

EFISIENSI HIDRODINAMIS PEMECAH GELOMBANG TEGAK KOMPOSIT BALOK KOTAK DAN TIANG PANCANG DENGAN PENGISI BATUAN

Frans Rabung¹, M. Saleh Pallu², M. Arsyad Thaha², A. Bakri Muhiddin²

Abstract

As an archipelago country that has the longest beach in the world, Indonesia requires a lot of breakwaters (including groin and revetment) not only to protect coasts from scouring but also to keep water in port basins still enough for ship maneuvers and loading-unloading operations. However, up till now in Indonesia, many constructions of breakwater and revetment do not consider coastal engineering and management carefully. There were many breakwaters, groins and revetment built to protect critical beaches, but the design and construction methods were unprofessional so that they did not last long. The closest example is coast of Tanjung Bunga, Makassar. Some groins built on Akkarena beach, were destroyed only after several years. A breakwater built using concrete cylinders, collapsed before it was finished. The cause of the scarcity of building breakwaters are high cost required due to the difficulty of work at sea and the amount of material needed. This study will look for a way out in the form of composite breakwaters by concrete piles, rubble-mound and box-beams. It is known that rubble-mound breakwaters are the most effective for absorbing wave energy, and even if broken they still can function; with light repair to the damage, they will return to even better functioning. The main problem is material required for a rubble-mound breakwater is so much and some shall be in great size. This material is usually obtained from blasting rocky mountain of good quality rock, which is now difficult to do because of environmental issues. By vertical breakwaters, the size and amount of stone required will be much reduced.

Key words: Breakwater; mound; waves; pile; model; hydrodynamic.

Abstrak

Sebagai negara kepulauan yang memiliki pantai terpanjang di dunia, Indonesia membutuhkan banyak pemecah gelombang (termasuk groin dan revetment) tidak hanya untuk melindungi pantai dari penggerusan tetapi juga demi menjaga ketenangan air di kolam pelabuhan untuk manuver kapal dan operasi bongkar-muat. Akan tetapi, sampai sekarang di Indonesia, banyak konstruksi pemecah gelombang dan revetment tidak memperhatikan teknik pantai dan manajemen dengan baik. Ada banyak pemecah gelombang, groin dan revetment yang telah dibangun untuk melindungi pantai-pantai yang kritis, tetapi perencanaan dan konstruksi tidak profesional sehingga mereka tidak bertahan lama. Contoh terdekat adalah Pantai Tanjung Bunga, Makassar. Beberapa groin yang dibangun di Pantai Akkarena rusak hanya dalam beberapa tahun. Sebuah pemecah gelombang yang terbuat dari silinder-silinder beton, runtuh sebelum selesai. Penyebab kelangkaan pembangunan pemecah gelombang (yang baik) adalah biaya tinggi yang dibutuhkan akibat kesulitan bekerja di laut dan kebutuhan material (yang memenuhi syarat) yang sangat banyak. Studi ini mencari jalan keluar berupa pemecah gelombang (vertikal) yang terbuat dari balok-kotak, tiang-pancang dan pengisi beton. Telah diketahui bahwa pemecah gelombang gundukan batu adalah yang paling efektif meredam energi gelombang (baik transmisi maupun refleksi), dan bahkan setelah runtuh pun masih dapat berfungsi; dengan sedikit perbaikan pada kerusakan, ia akan berfungsi lagi semakin baik. Persoalan utama adalah kebutuhan material yang sangat banyak, dan sebahagian harus dalam ukuran besar. Material ini biasanya diperoleh dari peledakan gunung-gunung batu yang berkualitas baik ($SG > 2.7$), hal yang sekarang sulit dilakukan karena issue lingkungan. Dengan pemecah gelombang vertikal, ukuran dan jumlah batu yang dibutuhkan sangat berkurang.

Kata kunci: Pemecah gelombang; gundukan batu; gelombang; tiang pancang; model; hidrodinamis.

1. Program S3 Teknik Sipil, Universitas Hasanuddin. Pos-el: rabungfrans@gmail.com

2. Departemen Teknik Sipil, Universitas Hasanuddin

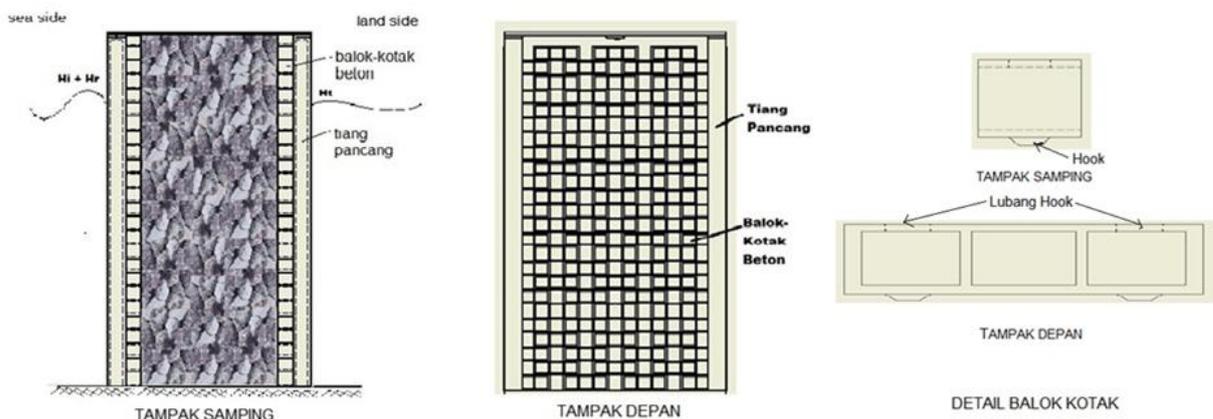
I. PENDAHULUAN

Sebagai negara kepulauan yang memiliki pantai terpanjang di dunia, Indonesia memerlukan banyak pemecah gelombang (termasuk groin dan revetment) bukan saja untuk melindungi pantai dari gerusan tetapi juga untuk menjaga agar air dalam kolam pelabuhan tetap cukup tenang bagi operasi bongkar-muat kapal. Selama ini pembangunan pemecah gelombang dan revetment yang baik sangat terabaikan. Ada banyak groin dan revetment yang dibangun untuk melindungi pantai-pantai yang kritis, tetapi pembangunannya asal jadi sehingga tidak bertahan lama. Contoh yang terdekat adalah pantai Tanjung Bunga di Makassar. Akibat terhentinya suplai material endapan dari sungai Jeneberang karena pembangunan waduk Bilibili, gelombang dari arah Barat menggerus pantai dengan cepat. Beberapa groin yang dibangun di pantai Akkarena, hancur hanya setelah beberapa tahun. Bahkan ada groin yang dibangun menggunakan silinder-silinder beton, runtuh sebelum jadi.

