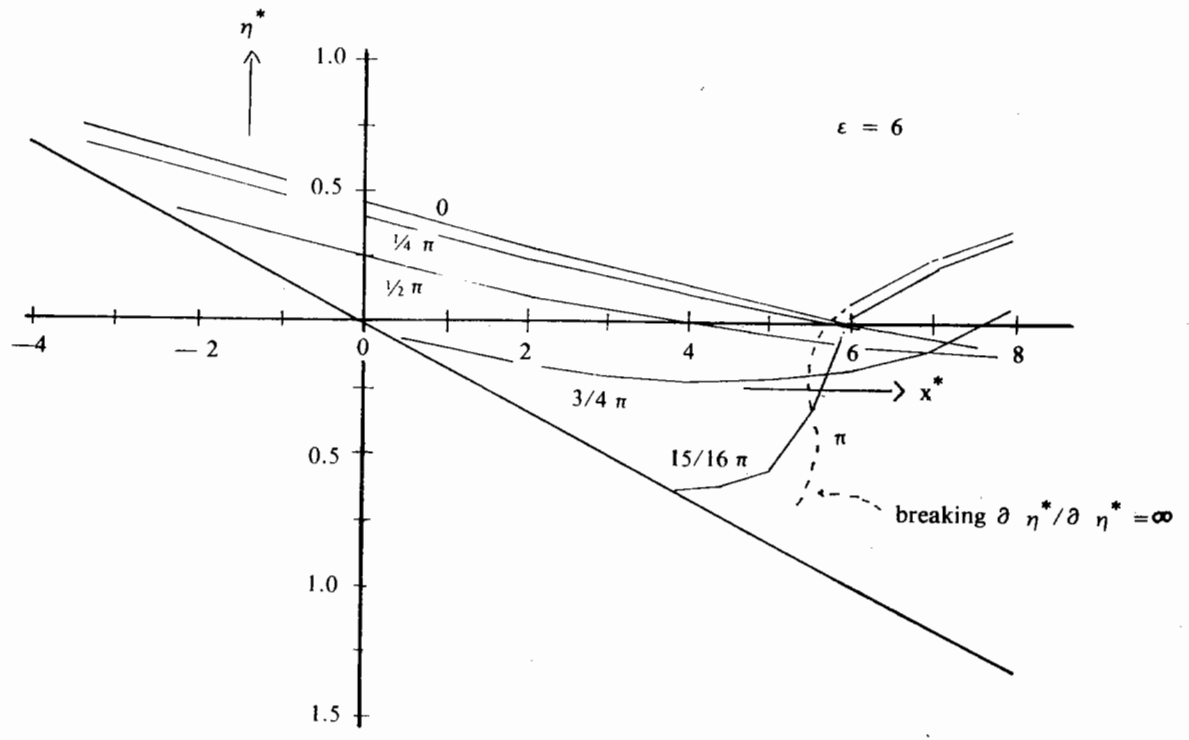
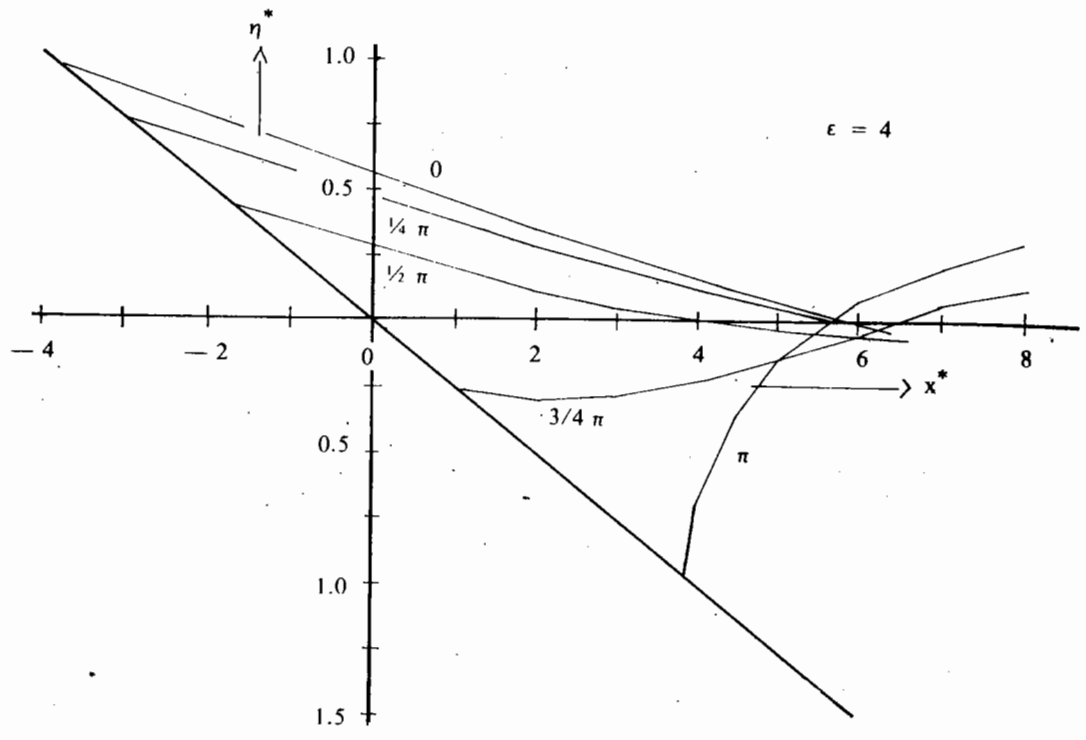
Substitusi persamaan (15a, b, c) ke dalam persamaan (4) dan nilai konstante ϵ dapat dikaitkan langsung dengan bilangan Iribarren dan hubungan ini dapat dilihat pada gambar 2.

