



MODEL ANALITIK KINERJA HIDRAULIK PEMECAH GELOMBANG TIPE BOX CULVERT

Nastain^{1*}, Purwanto Bakti Santoso¹, Titi Safitri Maharani²

¹Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Jenderal Soedirman, Purwokerto

²Teknik Informatika, Fakultas Sains dan Teknik, Universitas Perwira Purbalingga, Purbalingga

*Penulis Korespondensi : Nastain (e-mail: nastain@unsoed.ac.id)

ABSTRAK

Salah satu solusi untuk mengatasi kekurangan pemecah gelombang tipe tumpukan batu adalah pemecah gelombang tipe *box culvert* yang hemat material dan ramah lingkungan. Penelitian ini dilakukan untuk menentukan nilai koefisien transmisi (K_T), koefisien refleksi (K_R) dan koefisien disipasi energi (K_D) sebagai parameter kinerja hidraulik pemecah gelombang tipe *box culvert* yang dirancang sebagai struktur pemecah gelombang dengan dinding kedap air pada bagian atas dan lubang tipe *box culvert* pada bagian bawah. Penelitian dilakukan dengan model analitik menggunakan metode fungsi Eigen, dimana potensial kecepatan gelombang ($\emptyset$) reguler digunakan sebagai variabel dasar. Parameter lubang dan gelombang divariasikan untuk menentukan kinerja pemecah gelombang. Hasil penelitian menunjukkan bahwa semakin kecil nilai tinggi lubang *box culvert* relatif (h_L/d) dan semakin besar nilai panjang lubang *box culvert* relatif (B/L) maka nilai K_T akan menurun dan sebaliknya nilai K_R akan meningkat. Sedangkan nilai K_D akan meningkat jika nilai h_L/d dan B/L semakin besar, tetapi akan menurun setelah mencapai nilai K_D maksimum.

KATA KUNCI : *box culvert*; koefisien transmisi; koefisien refleksi; koefisien disipasi energi.

1. PENDAHULUAN

Pelindungan pantai menggunakan pemecah gelombang tipe tumpukan batu (*rubble mound breakwater*) akan membutuhkan material konstruksi yang banyak [1][2][3][4]. Pada sisi lain, penggunaan batu alam dalam jumlah yang besar untuk material konstruksi akan menyebabkan terjadinya kerusakan lahan di lokasi penambangan (*quarry*) dan habisnya sumber daya batu alam karena ketersediaannya terbatas. Pemecah gelombang tumpukan batu juga relatif membutuhkan daya dukung tanah dasar yang baik [1][5][6].

Alternatif usaha untuk mengatasi kekurangan pemecah gelombang tipe tumpukan batu adalah penggunaan pemecah gelombang berlubang model dinding yang hemat material konstruksi dan juga ramah lingkungan karena sirkulasi air masih dapat berjalan dengan baik [7][4][8][9]. Tetapi karena struktur pemecah gelombang berbentuk dinding, maka struktur pemecah gelombang memiliki tebal struktur relatif (b/L) yang kecil [1], sehingga kurang efektif dalam mereduksi tinggi gelombang (H) pada saat porositas lubang (ε) dan panjang gelombang (L) yang besar.

Beberapa penelitian pemecah gelombang berlubang model dinding dalam beberapa tipe model telah banyak dilakukan dan dikembangkan sejak pertama kali diusulkan oleh Jarlan [10] antara lain oleh Mackay and