Penyebab langkanya pembangunan pemecah gelombang yang baik adalah mahalnya biaya yang diperlukan akibat sulitnya pekerjaan di laut dan banyaknya material yang dibutuhkan. Ditambah lagi dengan begitu ketatnya persyaratan-persyaratan lingkungan hidup sehingga menyulitkan pengambilan material

dalam jumlah besar dari peledakan gunung-gunung batu. Namun dengan dicanangkannya program “Indonesia Poros Maritim Dunia” dan “Tol Laut” oleh pemerintahan Jokowi-JK maka mau tidak mau kita harus membangun banyak pelabuhan dengan pemecah gelombang yang baik agar bertahan cukup lama melampaui break-even point dari biaya yang dibutuhkan dan manfaat yang diperoleh.

Penelitian ini akan mencari jalan keluar yaitu berupa pemecah gelombang komposit tiang pancang, balok kotak dan pengisi batu (Gambar 1). Telah diketahui bahwa gundukan batu sisi miring adalah pemecah gelombang yang paling efektif menyerap energi gelombang, dan sekalipun rusak tetap dapat berfungsi; kerusakan itu umumnya pada bahagian puncak yang mudah diperbaiki. Setelah diperbaiki, dia akan menjadi lebih efektif lagi karena sisi lautnya lebih datar. Masalah utamanya adalah kebutuhan material batu yang sangat besar. Material ini biasanya diperoleh dari peledakan gunung batu yang berkualitas baik, hal ini sekarang sulit dilakukan selain karena biaya transport yang besar terlebih lagi banyak halangan oleh masalah lingkungan hidup. Dengan membuat gundukan batu vertikal yang ditopang oleh balok-beton dan tiang pancang, volume batu yang dibutuhkan akan sangat berkurang.



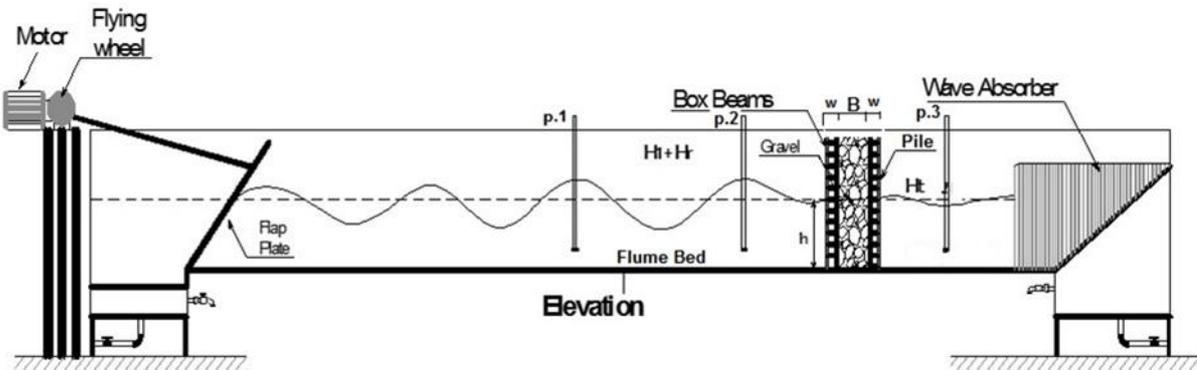
Gambar 1: Sketsa model pemecah gelombang komposit tiang, balok kotak dan batu.

II. METODE

Bila sebuah bangunan ditempatkan di tengah laut, maka keberadaan struktur itu akan merubah pola aliran air di sekitarnya yang menyebabkan satu atau lebih fenomena berikut:

1. Terbentuknya pusaran air di belakang struktur itu.

2. Terjadinya turbulensi aliran baik di depan maupun di belakang struktur.
3. Terjadinya refleksi dan difraksi gelombang.
4. Terjadinya gelombang pecah
5. Terjadinya run-up dan run-down gelombang yang dapat menyebabkan erosi di bagian atas dan/atau dasar laut di depan struktur.

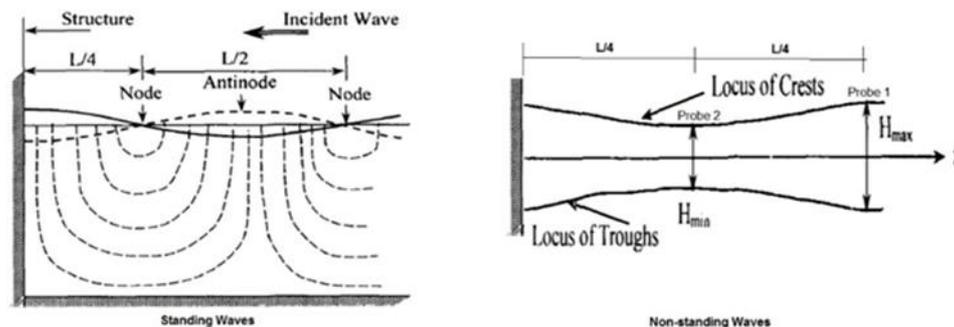


Gambar 2: Sketsa potongan memanjang wave flume yang digunakan dengan posisi model dan instrumentasi.

Fenomena ini menyebabkan kehilangan energi sebagai tambahan atas kehilangan energi yang terjadi dalam tubuh pemecah gelombang itu sendiri. Penelitian ini hanya mempelajari fenomena-fenomena yang sehubungan dengan tujuan utama suatu pemecah gelombang khususnya transmisi, refleksi, kehilangan energi dan penggerusan gelombang.

Eksperimen dilakukan di Laboratorium Teknik Pantai, Departemen Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin. Percobaan-percobaan dijalankan untuk mengukur gelombang transmisi, refleksi, maksimum dan erosi di kaki depan model sebagai akibat adanya pemecah gelombang yang menghalangi jalannya gelombang dengan parameter yang berbeda-beda. Dimensi wave flume adalah panjang 15.0 m, lebar 30 cm dan kedalaman 46 cm (Gambar 2). Mesin pembangkit gelombangnya (wave

paddle) adalah tipe flap, yang terikat engsel di dasar dan terhubung dengan roda gaya (flying wheel) di bagian atasnya dengan motor penggerak yang kecepatannya dapat bervariasi. Gelombang yang dibangkitkan adalah gelombang monochromatic. Tidak ada kebocoran air yang direncanakan ke belakang wave paddle dan terdapat pipa pembuangan di bawah ruang di belakang wave paddle sehingga tidak diperlukan peredam gelombang di belakang wave paddle. Di ujung lainnya terdapat peredam gelombang yang terbuat dari serat sintesis yang bekerja dengan sangat efektif sehingga dengan pandangan visual saja tidak ada tanda-tanda refleksi gelombang. Oleh karena itu model ditempatkan 3 m di depan peredam gelombang ini, 12 m dari pembangkit gelombang untuk mencegah terjadinya reflection dari pembangkit gelombang.