Dengan memberikan nilai t^* dan x^* , η^* dan U^* dapat dihitung melalui persamaan (7), (8), (12), (13) dan (14) dan hasilnya dilukiskan pada gambar 4 dan 5. U^* ('normalized velocity') = 0 terjadi pada saat $t^* = 0$ dan π . Dari simulasi di atas dapat terlihat bahwa gelombang tidak akan pecah untuk $\epsilon < 4$ dan gelombang mulai pecah apabila $\epsilon > 4$. Untuk keadaan $\epsilon > 4$, gerakan 'run-down' terendah tercapai bilamana muka air di tebing pada posisi vertikal ($\partial \eta / \partial x = \infty$). Berdasarkan pendekatan ini, gerakan 'run-down' gelombang dapat disimulasikan. Perbandingan hasil simulasi dan hasil eksperimen dapat dilihat pada gambar 6.

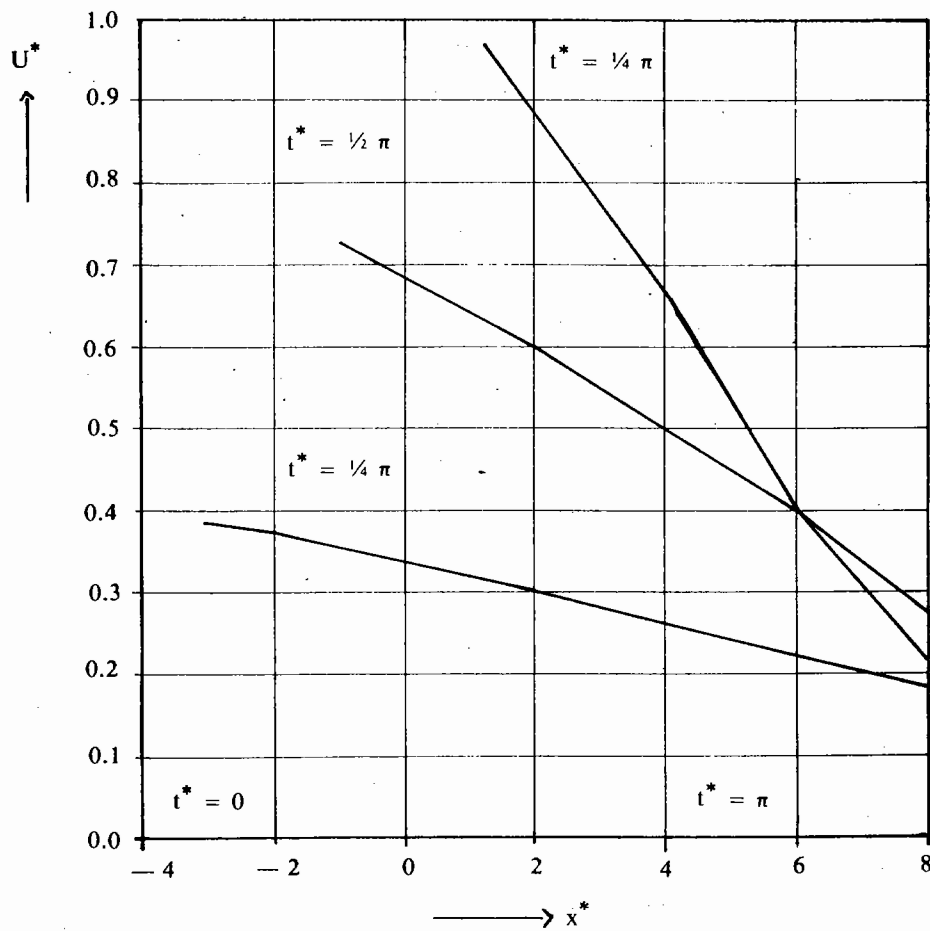




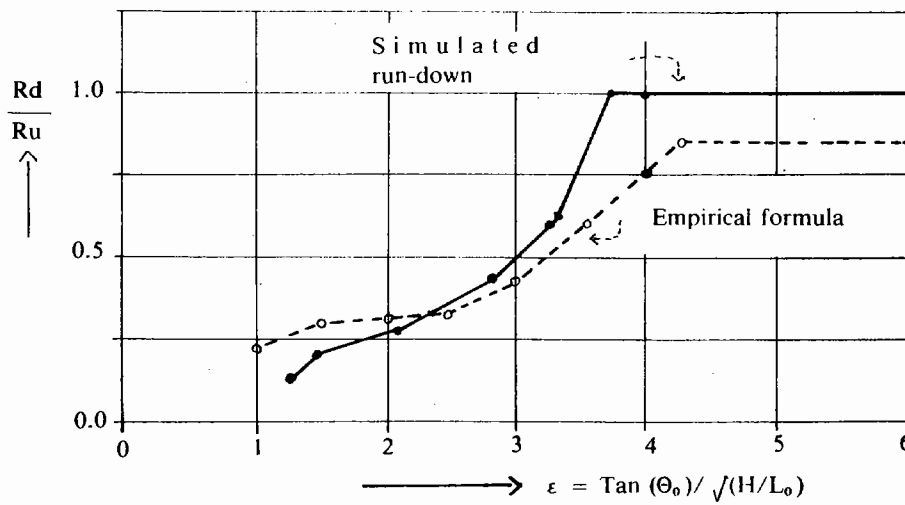
Gambar 3. Run-up dan Run-down versus Bilangan Iriharren (ϵ)
 (Nur Yuwono, 1990)