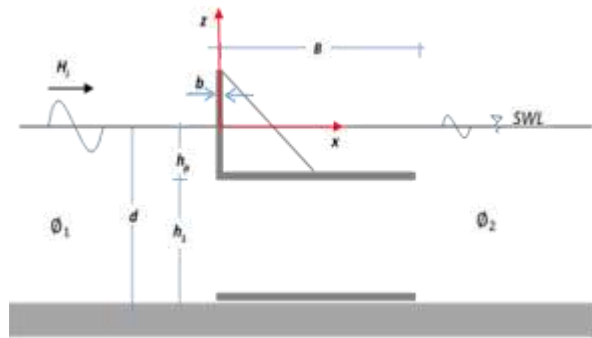
Johanning [11], Vijay *et al.* [12], George and Cho [13], Nikoo *et al.* [14], Ahmed and Schlenkhoff [15], Ahmed [9], Rageh and Koraim [1], Rageh and Koraim [16], Ariyaratne [17], Suh *et al.* [2] dan lain-lain. Namun penelitian yang telah dilakukan belum terfokus pada bentuk penampang lubang yang digunakan. Tinggi lubang (h_L) dan panjang lubang (B) adalah parameter penting yang mempengaruhi kinerja pemecah gelombang berlubang dalam mereduksi tinggi gelombang (H) dan energi gelombang (E). Penggunaan bentuk lubang tipe *box culvert* dimana memiliki Tinggi lubang (h_L) dan panjang lubang (B) diharapkan dapat meningkatkan efektifitas pemecah gelombang dalam mereduksi tinggi dan energi gelombang dengan porositas lubang (ε) yang besar. Pemecah gelombang berlubang tipe *box culvert* pada prinsipnya dirancang sebagai struktur pemecah gelombang dengan dinding kedap air pada bagian atas dan lubang tipe *box culvert* pada bagian bawah.

Penelitian ini dilakukan untuk mengkaji nilai koefisien transmisi, refleksi dan disipasi energi gelombang melalui pemecah gelombang berlubang tipe *box culvert* dengan model analitik menggunakan metode fungsi Eigen. Parameter penting struktur lubang dan gelombang ditentukan berdasarkan analisis non dimensional [18] yaitu tinggi lubang relatif (h_L/d) dan panjang lubang relatif (B/L). Parameter penelitian

divariasi untuk mengetahui kinerja hidraulik pemecah gelombang berdasarkan indikator nilai koefisien transmisi (K_T), koefisien refleksi (K_R) dan koefisien disipasi energi (K_D) gelombang.

2. METODE

Gelombang merambat pada suatu perairan dengan kedalaman konstan (d) melalui struktur *permeabel* misalnya pemecah gelombang tipe *box culvert* seperti pada Gambar 1, dimana b adalah tebal dinding pemecah gelombang, h_p adalah tinggi ketenggelaman pelat lubang (*draft*), h_L adalah tinggi lubang *box culvert*, dan B adalah panjang lubang *box culvert*. Sebuah sistem koordinat kartesian (x, z) didefinisikan dengan arah x positif ke arah pantai (arah ke kanan) dan koordinat arah z vertikal diukur dari *still water level* (SWL), maka gelombang reguler dengan tinggi H_i adalah gelombang datang arah x positif dan domain fluida dapat dibagi menjadi 2 wilayah, dimana wilayah 1 terletak ke arah laut lepas dari pemecah gelombang pada $x \leq 0$ dan wilayah 2 terletak ke arah pantai dari pemecah gelombang pada $x \geq 0$.



Gambar 1. Sketsa perambatan gelombang melalui breakwater tipe box culvert

Apabila diasumsikan fluida tak mampat (*incompressible fluid*) dan aliran tak berotasi (*irrotational flow*), maka dapat didefinisikan sebuah potensial kecepatan (ϕ) yang memenuhi Persamaan Laplace ($\nabla^2 \phi = 0$). Asumsi gerak periodik terhadap waktu t dan dengan menerapkan kondisi batas dinamik di permukaan bebas ($z = 0$) yang dilinierkan dengan deret Taylor serta kondisi batas kinematis di dasar ($z = -d$) yang diasumsikan dasar datar dan kedap air, maka dengan menggunakan metode pemisahan variabel (*variable separation method*) potensial kecepatan $\phi_p(x, z, t)$ dapat didefinisikan seperti pada Persamaan (1) [19].

$$\phi_p(x, z, t) = \text{Re} \left[-\frac{igH_i}{2\omega \cosh(kd)} \phi_p(x, z) e^{-i\omega t} \right], p = 1, 2$$

(1) dimana Re adalah bagian nilai riil dari bilangan kompleks tersebut, $i = \sqrt{-1}$, g adalah percepatan gravitasi, ω adalah kecepatan sudut gelombang ($\omega = 2\pi/T$), T adalah periode gelombang, k adalah bilangan gelombang (*wave number*, $k = 2\pi/L$), L adalah panjang gelombang dan $p = 1, 2$ menunjuk 2 wilayah gelombang ke arah laut dan ke arah pantai dari pemecah gelombang.