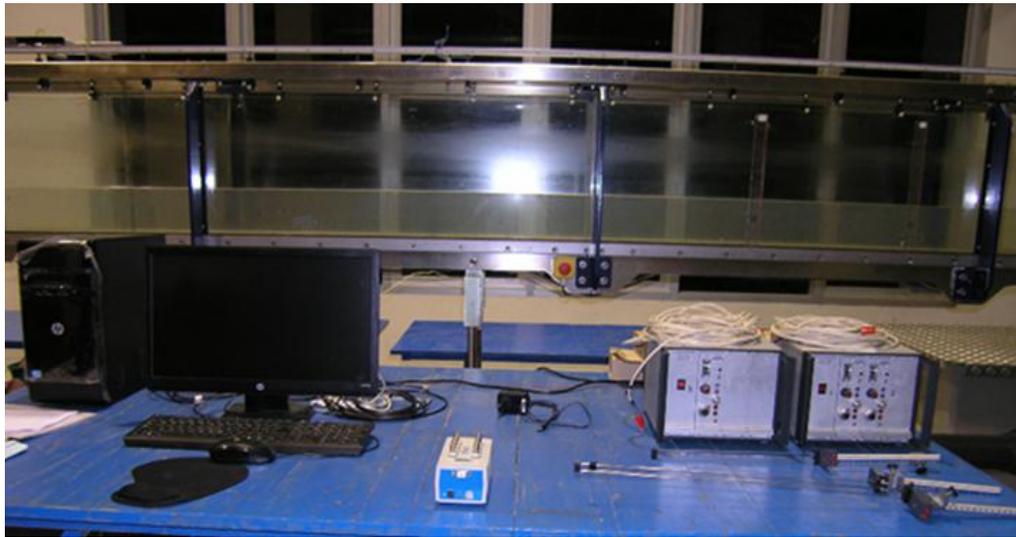


Gambar 3: Posisi Probe 1 dan Probe 2 untuk mengukur Hmax dan Hmin

Frans Rabung, M. Saleh Pallu, M. Arsyad Thaha, & A. Bakri Muhiddin/ Efisiensi Hidrodinamis Pemecah Gelombang Tegak Komposit Balok Kotak Dan Tiang Pancang Dengan Pengisi Batuan/ Pp 86-97

Tiga buah alat pengukur gelombang (*wave probes*) dipakai dalam eksperimen ini, dua ditempatkan di depan model (*probe 1* dan *probe 2*) dan satu di belakang (*probe 3*). Yang dua di depan model berturut-turut diposisikan pada titik-titik *antinode* dan *node* (Gambar 3) dari *envelope* gelombang refleksi untuk mengukur H_{max} dan H_{min} yang dipakai untuk menghitung tinggi gelombang datang (H_i) dan tinggi gelombang refleksi (H_r) seperti pada (Rumus 1 dan 2). Lokasi titik-titik *node* ini ada dua pendapat; pendapat yang konvensional mengatakan pada $0,25L$ dan $0,5L$ dari depan model dimana L adalah panjang gelombang

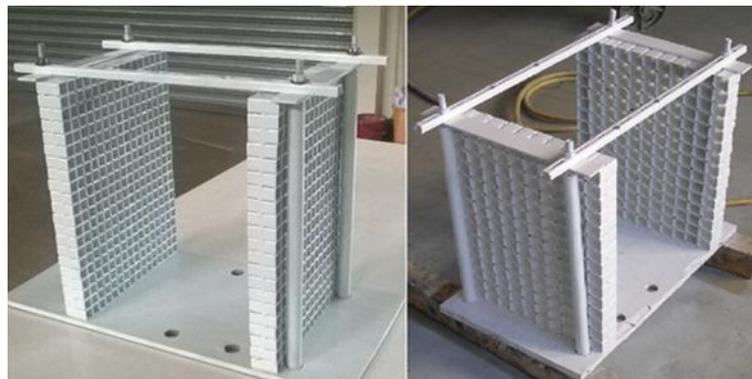
(Kamphuis, 2010), sedang pendapat lain menyatakan pada $0,2L$ dan $0,7L$ menurut Goda dan Suzuki dalam (Rageh and Koraim, 2009). Kedua pendapat tersebut sangat diperhatikan dalam percobaan ini dan tampaknya posisi *node* dan *antinode* memang berubah-ubah terutama oleh periode gelombang. Alat pengukur gelombang yang ketiga (*probe 3*) ditempatkan $1,2$ m di belakang model agar pengaruh-pengaruh turbulensi *vortex* air yang baru keluar dari model dapat dihindari; alat ini untuk mengukur langsung tinggi gelombang transmisi (H_t).



Gambar 4: Instrument yang dipakai dalam penelitian

Seluruh proses mulai dari pembuatan model sampai dengan kalibrasi dan percobaan direkam dalam foto dan video Olympus Camedia C-5060 Wide Zoom. *Wave flume*, *wave probe* dan *wave monitor* adalah buatan Armfield sedang *Analog to Digital Converter* adalah buatan EagleTechnology yang dilengkapi dengan

software WaveView. Sebuah PC dan sebuah laptop dipakai untuk merekam dan menganalisis data. Gambar 4 memperlihatkan instrumentasi ini, sedang Gambar 5 memperlihatkan dua rangka model yang dipergunakan. Total percobaan yang dilakukan dalam eksperimen ini adalah 117 percobaan.



Gambar 5: Rangka Model 1 dan 2

Parameter-parameter berikut dipakai dalam percobaan ini:

- Kedalaman air (h): 20; 25; 30 cm
- Kisaran tinggi gelombang datang (H_i): 6–15 cm
- Periode gelombang datang (T): 0,85; 1; 1,2; 1,5; 1,65 detik
- Kisaran panjang gelombang datang (L): 100 – 270 cm
- Lebar (batu pengisi) model (B): 10; 20; 30 cm
- Lebar dinding balok kotak 1 & 2 (w): 4 cm
- Lebar total model 1 & 2 (B + w): 18; 28; 38 cm
- Tinggi model (D, no-overtopping): 40 cm
- Lebar kotak balok-kotak model 1 & 2 (d): 1,5; 2,5 cm
- Ukuran batu pecah pengisi (batu 1 dan 2): 1 – 2; 2 – 3 cm
- Berat rata-rata batu 1 & 2: 2,84; 24,81 gram/unit
- Porositas batu (n) 1, 2: 0,36; 0,34
- Berat isi butir batu 1, 2 (γ_s): 1,8; 1,8 gram/cm³