Gambar 4. Variasi Muka Air (normalized free surface), $\eta^*(t^*, x^*)$ untuk $\epsilon = 4$ dan 6

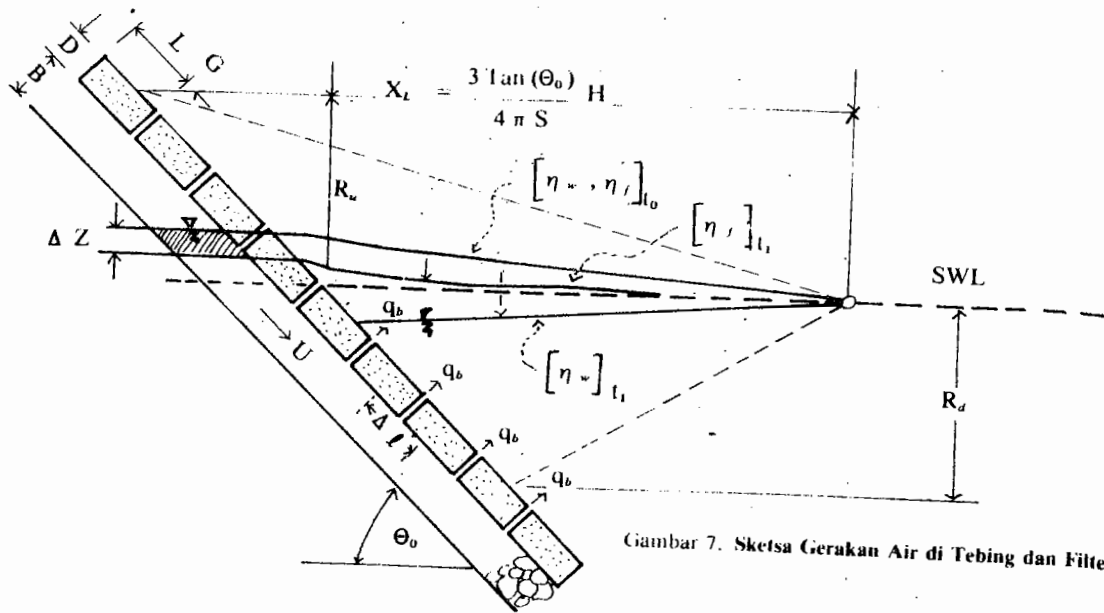


Gambar 5. Variasi Kecepatan (normalized velocity), U^* (t^* , x^*) untuk $\epsilon = 4$



Gambar 6. Rd/Ru versus Bilangan Iribarren (ϵ)

Oskilasi Muka Air di Filter Akibat Gerakan Gelombang



Gambar 7. Sketsa Gerakan Air di Tebing dan Filter

Perhitungan gerakan muka air ditebing cara Obayashi-Yacobs dapat disederhanakan dengan menganggap muka air berupa garis lurus (lihat gambar). Dengan demikian jumlah air yang mengalir melalui p (celah) antara blok revetmen dapat diperkirakan dengan persamaan gerak aliran lewat filter sebagai berikut :

$$= - B L \frac{\partial U}{\partial t} \dots \dots \dots (16)$$

$$= - k \left| \frac{\partial \eta_f}{\partial t} \right|^{1/2} \dots \dots \dots (17)$$

stitusi persamaan (17) ke dalam persamaan (16) menghasilkan :

$$= k B L^{1/2} \left| \frac{\partial \eta_f}{\partial t} \right|^{-1/2} \left\{ \frac{\partial^2 \eta_f}{\partial t^2} \right\} \dots \dots \dots (18)$$

aliran melalui gap mengikuti persamaan lubang a :

$$= Cd G \left\{ 2g (\eta_f - \eta_w) \right\}^{1/2} \dots \dots \dots (19)$$

amaan (18) kemudian dapat ditulis sebagai berikut :

$$\frac{\partial^2 \eta_f}{\partial t^2} = \frac{2 Cd g \sqrt{g}}{k B L} \left[2 (\eta_{fi} - \eta_{wi}) \left| \frac{\partial \eta_f}{\partial t} \right| \right]^{1/2}$$

$$\frac{\partial^2 \eta_f}{\partial t^2} = \frac{2 Cd}{\lambda L} \left[2 \left| \frac{\eta_{fi} - \eta_{wi}}{L} \right| \left| \frac{\partial \eta_f}{\partial t} \right| \right]^{1/2} \dots \dots \dots (20)$$

dimana :

$$\lambda = \frac{P (B/L)}{G/L} \dots \dots \dots (21)$$

$$P = \frac{k}{\sqrt{gL}} \dots \dots \dots (22)$$

Persamaan (20) tersebut di atas dapat diselesaikan menggunakan cara "finite difference" sebagai berikut :

$$\left\{ \frac{\eta_f}{L} \right\}_{i+1} = 2 \left\{ \frac{\eta_f}{L} \right\}_i - \left\{ \frac{\eta_f}{L} \right\}_{i-1} + \frac{2 Cd}{\lambda} \left[\left\{ \frac{\eta_f - \eta_w}{L} \right\}_i \left| \left\{ \frac{\eta_f}{L} \right\}_i - \left\{ \frac{\eta_f}{L} \right\}_{i-1} \right| \right]^{1/2} \dots \dots \dots (23)$$

di mana : L = Δ l

Jumlah air yang mengalir melalui filter selama satu step waktu perhitungan harus sama dengan berkurangnya volume air di filter.