Selanjutnya $\phi_p(x, z)$ akan memenuhi kondisi batas kecepatan horizontal di $x = 0$ [16][1].

$$\frac{\partial \phi_1}{\partial x} = \frac{\partial \phi_2}{\partial x} = 0, \text{ untuk } 0 > z > -h_p \quad (2)$$

$$\frac{\partial \phi_1}{\partial x} = \frac{\partial \phi_2}{\partial x} = -iG'(\phi_2 - \phi_1), \text{ untuk } -h_p > z > -d \quad (3)$$

Konstanta proporsional $G' = G/b$, dimana G adalah parameter permeabilitas lubang yang berupa bilangan kompleks, dimana bagian riil menunjukkan nilai kekasaran lubang dan bagian imajiner menunjukkan perbedaan fase antara kecepatan dan tekanan karena pengaruh dari inersia.

Oleh karena itu untuk kedalaman $-h_p > z > -d$ pada pemecah gelombang berlubang tipe *box culvert* maka b adalah panjang lubang B , sehingga konstanta proporsional menjadi $G' = G/B$. Nilai parameter permeabilitas lubang (G) diusulkan oleh Sollitt and Cross [20] dan Isaacson *et al.* [19] seperti pada Persamaan (4).

$$G = \varepsilon / (f - is) \quad (4)$$

dimana ε adalah porositas daerah lubang ($\varepsilon = a/A_a$), a adalah luas lubang, A_a adalah luas penampang basah daerah lubang, f adalah koefisien lubang dan s adalah koefisien inersia. Lubang bentuk *box culvert* akan berlaku $a = A_a$ sehingga nilai $\varepsilon = 1$. Nilai f untuk nilai $B/d \geq 0,1$ maka disarankan menggunakan $f = 2$ [21]. Sedangkan s adalah koefisien inersia dan dapat ditentukan berdasarkan Persamaan (5) [7][16][1].

$$s = 1 + C_m \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} \quad (5)$$

dimana ε adalah porositas daerah lubang, C_m adalah koefisien pertambahan massa (*added mass*) dan dapat digunakan $C_m = 0$ [19].

Potensial kecepatan ϕ_1 dan ϕ_2 diperoleh dengan menggunakan metode ekspansi fungsi eigen (*eigenfunction expansion method*) seperti dalam Isaacson *et al.* [19] dan Suh *et al.* [2]. Potensial kecepatan gelombang terdiri atas potensial gelombang datang (ϕ_i) dan potensial gelombang hambur/difraksi (ϕ_s) yang dituliskan dalam bentuk fungsi eigen seperti pada Persamaan (6) dan Persamaan (7).

$$\phi_1(x, z) = \phi_i - \sum_{n=0}^{\infty} A_n \cos \mu_n(z+d) e^{\mu_n x} \quad (6)$$

$$\phi_2(x, z) = \phi_i + \sum_{n=0}^{\infty} A_n \cos \mu_n(z+d) e^{-\mu_n x} \quad (7)$$

$$\phi_i = \cosh k(z+d) e^{ikx} \quad (8)$$

dimana A_n adalah koefisien kompleks yang tidak diketahui dan μ_n adalah akar riil positif dari persamaan dispersi gelombang tidak merambat (*non propagating wave*) untuk $n \geq 1$ pada Persamaan (9).

$$\omega^2 = -g\mu_n \tanh(\mu_n d) \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (9)$$

dan jika μ_0 adalah akar imajiner dari persamaan dispersi gelombang merambat (*propagating wave*) untuk $n = 0$ pada Persamaan (10) maka $\mu_0 = -ik$ dan k adalah bilangan gelombang (*wave number*, $k = 2\pi/L$) dimana L adalah panjang gelombang.