Tinggi gelombang hasil pengukuran *probe* 3 dapat langsung dipakai sebagai tinggi gelombang transmisi H_t akibat peredaman energi gelombang oleh model; sedang hasil pengukuran *probe* 1 dan 2 berupa H_{max} dan H_{min} berturut-turut dipakai untuk menghitung tinggi gelombang datang H_i dan tinggi gelombang refleksi H_r menurut rumus:

$$(1)$$

$$(2)$$

Rumus umum energi gelombang dengan tinggi H dan rapat massa cairan ρ per satuan luas permukaan laut adalah:

$$(3)$$

Keseimbangan (kekekalan) energi dapat dituliskan:

$$(4)$$

Dimana E_i adalah energi gelombang datang (E_r adalah energi gelombang refleksi (E_t adalah energi gelombang transmisi (sedang E_L adalah energi yang hilang akibat gesekan dalam tubuh pemecah gelombang. Substitusi nilai-nilai E_i , E_r , dan E_t ke dalam persamaan (4) dan membaginya dengan E_i , menghasilkan:

$$(5)$$

Bila selanjutnya didefinisikan koefisien-koefisien gelombang $C_r = H_r/H_i$, $C_t = E_t/E_i$ dan koefisien energi yang hilang $C_L = E_L/E_i$ maka diperoleh persamaan:

$$(6)$$

III. HASIL DAN DISKUSI

Untuk memastikan keterpakaian (*applicability*) hasil-hasil penelitian ini di lapangan, pemodelan fisik dilakukan dengan menggunakan data angin dan peramalan gelombang pantai Makassar seperti dalam (Rabung and Nurfan, 2012) dan (Rabung et al.) serta skala model yang cukup besar yaitu 1:30 (Hughes, 1993). Seluruh material yang digunakan, yaitu batu 1 dan 2, mempunyai Reynold Number $\geq 10^4$ (van Gent, 1995) sehingga aliran zat cair ditentukan oleh gaya-gaya inersia/gravitasi (Gerhart and Gross, 1985) dengan demikian Froude Number berlaku untuk hukum keserupaan dinamis (*dynamic similitude*).

Selanjutnya analisa dimensi dipergunakan untuk mendapatkan hubungan-hubungan dari parameter-parameter yang berpengaruh, seperti panjang gelombang (L), tinggi gelombang datang H_i , kedalaman air (h), lebar model (B), lebar balok-kotak (w), dan porositas batu pengisi (n). Parameter-parameter ini dijadikan tidak berdimensi dengan membaginya dengan parameter L yang terdapat dalam angka gelombang(k). Hasil analisis menunjukkan efisiensi dari model pemecah gelombang dalam bentuk hubungan-hubungan antara koefisien-koefisien transmisi (C_t), refleksi (C_r) dan kehilangan energi (C_L) dengan parameter-parameter tak berdimensi yang mewakili karakteristik gelombang dan struktur dalam persamaan berikut:

$$(7)$$

Tinggi model (D) tidak dimasukkan sebagai parameter karena sejak awal model ini direncanakan untuk *no-overtopping* agar puncak model dapat dimanfaatkan sebagai jalan atau apron. Demikian pula berat isi butir batu (γ_s) dan berat isi air ($\gamma_w = 1$ gram/cm³) karena perbandingan γ_s/γ_w konstan serta selama percobaan terbukti batu pengisi tidak terpengaruh sama sekali oleh gelombang;

kestabilan struktur ditentukan oleh kekuatan tiang pancang bekerja sama dengan balok-kotak yang mana sudah dapat dianalisa secara numerik sehingga tidak termasuk topik dalam penelitian ini. Periode dan panjang *stroke* dari pembangkit gelombang (*wave paddle*) bertransformasi menjadi panjang dan tinggi gelombang.

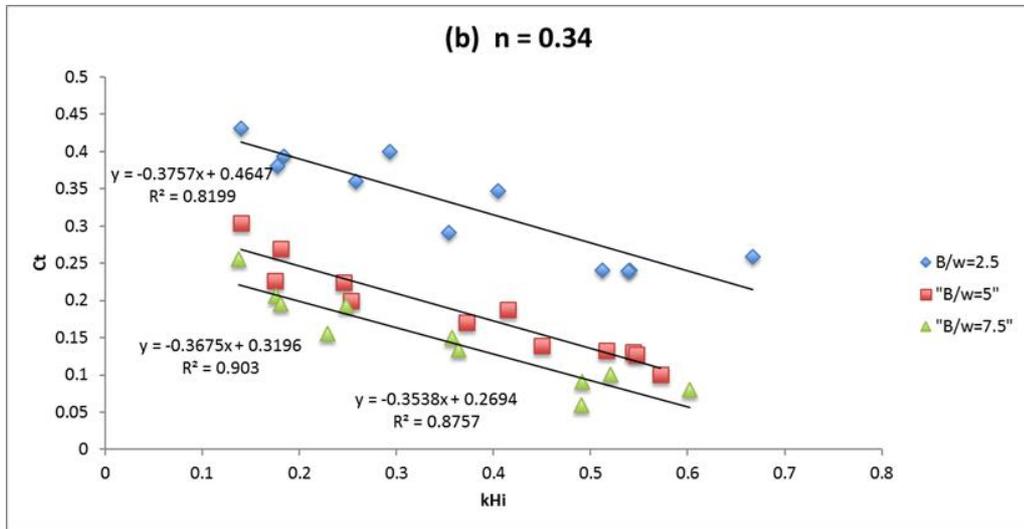
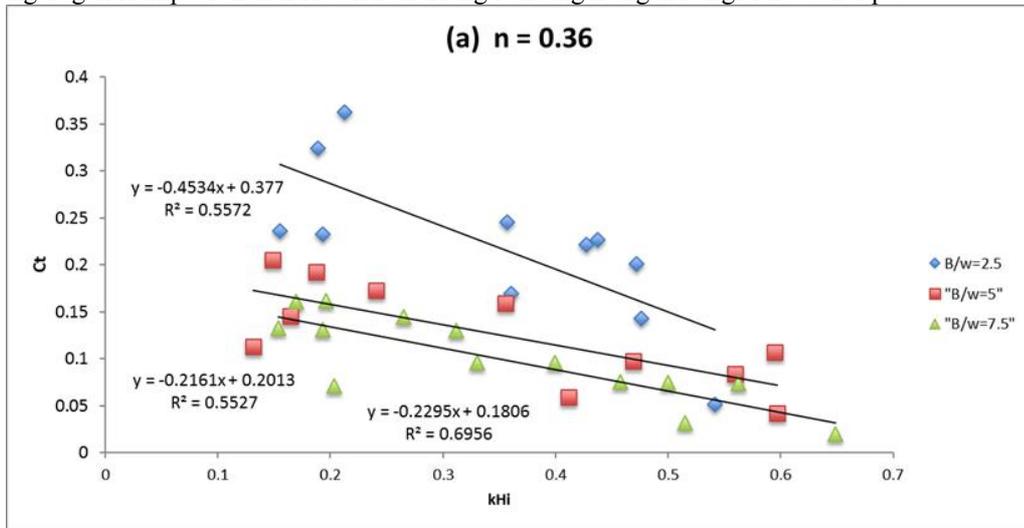
Gambar 6 memperlihatkan hubungan antara koefisien transmisi C_t dengan tinggi gelombang datang H_i dalam bentuk kH_i ($kH_i=2\pi H_i/L$) pada saat perbandingan lebar gundukan batu dengan lebar balok kotak (B/w) adalah 2,5, 5 dan 7,5 untuk masing-masing porositas batu (n) 0,36, dan 0,34. Gambar ini memperlihatkan bahwa koefisien transmisi C_t berkurang saat kH_i bertambah sampai $C_t = 0,05$. Ini berarti bahwa pemecah gelombang ini memperkecil tinggi gelombang datang sampai 95%. Gambar-gambar itu juga secara konsisten memperlihatkan bahwa saat lebar batu pemecah gelombang (B) bertambah atau panjang gelombang (L) berkurang maka nilai C_t akan semakin kecil. Fenomena ini dapat disebabkan oleh dua hal. Pertama, bertambahnya lebar batu B menyebabkan bertambahnya gesekan antara permukaan batu dengan gelombang yang ditransmisikan, sehingga menyebabkan lebih banyak kehilangan energi gelombang. Kedua, dengan bertambah pendeknya gelombang, kecepatan dan percepatan partikel air tiba-tiba berubah dan turbulensi yang diakibatkan oleh perubahan tiba-tiba ini menyebabkan hilangnya energi gelombang (Rageh, 2009). Sementara itu, koefisien transmisi juga berkurang dengan bertambahnya B/w ; pengaruh B sudah dijelaskan di atas, sedang pengaruh w dapat dijelaskan sebagai berikut. Apabila B/w bertambah sedang B tetap berarti w berkurang, artinya berkurangnya w menyebabkan berkurangnya C_t . Namun harus ada nilai minimum dari w sebab balok kotak itu dibutuhkan bukan hanya untuk menahan batu tetapi juga untuk membagi penyebaran energi gelombang dari dasar sampai ke permukaan laut sehingga pengaruhnya terhadap kestabilan sebuah unit batu adalah kecil sekali. Pengaruh porosity menunjukkan semakin besar n maka semakin efektif C_t , namun batasnya masih memerlukan penelitian lebih lanjut.