$$\frac{n B}{\sin(\Theta_0)} \frac{\partial Z_f}{\partial t} = U B$$

$$\frac{n}{\sin(\Theta_0)} \left\{ \frac{H/L}{2 \eta S} \right\}^{1/2} \frac{\partial Z_f}{L \partial (ot)} = P I^{1/2} \dots (24)$$

Keterangan :

- n = porositas material filter
- H/L = rasio tinggi gelombang dan panjang blok
- I = gradien hidrolis
- S = H/L₀ = landai gelombang ('wave steepness')
- Z_f = elevasi muka air filter
- σ = $\frac{2 \pi g}{L_0}$

Persamaan (24) dapat diselesaikan dengan cara berikut ini :

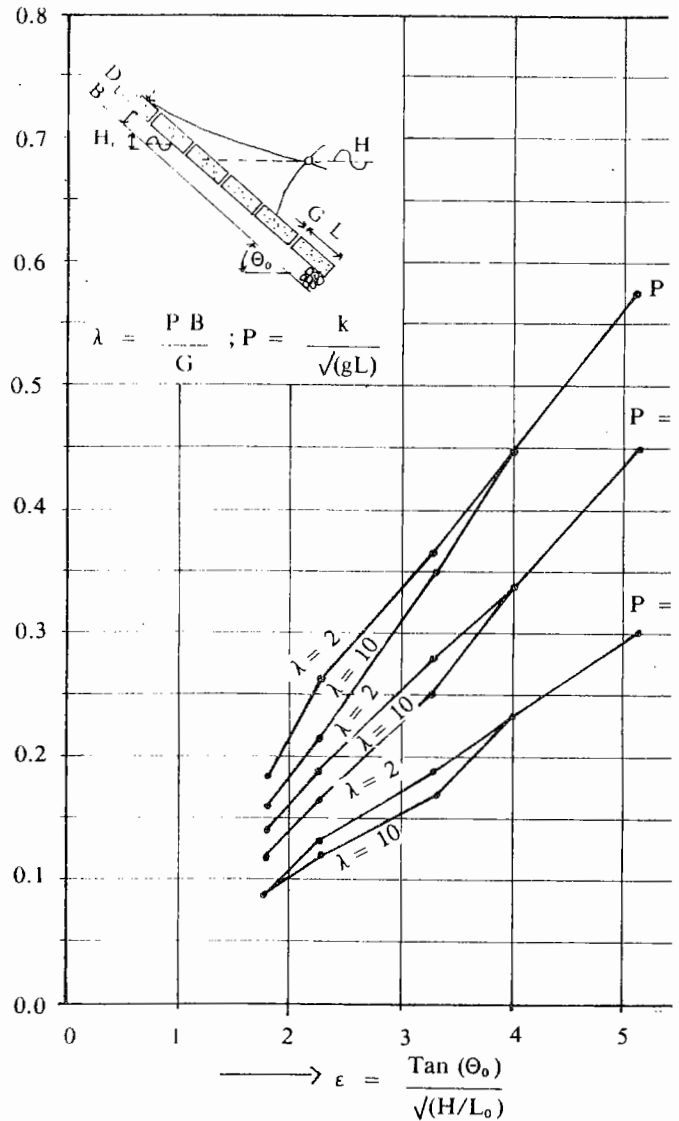
$$\frac{n}{\sin(\Theta_0)} \left\{ \frac{2 \pi S}{H/L} \right\}^{1/2} \left[\frac{Z_{f(i)} - Z_{f(i-1)}}{L} \right] = P \left| \frac{\eta_{f(i)} - \eta_{f(i-1)}}{L} \right|^{1/2}$$

$$\Delta(\sigma) \dots \dots \dots (25)$$

Untuk harga P, λ, S, H/L, n, Θ₀, Cd yang telah ditentukan dan dengan menggunakan kondisi batas yang tepat, gerakan fluktuasi muka air di filter dapat ditentukan dengan persamaan (23) dan (25). Hasil dari perhitungan ini dapat dilihat pada gambar 8.