$$\omega^2 = -gk \tanh(kd) \quad (10)$$

maka jika kita substitusikan Persamaan (6) dan Persamaan (7) ke kondisi batas pemecah gelombang pada Persamaan (2) dan Persamaan (3) ketika $x = 0$ dan karena $\cosh(ix) = \cos x$ maka didapat:

$$\sum_{n=0}^{\infty} A_n \mu_n \cos \mu_n(z+d) = -\mu_0 \cos \mu_0(z+d), \quad 0 > z > -h_p \quad (11)$$

$$\sum_{n=0}^{\infty} A_n (\mu_n - 2iG') \cos \mu_n(z+d) = -\mu_0 \cos \mu_0(z+d), \quad -h_p > z > -d \quad (12)$$

Persamaan (11) dan Persamaan (12) dikenal sebagai hubungan seri ganda [22] dan untuk mendapatkan nilai koefisien A_n maka kedua kondisi batas tersebut dapat digabungkan untuk membuatnya satu kondisi batas campuran yang menentukan potensial kecepatan disepanjang sumbu z sebagai berikut:

$$G(z) = \sum_{n=0}^{\infty} A_n \mu_n \cos \mu_n(z+d) + \mu_0 \cos \mu_0(z+d), \quad 0 > z > -h_p \quad (13)$$

$$G(z) = \sum_{n=0}^{\infty} A_n (\mu_n - 2iG'/) \cos \mu_n(z+d) + \mu_0 \cos \mu_0(z+d), \quad -h_p > z > -d \quad (14)$$

Teknik kuadrat terkecil (*least square technique*) dapat digunakan untuk mendapatkan nilai koefisien A_n dengan meminimumkan Persamaan (15) [22].

$$\int_{-d}^0 |G(z)|^2 dz = 0 \quad (15)$$

Untuk meminimumkan Persamaan (15) untuk mendapatkan nilai A_n , maka digunakan Persamaan (16).

$$\int_{-d}^0 G^*(z) \frac{\partial G(z)}{\partial A_m} dz = 0 \quad m = 0, 1, 2, \dots \quad (16)$$

dimana $G^*(z)$ adalah konjugasi bilangan kompleks $G(z)$.

$$G^*(z) = \sum_{n=0}^{\infty} A_n^* \mu_n^* \cos \mu_n(z+d) + \mu_0^* \cos \mu_0(z+d), \quad 0 > z > -h_p \quad (17)$$

$$G^*(z) = \sum_{n=0}^{\infty} A_n^* (\mu_n^* + 2iG'/) \cos \mu_n(z+d) + \mu_0^* \cos \mu_0(z+d), \quad -h_p > z > -d \quad (18)$$

$$\frac{\partial G(z)}{\partial A_m} = \mu_m \cos \mu_m(z+d), \quad 0 > z > -h_p \quad (19)$$

$$\frac{\partial G(z)}{\partial A_m} = (\mu_m - 2iG'/) \cos \mu_m(z+d), \quad -h_p > z > -d \quad (20)$$

dimana A_n^* , μ_n^* , μ_0^* dan $G'/$ adalah konjugasi bilangan kompleks A_n , μ_n , μ_0 dan G' . Substitusikan Persamaan (17), (18), (19), dan (20) ke Persamaan (16) sehingga didapatkan Persamaan (21).