Gambar 7 memperlihatkan hubungan antara koefisien transmisi C_t dengan kedalaman air h

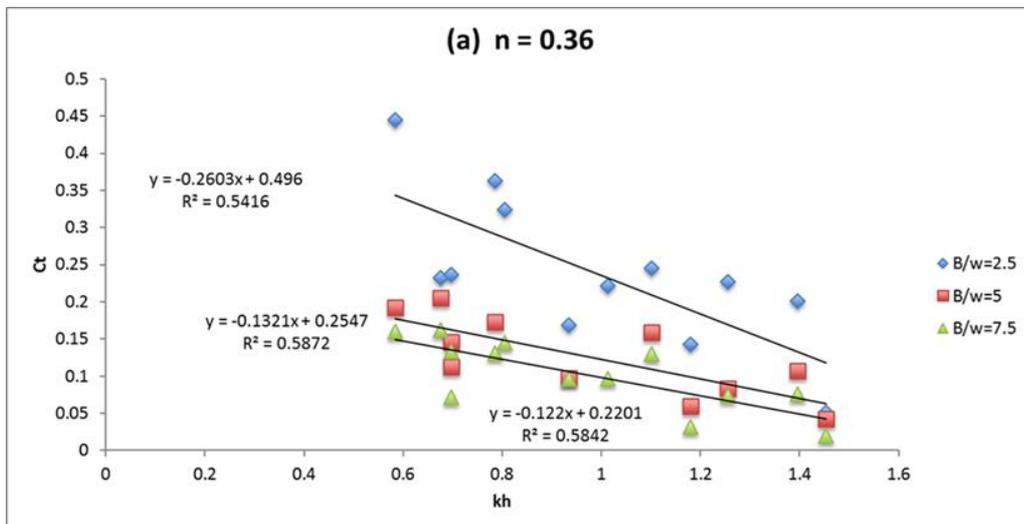
dalam bentuk kh ($kh=2\pi h/L$) pada saat perbandingan lebar gundukan batu dengan lebar balok kotak (B/w) adalah 2,5, 5 dan 7,5 untuk masing-masing porositas batu (n) 0,36, dan 0,34. Gambar ini memperlihatkan bahwa koefisien transmisi C_t berkurang saat kh bertambah sampai $C_t = \pm 0,05$. Ini berarti bahwa pemecah gelombang ini memperkecil transmisi gelombang datang sampai 95%. Gambar-gambar itu juga secara konsisten memperlihatkan bahwa saat lebar batu pemecah gelombang (B) bertambah atau panjang gelombang (L) berkurang maka nilai C_t akan semakin kecil. Sama seperti di atas fenomena ini dapat disebabkan oleh dua hal. Pertama, bertambahnya lebar batu B menyebabkan bertambahnya gesekan antara permukaan batu dengan gelombang yang ditransmisikan, sehingga menyebabkan lebih banyak kehilangan energi gelombang. Kedua, dengan bertambah pendeknya gelombang, kecepatan dan percepatan partikel air tiba-tiba berubah dan turbulensi yang diakibatkan oleh perubahan tiba-tiba ini menyebabkan hilangnya energi gelombang. Sama seperti pada Gambar 6, pengaruh porosity menunjukkan semakin besar n maka semakin efektif C_t , namun perbedaannya tidak terlalu signifikan.

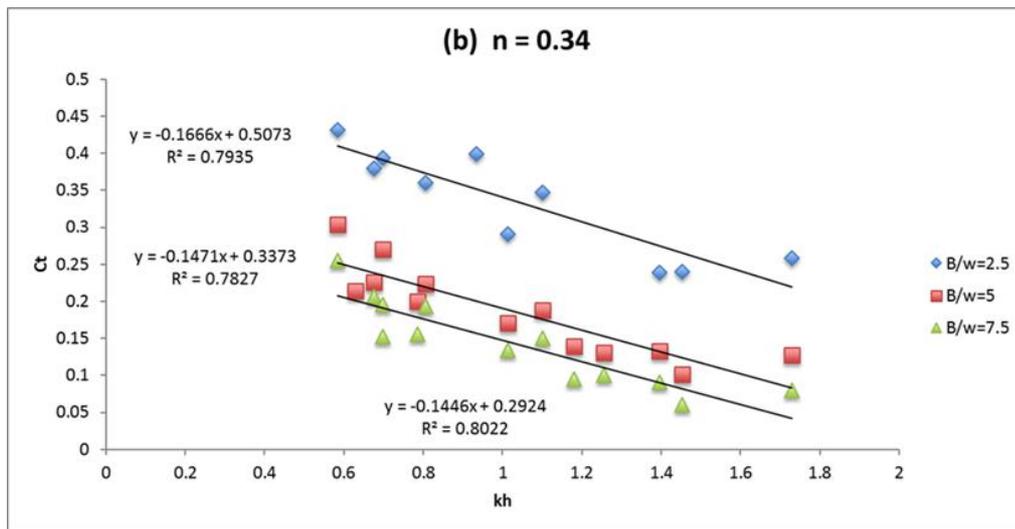
Sementara itu, baik Gambar 6 maupun 7 menunjukkan bahwa koefisien transmisi akan semakin berkurang dengan bertambahnya B/w , namun pertambahan ini semakin kecil pada B/w yang semakin besar. Ini berarti ada batas optimum efektifitas penambahan lebar pemecah gelombang.