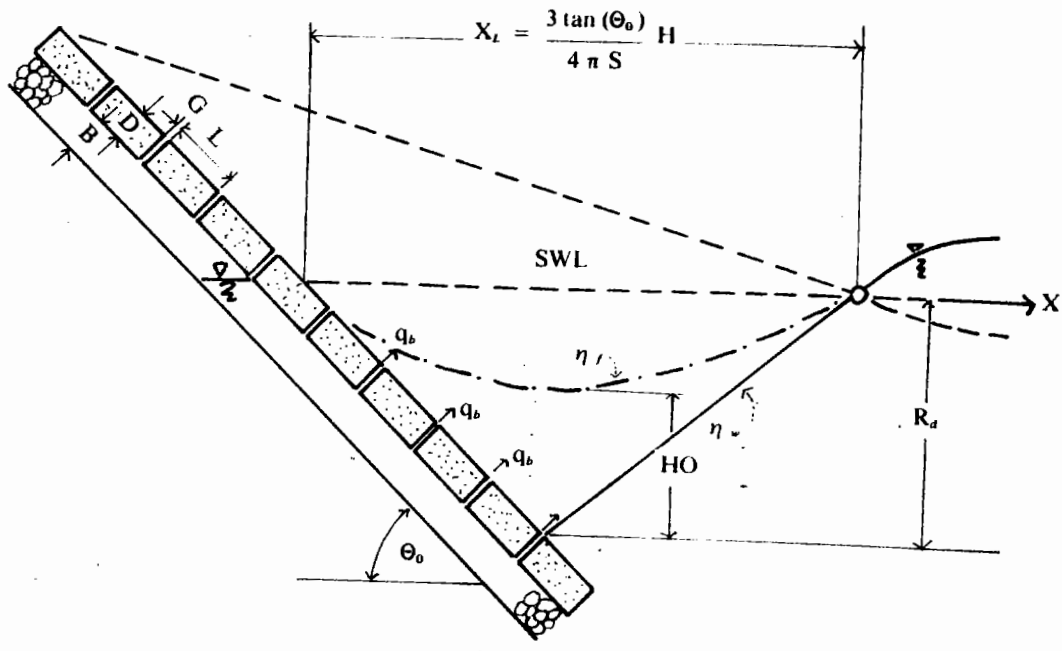
Distribusi Tekanan Hidrostatik di Bawah Blok Revetmen

Perbedaan antara tekanan pori di dalam lapisan filter dengan tekanan gelombang menyebabkan tekanan up-lift pada blok revetmen. Tekanan tersebut apabila cukup besar dan bekerja relatif lama dapat menggerakkan revetmen. Tekanan maximum terjadi pada saat muka air dipermukaan tebing terendah ('maximum down-ruch'). Dengan menggunakan kondisi batas yang tepat maka distribusi tekanan di tebing dapat dihitung dengan persamaan (23). Kondisi batas yang dipergunakan penulis ditunjukkan pada gambar 9 dan dapat dijelaskan sebagai berikut :



Gambar 8. H_f/H versus Bilangan Iribarren (ε)

- a. Fluktuasi pada lapisan filter pada saat ini diabaikan dan muka air dianggap tetap, dan sama dengan muka air tenang (SWL).
- b. Gerakan gelombang mengikuti metode Kobayashi-Yacobs yang telah disederhanakan yaitu oskilasi muka air linear. Posisi node gelombang (dalam hal ini 'standing wave') ditentukan dengan mengambil nilai x* = 6, sedangkan Rd ('run-down') dihitung dengan rumus empiris pada gambar 2. Pemakaian x* = 6 tersebut adalah sesuai dengan hasil penelitian penulis (gambar 10).



Gambar 9. Sketsa Tekanan Air di Filter

$$x^* = x' \frac{4 W^2}{g \tan(\theta_0)}$$

$$x_L = x' \Big|_{x^* = 6} = \frac{6 g \tan(\theta_0)}{4 W^2} = \frac{3 g \tan(\theta_0)}{(4\pi g)/L_0}$$