$$\sum_{n=0}^{\infty} A_n^* \eta_{nm} = \alpha_{0m} \quad (21)$$

dimana:

$$\eta_{nm} = \mu_n^* \mu_m S_{nm}(-h_p, 0) + (\mu_n^* + 2iG'/)(\mu_m - 2iG'/) S_{nm}(-d, -h_p) \quad (22)$$

$$\alpha_{0m} = -\mu_0^* [\mu_m S_{0m}(-h_p, 0) - (\mu_m - 2iG'/) S_{0m}(-d, -h_p)] \quad (23)$$

$$S_{nm}(p, q) = \int_p^q \cos \mu_n(z+d) \cos \mu_m(z+d) dz \quad (24)$$

Persamaan (21) dapat ditulis dalam bentuk matrik dan dapat diselesaikan dengan menggunakan teknik inversi matrik (*Gauss Elimination Technique*). Nilai koefisien gelombang refleksi (K_R) dan koefisien gelombang transmisi (K_T) diberikan oleh bentuk pertama dari A_n yaitu saat $n = m = 0$ yaitu A_0 [1]

$$K_R = |A_0| \quad (25)$$

$$K_T = |1 + A_0| \quad (26)$$

$$A_0^* = \alpha_{00}/\eta_{00} \quad (27)$$

$$\eta_{00} = k^2 S_{00}(-h_p, 0) + (k + 2G'/)(k + 2G'/) S_{00}(-d, -h_p) \quad (28)$$

$$\alpha_{00} = -[k^2 S_{00}(-h_p, 0) + k(k + 2G'/) S_{00}(-d, -h_p)] \quad (29)$$

$$S_{00}(-h_p, 0) = \frac{1}{2} \left[\frac{\sinh 2kd - \sinh 2k(h_L)}{2k} + h_p \right] \quad (30)$$

$$S_{00}(-d, -h_p) = \frac{1}{2} \left[\frac{\sinh 2k(h_L)}{2k} + h_L \right] \quad (31)$$

Dimana A_0^* adalah konjugasi bilangan kompleks dari A_0 dan $G'/$ adalah konjugasi bilangan kompleks dari $G' = G/B$, dimana G adalah parameter permeabilitas lubang dan B adalah panjang lubang *box culvert*.

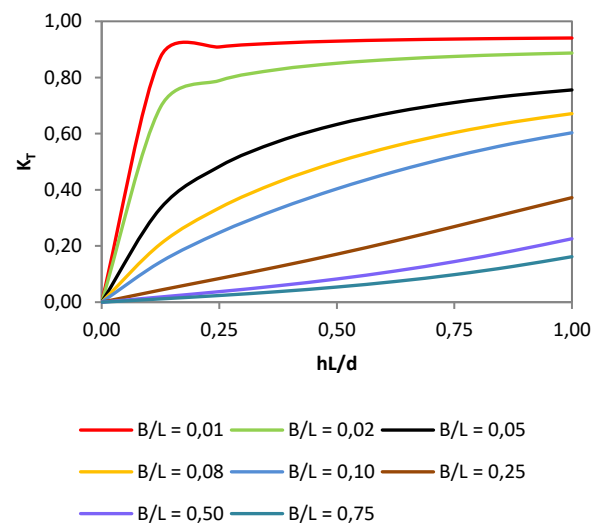
Sedangkan nilai koefisien disipasi energi gelombang (K_D) ditentukan berdasarkan hukum kekekalan energi gelombang [15] seperti pada Persamaan (32).

$$K_D = \sqrt{(1 - K_T^2 - K_R^2)} \quad (32)$$

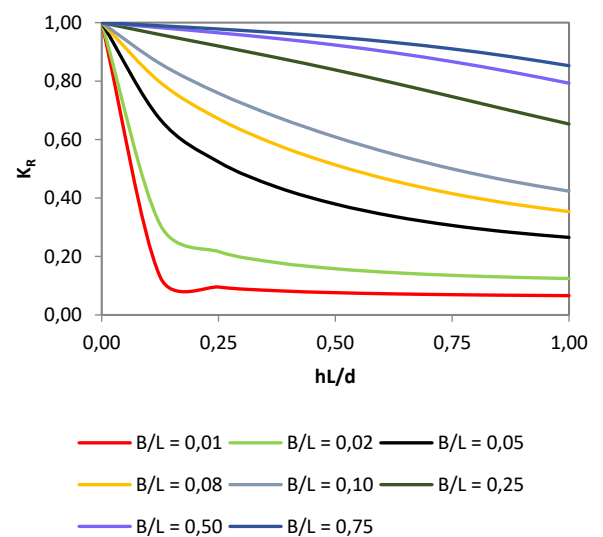
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Nilai K_T , K_R dan K_D fungsi dari h_L/d