Gambar 8 menunjukkan hubungan antara koefisien refleksi C_r dengan tinggi gelombang datang H_i dalam bentuk kH_i pada saat perbandingan lebar gundukan batu dengan lebar balok kotak (B/w) adalah 2,5, 5 dan 7,5 untuk masing-masing porositas batu (n) 0,36, dan 0,34. Terlihat bahwa C_r sedikit lebih efektif dengan bertambahnya H_i tetapi tidak signifikan. Nilai C_r untuk $n=0,36$ berkisar dari 0,55 sampai 0,35 sedang untuk $n=0,34$ dari 0,55 sampai 0,4 tidak terlalu berbeda. Demikian pula pengaruh perubahan B/w sangat kecil. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa pengaruh tingginya gelombang datang H_i terhadap gelombang refleksi H_r pada sistem pemecah gelombang ini relatif stabil.



Gambar 6: Hubungan antara koefisien transmisi C_t dengan tinggi gelombang datang H_i , panjang gelombang L , lebar batu pengisi B , lebar balok kotak w dan porositas batu n .

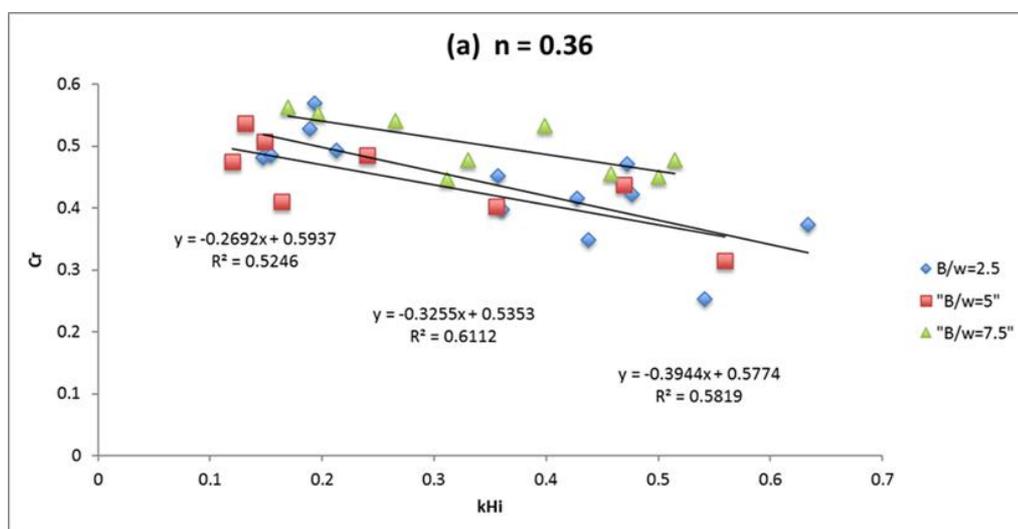


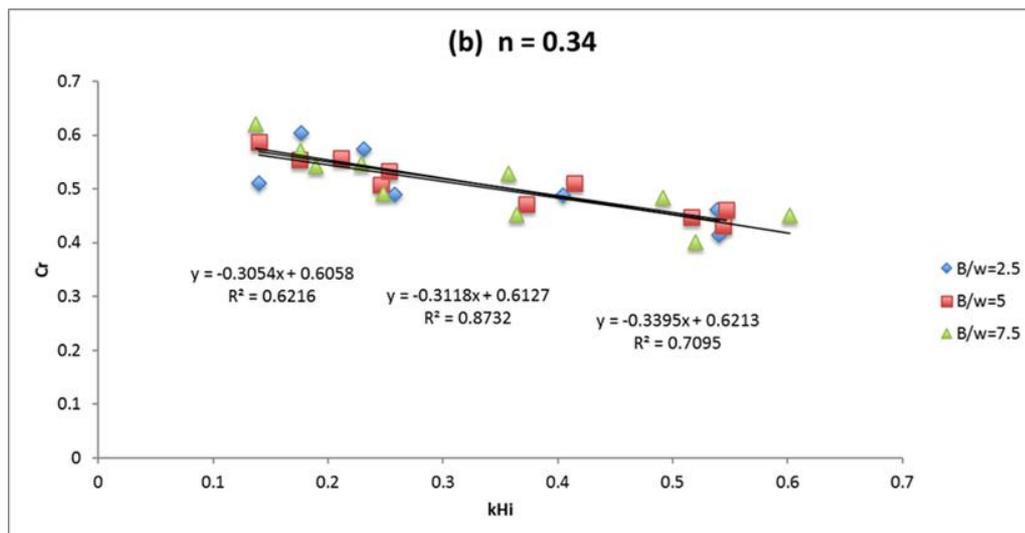


Gambar 7: Hubungan antara koefisien transmisi C_t dengan kedalaman air h , panjang gelombang L , lebar batu pengisi B , lebar balok kotak w dan porositas

Selanjutnya Gambar 9 menunjukkan hubungan antara koefisien refleksi C_r dengan kedalaman air h dalam bentuk kh ($kh=2\pi h/L$) pada saat perbandingan lebar gundukan batu dengan lebar balok kotak (B/w) adalah 2,5, 5 dan 7,5 untuk masing-masing porositas batu (n) 0,36, dan 0,34. Gambar ini memperlihatkan bahwa koefisien refleksi C_r berkurang saat kh bertambah, namun tidak terlalu signifikan. Terlihat bahwa C_r sedikit lebih efektif dengan bertambahnya h . Nilai C_r untuk $n=0,36$ berkisar dari 0,55 sampai 0,3 sedang untuk $n=0,34$ dari 0,55 sampai 0,4 tidak

terlalu berbeda. Demikian pula pengaruh perubahan B/w sangat kecil. Pada porositas $n=0,36$ masih terlihat sedikit bahwa bertambah besarnya B/w menyebabkan semakin efektifnya C_r , tetapi pada nilai $n=0,34$ pengaruh ini semakin kecil; ini menunjukkan bahwa ada nilai optimum B/w sehingga menambah lebar pemecah gelombang tidaklah selalu menambah efektifitas refleksi. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa pengaruh kedalaman air h terhadap gelombang refleksi H_r pada sistem pemecah gelombang ini juga relatif stabil.