$$= \frac{3 \tan(\theta_0)}{4 \pi (H/L_0)} H$$

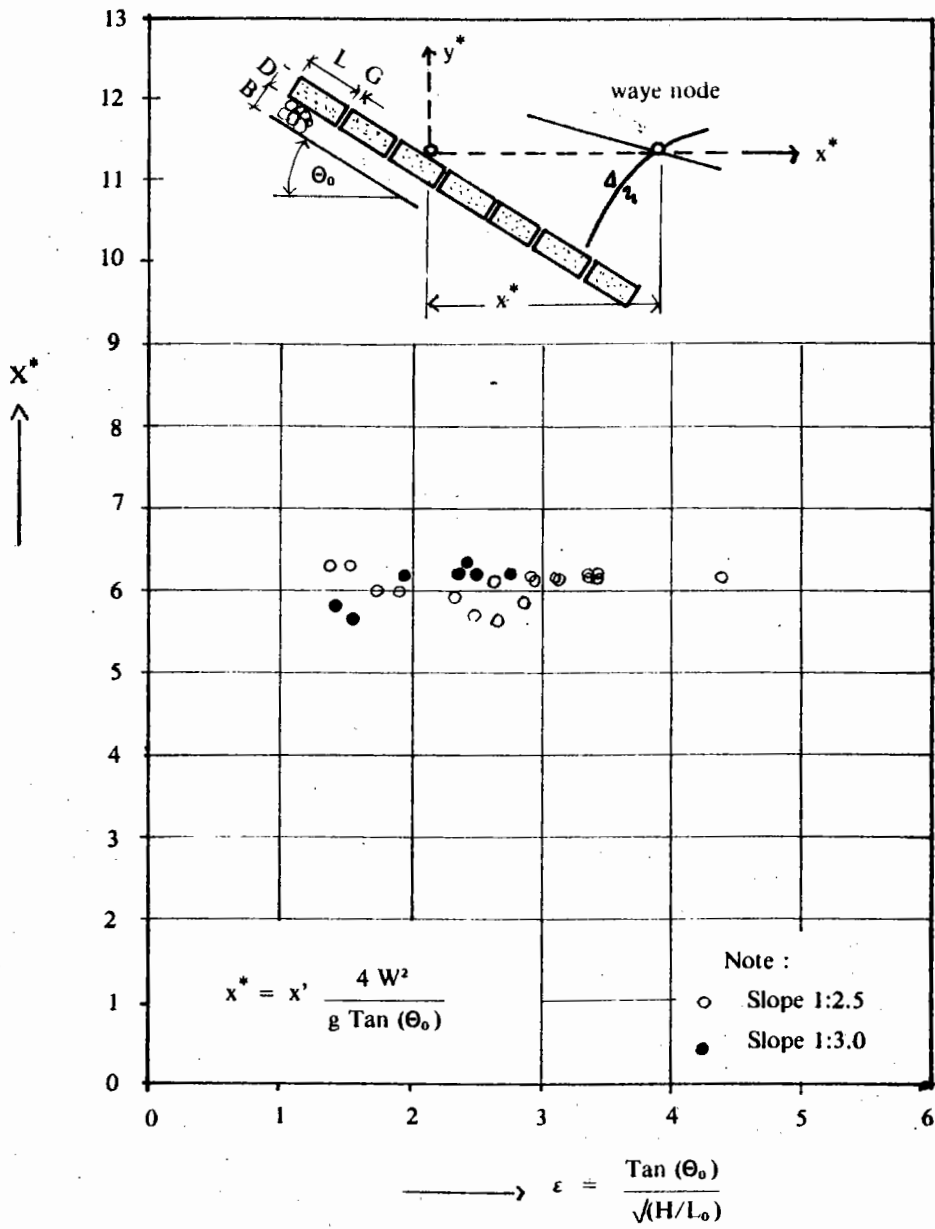
$$x_L = \frac{3 \tan(\theta_0)}{4 \pi S} H \dots \dots \dots (26)$$

nilai Cd sebenarnya merupakan fungsi dari lebar ap (G), tekanan piesometrik (η_r) dan ukuran material filter (d_{50}). Namun demikian dalam perhitungan ini diambil nilai tetap yaitu Cd = 40.

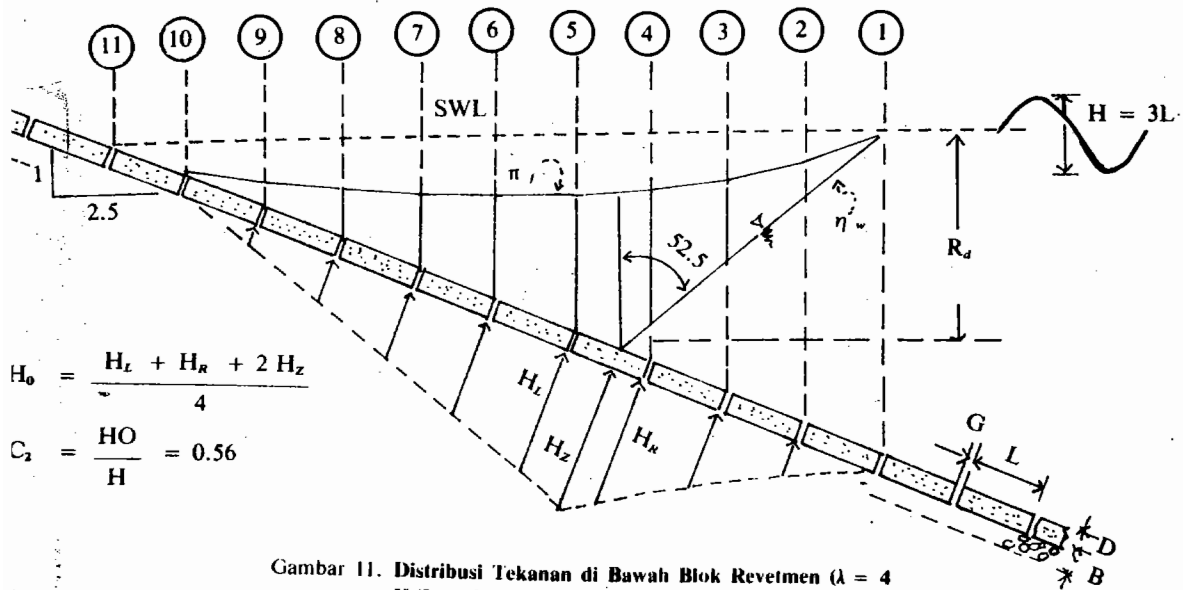
Hasil dari simulasi distribusi tekanan hidrostatik dapat dilihat pada gambar 11. Dengan menggunakan simulasi ini, dimungkinkan untuk menkan hubungan antara rasio tekanan rerata pada lan tinggi gelombang (HO/H) dengan bilangan reynold (ϵ). Hubungan ini dapat dilihat pada gam-

Kesimpulan

1. Fluktuasi air dilapisan filter. Permeabilitas bahan filter sangat berpengaruh terhadap besar fluktuasi muka air di lapisan filter. Makin permeabel bahan filter makin besar fluktuasi muka air yang terjadi difilter.
2. Distribusi tekanan di bawah blok revetmen
 - a. Besarnya tekanan hidrostatik di bawah blok revetmen tergantung pada :
 - Parameter filter-gap (λ)
Besarnya tekanan bertambah bersama naiknya nilai parameter filter-gap.
 - Bilangan Iribarren (ϵ)
 - Rasio tinggi gelombang — panjang blok revetmen (H/L). Berkurangnya nilai H/L akan menyebabkan naiknya tekanan di bawah blok.
 - b. Blok yang berada di lokasi muka air terendah (saat "down - rush") akan menderita tekanan terbesar, oleh karena itu kerusakan revetmen biasanya diawali dari daerah ini.