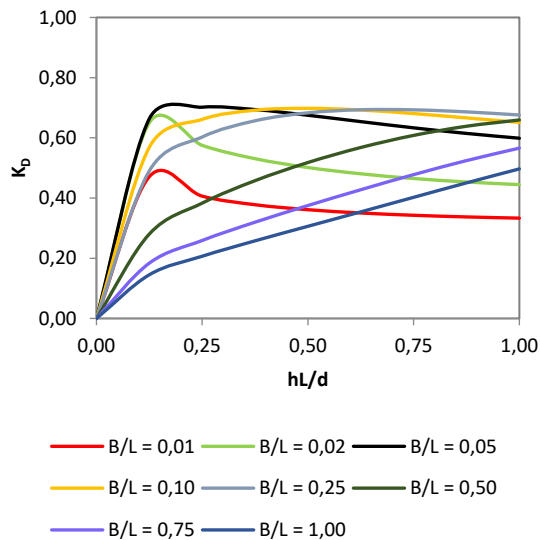
Simulasi model dilakukan dengan menggunakan nilai kedalaman air (d) yang tetap yaitu 0,2 m dan nilai koefisien lubang $f=2$. Nilai tinggi lubang relatif h_L/d divariasi yaitu 0,125; 0,25; 0,5; 0,75 dan 1,0.



Gambar 2. Nilai K_T fungsi dari h_L/d



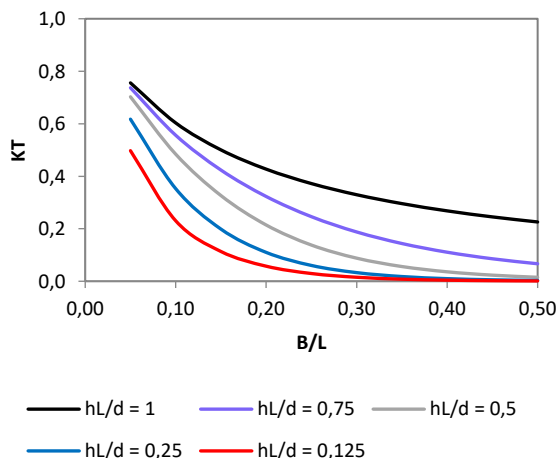
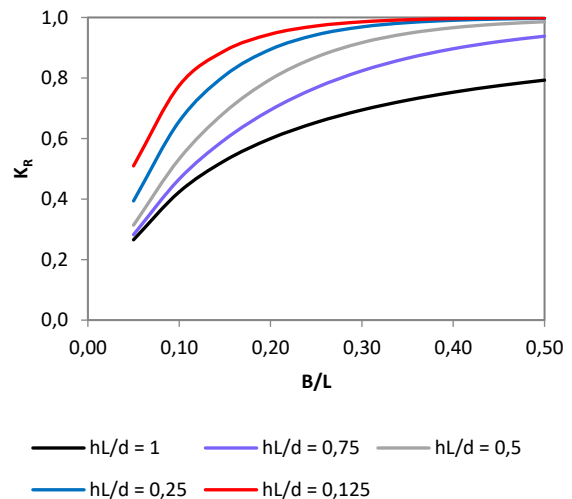
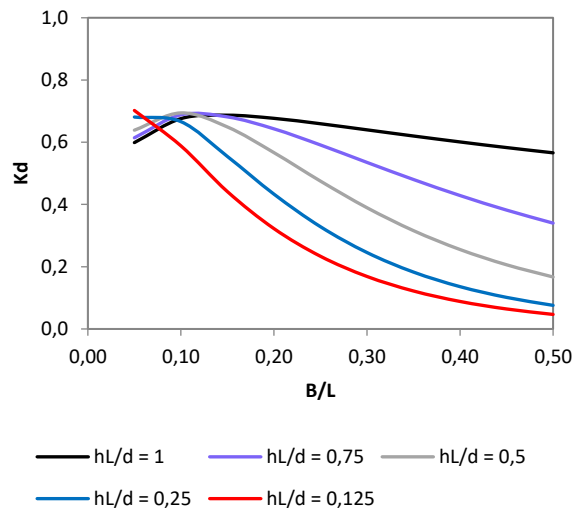
Gambar 3. Nilai K_R fungsi dari h_L/d