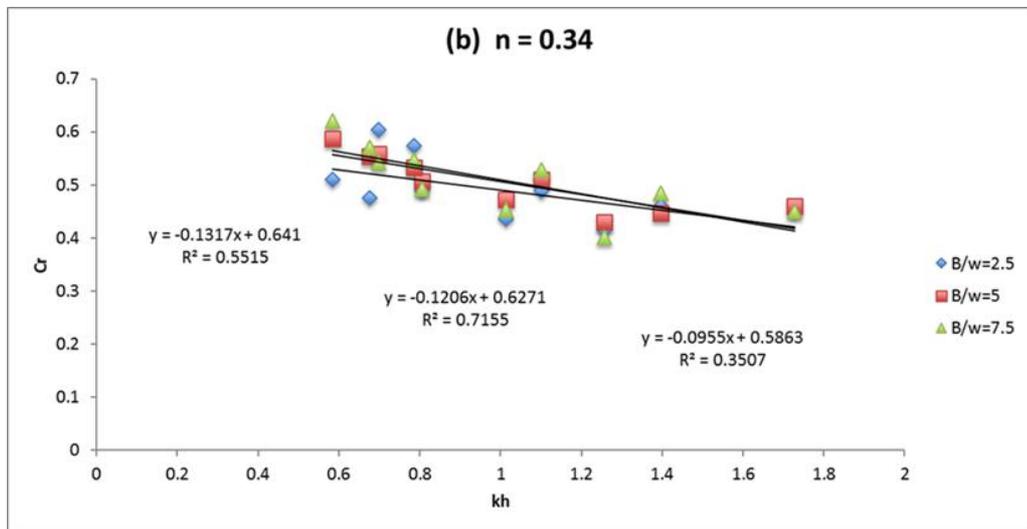
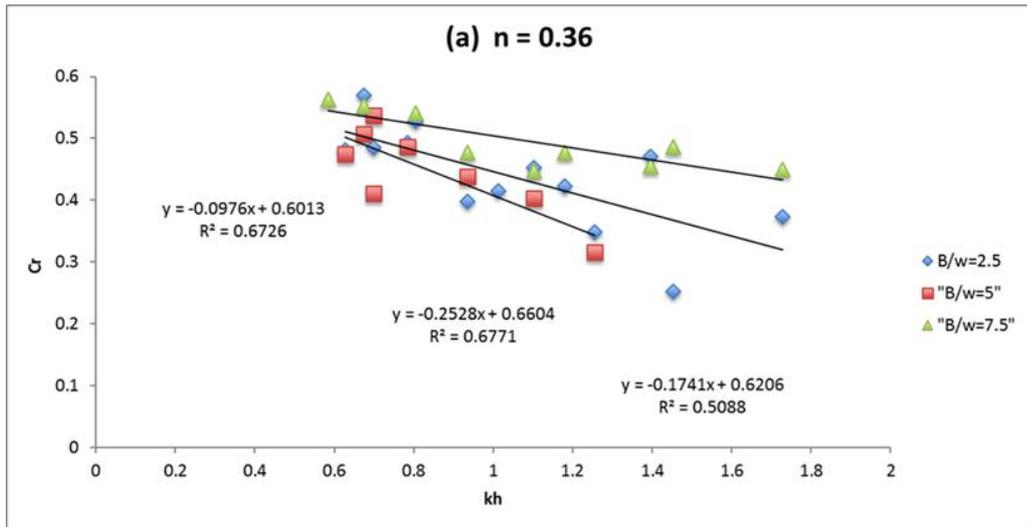




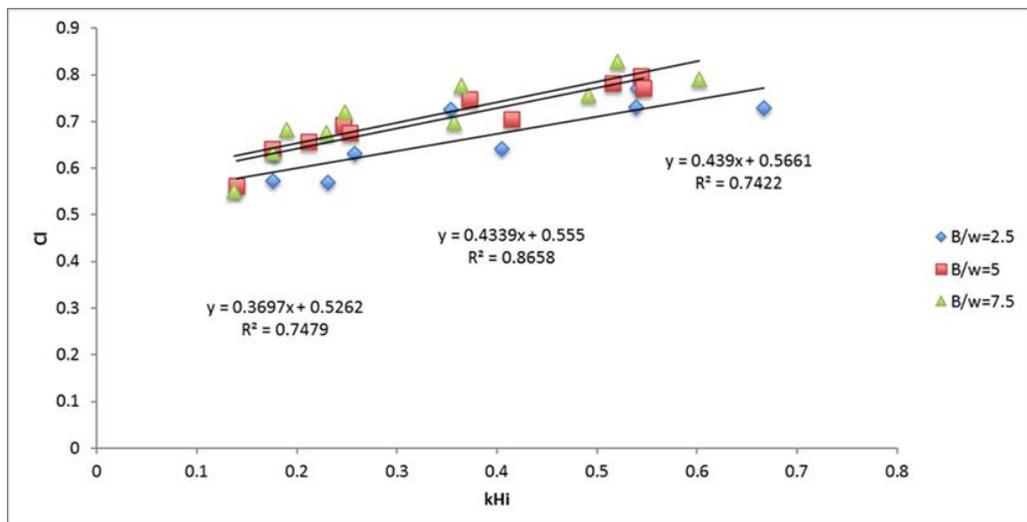
Gambar 8: Hubungan antara koefisien refraksi C_r dengan tinggi gelombang datang H_i , panjang gelombang L , lebar batu pengisi B , lebar balok kotak w dan porositas

Gambar 10 memperlihatkan hubungan antara koefisien kehilangan energi C_l dengan tinggi gelombang datang H_i dalam bentuk kH_i ($kH_i=2\pi H_i/L$) pada saat perbandingan lebar gundukan batu dengan lebar balok kotak (B/w) adalah 2,5, 5 dan 7,5 untuk porositas batu (n) konstan 0,34. Gambar ini memperlihatkan bahwa koefisien kehilangan energi C_l bertambah saat kH_i bertambah. Hal ini memverifikasi hasil-hasil terdahulu tentang nilai-nilai koefisien transmisi C_t dan koefisien refleksi C_r , yaitu bahwa semakin efektif pemecah gelombang meredam transmisi dan refleksi gelombang berarti semakin besar energi gelombang yang terserap dalam batuan pengisi pemecah gelombang. Gambar itu juga secara konsisten memperlihatkan bahwa saat lebar batu pemecah gelombang B bertambah (dalam B/w) maka nilai C_l juga akan semakin besar karena semakin