Gambar 10. Posisi Node Gelombang (yang dinormalisasi), x^* versus Bilangan Iribarren (ϵ)



$$H_0 = \frac{H_L + H_R + 2 H_Z}{4}$$

$$C_2 = \frac{H_0}{H} = 0.56$$

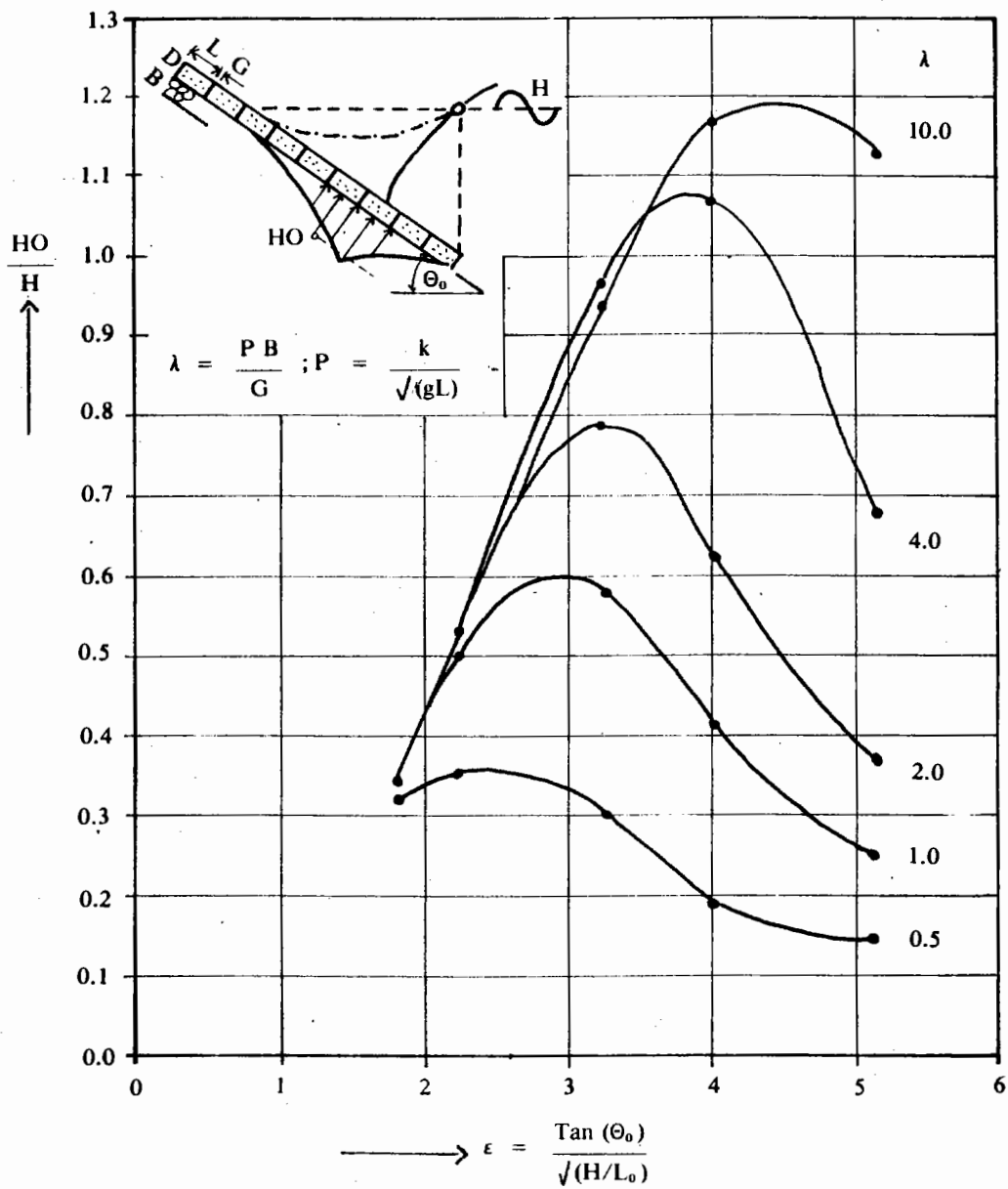
Gambar 11. Distribusi Tekanan di Bawah Blok Revetmen ($\lambda = 4$
 $H/L = 3$; $S = 0.03$; $\epsilon = 2.31$)