Gambar 4. Nilai K_D fungsi dari h_L/d

Berdasarkan Gambar 2, Gambar 3, dan Gambar 4 menunjukkan bahwa nilai K_T meningkat jika nilai h_L/d semakin besar dan sebaliknya nilai K_R menurun. Hal ini terjadi karena semakin besar nilai h_L/d maka porositas struktur semakin besar, akibatnya gelombang semakin mudah diteruskan melewati pemecah gelombang sehingga tinggi gelombang transmisi semakin besar, sebaliknya tinggi gelombang refleksi akan semakin kecil. Sedangkan nilai K_D meningkat jika nilai h_L/d semakin besar dan akan menurun setelah mencapai nilai K_D maksimum. Nilai K_D maksimum adalah sebesar 0,7.

3.2 Nilai K_T , K_R dan K_D fungsi dari B/L

Simulasi model dilakukan dengan menggunakan nilai kedalaman air (d) yang tetap yaitu 0,2 m dan nilai koefisien lubang $f=2$. Nilai panjang lubang relatif B/L divariasikan yaitu 0,01; 0,02; 0,05; 0,08; 0,10; 0,25; dan 0,5.


Gambar 5. Nilai K_T fungsi dari B/L

Gambar 6. Nilai K_R fungsi dari B/L

Gambar 7. Nilai K_D fungsi dari B/L

Berdasarkan Gambar 5, Gambar 6, dan Gambar 7 menunjukkan bahwa nilai K_T menurun jika nilai B/L semakin besar dan sebaliknya nilai K_R meningkat. Hal ini terjadi karena semakin besar nilai B/L maka gesekan turbulensi fluida dengan panjang lubang B semakin besar, akibatnya gelombang lebih cenderung untuk dipantulkan kembali sebagai gelombang refleksi ataupun mengalami reduksi energi, sehingga tinggi gelombang transmisi semakin kecil, sebaliknya tinggi gelombang refleksi akan semakin besar. Sedangkan nilai K_D akan meningkat jika nilai B/L semakin besar dan akan menurun setelah mencapai nilai K_D maksimum sebesar 0,7.

4. KESIMPULAN

1. Nilai K_T akan menurun jika nilai tinggi lubang *box culvert* relatif (h_L/d) semakin kecil dan nilai panjang lubang *box culvert* relatif (B/L) semakin besar dan sebaliknya nilai K_R akan semakin meningkat.

2. Nilai K_D akan meningkat jika nilai h_L/d dan B/L semakin besar, tetapi akan menurun setelah mencapai nilai K_D maksimum. Nilai K_D maksimum adalah sebesar 0,7.

5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] O. S. Rageh and A. S. Koraim, "Hydraulic performance of vertical walls with horizontal slots used as breakwater," *Coast. Eng.*, vol. 57, no. 8, pp. 745–756, 2010.
- [2] K. D. Suh, J. K. Park, and W. S. Park, "Wave reflection from partially perforated-wall caisson breakwater," *Ocean Eng.*, vol. 33, no. 2, pp. 264–280, 2006.
- [3] K. D. Suh, H. Y. Jung, and C. K. Pyun, "Wave reflection and transmission by curtainwall-pile breakwaters using circular piles," *Ocean Eng.*, vol. 34, no. 14–15, pp. 2100–2106, 2007.
- [4] K. D. Suh, Y. W. Kim, and C. H. Ji, "An empirical formula for friction coefficient of a perforated wall with vertical slits," *Coast. Eng.*, vol. 58, no. 1, pp. 85–93, 2011.
- [5] A. S. Koraim, "Hydraulic characteristics of pile-supported L-shaped bars used as a screen breakwater," *Ocean Eng.*, vol. 83, pp. 36–51, 2014.
- [6] L. T. Somervell, S. G. Thampi, and A. P. Shashikala, "Estimation of friction coefficient for double walled permeable vertical breakwater," *Ocean Eng.*, vol. 156, no. February 2017, pp. 25–37, 2018.
- [7] Z. Huang, Y. Li, and Y. Liu, "Hydraulic performance and wave loadings of perforated/slotted coastal structures: A review," *Ocean Eng.*, vol. 38, no. 10, pp. 1031–1053, 2011.
- [8] N. Nurisman, "Efektivitas Submerged Breakwater Berlubang Terhadap Gelombang Datang," *J. Marit. Indones.*, vol. 7, no. 2, pp. 165–175, 2019.
- [9] H. Ahmed, "Wave interaction with vertical slotted walls as a permeable breakwater," Hydro Science (IGAW), Bergische Universitat Wupertal, Germany, 2011.
- [10] G. . Jarlan, "A Perforated Vertical Wall Breakwater," *Dock Harb. Auth.*, vol. XII, no. 486, pp. 394–398, 1961.
- [11] E. Mackay and L. Johanning, "Comparison of analytical and numerical solutions for wave interaction with a vertical porous barrier," *Ocean Eng.*, vol. 199, no. Januari 2020, p. 107032, 2020.
- [12] K. G. Vijay, S. Neelamani, and T. Sahoo, "Wave interaction with multiple slotted barriers inside harbour: Physical and numerical modelling," *Ocean Eng.*, vol. 193, no. October, p. 106623, 2019.
- [13] A. George and I. H. Cho, "Hydrodynamic performance of a vertical slotted breakwater," *Int. J. Nav. Archit. Ocean Eng.*, no. December, pp. 1–11, 2019.
- [14] M. R. Nikoo, I. Varjavand, R. Kerachian, M. D. Pirooz, and A. Karimi, "Multi-objective optimum design of double-layer perforated-wall breakwaters: Application of NSGA-II and bargaining models," *Appl. Ocean Res.*, vol. 47, pp. 47–52, 2014.
- [15] H. Ahmed and a. Schlenkhoff, "Numerical Investigation of Wave Interaction with Double Vertical Slotted Walls.," *Eng. Technol. Int. J. Environ. Ecol. Geol. Min. Eng.*, vol. 8, no. 8, pp. 536–543, 2014.
- [16] O. S. Rageh and A. S. Koraim, "the Use of Vertical Walls With Horizontal Slots As Breakwaters," in *Thirteenth International Water Technology Conference, IWTC*, 2009, no. 12-15 Maret 2009.
- [17] H. A. K. . Ariyaratne, "Efficiency of Perforated Breakwater and Associated Energy Dissipation.," Office of Graduate Studies of Texas AdanM University. USA, 2007.
- [18] N. Yuwono, *Perencanaan Model Skala Hidraulis*. PT. Kanisius Yogyakarta, 2021.
- [19] G. Isaacson, M., Premasiri, S and Yang, "Wave interactions with vertical slotted barrier," *J. Waterw. Port, Coast. Ocean Eng.*, vol. 125, no. 3, p. 159, 1998.
- [20] R. H. Sollitt, C.K., and Cross, "Wave transmission through permeable breakwaters," in *In Proceeding: 13th Coastal Engineering Conference, ASCE, Vancouver*, 1972, pp. 1827–1846.
- [21] X. Yu, "Diffraction of water waves by porous breakwater," *J. Waterw. Port, Coast. Ocean Eng.*, vol. 121, no. 6, pp. 275–282, 1995.
- [22] R. A. Dalrymple and P. A. Martin, "Wave diffraction through offshore breakwaters," *J. Waterw. Port, Coast. Ocean Eng.*, vol. 116, no. 6, pp. 727–741, 1990.