terhadap permasalahan yang ada di

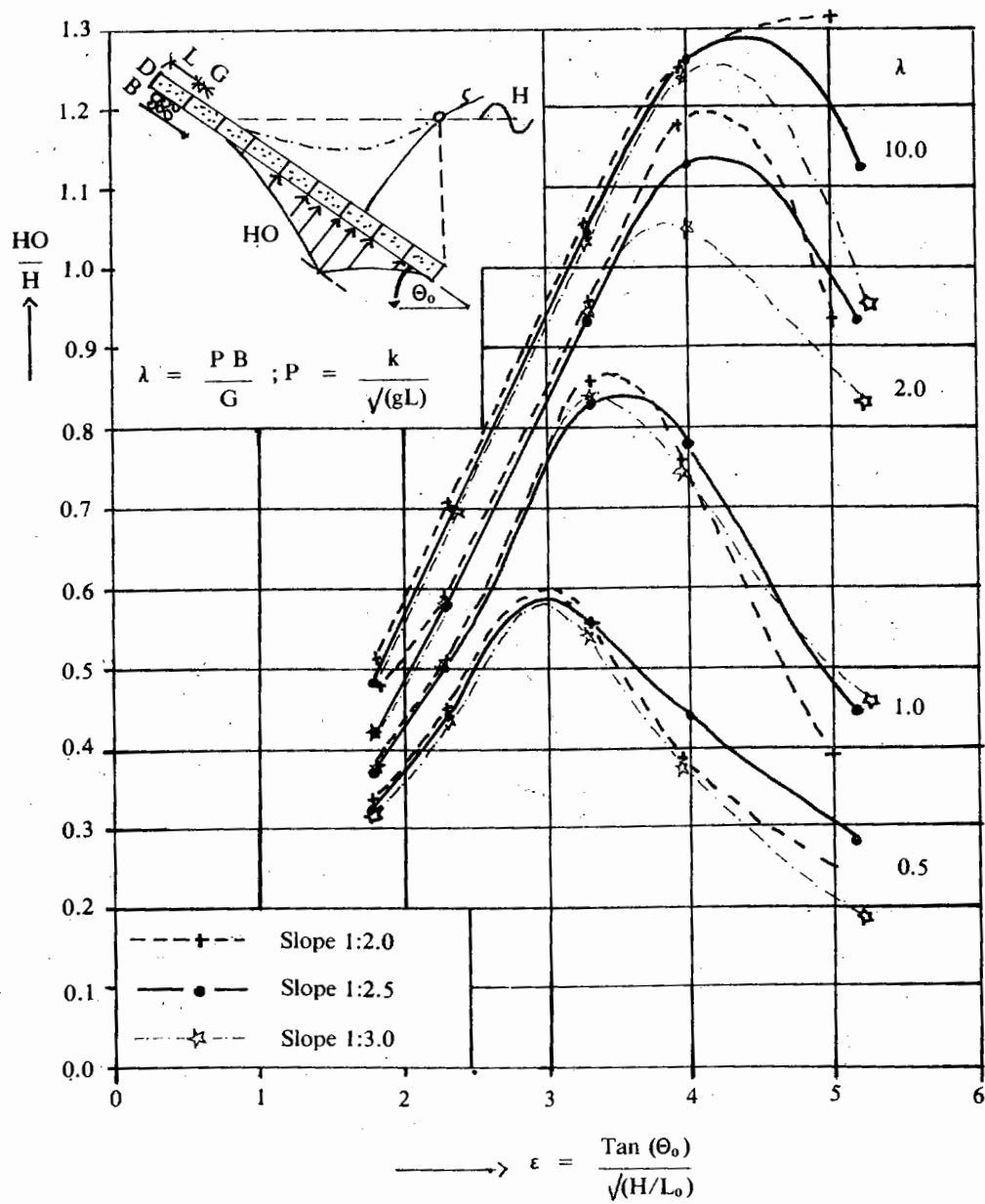
yang ada di lapangan mencakup keadaan yang cukup luas, baik menyangkut maupun tinggi gelombangnya. Oleh karena H/L yang ada di lapangan juga sangat berpengaruh, perencanaan blok revetment harus dapat mengatasi masalah ini sehingga perencanaan akan menghasilkan bangunan revetmen yang cukup baik. Untuk keperluan praktis, sangat dibutuhkan suatu rumus tekanan di bawah blok untuk suatu H/L tertentu pada nilai bilangan yang telah ditetapkan. Hubungan antara H/L dan bilangan Iribarren untuk nilai H/L dapat dilihat pada gambar 13.

Daftar Pustaka

- Carrier, G.F. and Greenspan, H.P., 1958, "Water waves of Finite Amplitude on A Sloping Beach", *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 4, pp. 97 — 109.
- Iribarren, C.R. and Nogales, C., 1949, "Protection des Ports", Sec. II, Comm. 4, *XVII th International Navigation Congress*, Lisbon, pp; 31 — 80.
- Kobayashi, N. and Jacobs, B.K., 1985, "Riprap Stability under Wave Action", *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, ASCE, Vol: III, No. 3, pp. 552 — 566.
- Nur Yuwono, 1990, *The Stability of Revetment Blockwork Under Wave action*, Ph.D Thesis, Strathclyde University, Glasgow.



Gambar 12. HO/H versus Bilangan Iribarren (ϵ) ($H/L = 1$; $\tan(\theta_0) = 0.40$)



Gambar 13. Hubungan antara $(HO/H)_{max}$, Bilangan Iribarren (ϵ) dan Parameter Filter-Gap (λ); untuk $H/L > 0.50$