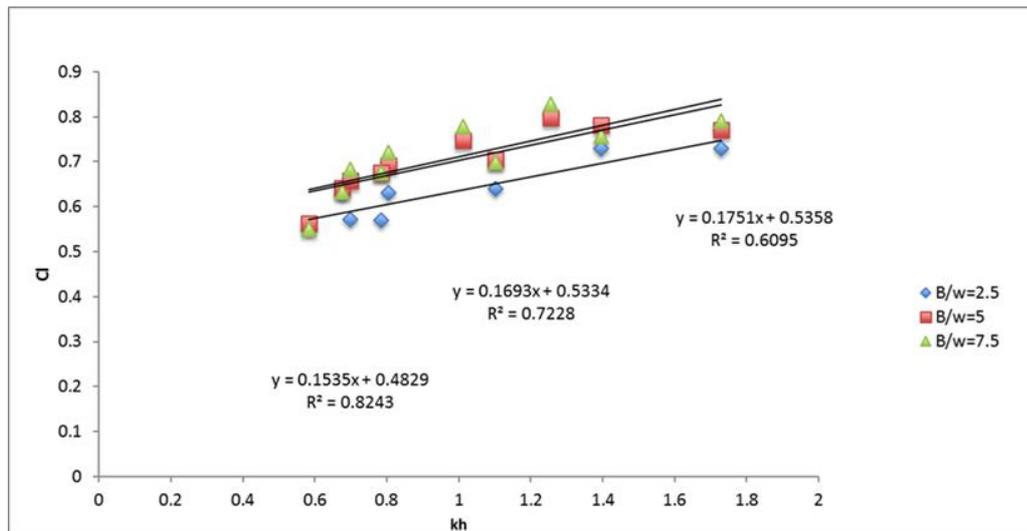
banyak kehilangan energi E_L terhadap energi semula E_i . Namun penambahan itu semakin kecil pada nilai B/w yang semakin besar, artinya ada batas optimumnya. Sama seperti di atas fenomena ini dapat disebabkan oleh dua hal. Pertama, bertambahnya lebar batu B menyebabkan bertambahnya gesekan antara permukaan batu dengan gelombang yang ditransmisikan, sehingga menyebabkan lebih banyak kehilangan energi gelombang. Kedua, dengan bertambah pendeknya gelombang, kecepatan dan percepatan partikel air tiba-tiba berubah dan turbulensi yang diakibatkan oleh perubahan tiba-tiba ini menyebabkan hilangnya energi gelombang.



Gambar 9. Hubungan antara koefisien refraksi C_r dengan kedalaman air h , panjang gelombang L , lebar batu pengisi B , lebar balok kotak w dan porositas batu



Gambar 10. Hubungan antara koefisien kehilangan energi C_1 dengan tinggi gelombang datang H_i , panjang gelombang L , lebar batu pengisi B , lebar balok kotak w dan porositas batu n konstan.



Gambar 11. Hubungan antara koefisien refraksi C_1 dengan kedalaman air h , panjang gelombang L , lebar batu pengisi B , lebar balok kotak w dan porositas batu n konstan.

Gambar 11 memberikan hubungan antara koefisien kehilangan energi C_1 dengan kedalaman air h dalam bentuk kh ($kh=2\pi h/L$) pada saat perbandingan lebar gundukan batu dengan lebar balok kotak (B/w) adalah 2,5, 5 dan 7,5 untuk porositas batu (n) konstan 0,34. Gambar ini juga memperlihatkan bahwa koefisien kehilangan energi C_1 bertambah saat kh bertambah. Hal ini memverifikasi hasil-hasil terdahulu tentang nilai-nilai koefisien transmisi C_t dan koefisien refleksi C_r , yaitu bahwa semakin efektif pemecah gelombang meredam transmisi dan refleksi gelombang berarti semakin besar energi gelombang yang terserap dalam batuan pengisi pemecah gelombang. Gambar itu juga secara konsisten berubah dan turbulensi yang diakibatkan oleh perubahan tiba-tiba ini menyebabkan hilangnya energi gelombang.

IV. KESIMPULAN

Dari hasil studi ini, efisiensi pemecah gelombang tegak sistim balok kotak dan tiang pancang dengan pengisi batu dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Pemecah gelombang sistim ini adalah kombinasi pemecah gelombang vertikal dan gundukan batu yang memanfaatkan keunggulan dari masing-masing tipe. Dari tipe vertikal dimanfaatkan terutama efektifitas dalam pemakaian material, sedang dari tipe gundukan batu dimanfaatkan keunggulannya dalam meredam gelombang.

memperlihatkan bahwa saat lebar batu pemecah gelombang B bertambah (dalam B/w) maka nilai C_1 juga akan semakin besar karena semakin banyak kehilangan energi E_L terhadap energi semula E_i . Namun penambahan itu semakin kecil pada nilai B/w yang semakin besar, artinya ada batas optimum manfaat penambahan lebar pemecah gelombang B . Sama seperti di atas fenomena ini dapat disebabkan oleh dua hal. Pertama, bertambahnya lebar batu B menyebabkan bertambahnya gesekan antara permukaan batu dengan gelombang yang ditransmisikan, sehingga menyebabkan lebih banyak kehilangan energi gelombang. Kedua, dengan bertambah pendeknya gelombang, kecepatan dan percepatan partikel air tiba-tiba

2. Pemecah gelombang sistim ini relatif mudah dibuat karena semua peralatan dan material yang dibutuhkan dapat disesuaikan dengan ketersediaannya di lapangan. Ukuran balok-kotak, tiang pancang serta batu pengisi dapat dibuat sesuai ketersediaan alat-alat berat di lapangan. Kran dan alat pancang dengan kapasitas 30-50 ton sudah banyak tersebar sampai ke pulau-pulau kecil di Indonesia. Ukuran batu pengisi dapat disesuaikan dengan ukuran lubang balok-kotak atau sebaliknya, sehingga pengisian batu dengan orange bucket tidak akan menjadi masalah.
3. Karena mudah dibuat maka biaya pembuatannya akan lebih murah pula, terutama dari segi produksi material batu pengisi. Pada sistim pemecah gelombang gundukan batu, masalah terbesar adalah penyediaan batu pelindung (armor stones) yang beratnya bisa sampai beberapa ton tiap

- unitnya. Ini memerlukan peledakan gunung-gunung batu yang tidak efisien dan sekarang ini akan sangat ditentang oleh lembaga-lembaga lingkungan hidup.
4. Sistem ini dapat dimanfaatkan baik sebagai pemecah gelombang di lepas pantai maupun sebagai groin, revetment, atau sea wall di garis pantai untuk melindungi pantai.
 5. Model ini dibuat dengan prinsip no-overtopping sehingga sisi dalam pemecah gelombang dapat dimanfaatkan sebagai dermaga untuk segala cuaca. Dengan demikian dua kendala besar pada pelabuhan-pelabuhan kecil terutama di Indonesia bahagian timur dapat diatasi, yaitu pertama biaya untuk membuat dermaga dan pemecah gelombang terpisah yang bisa-bisa lebih mahal dari pada biaya dermaga sendiri. Kedua, keharusan membuat dua dermaga yang terletak pada dua sisi bersebelahan dari pulau yang sama untuk menghindari gelombang musim barat atau timur.
 6. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa peredaman gelombang transmisi, C_t , dari sistem ini dapat mencapai 90% bahkan 95%, sedang peredaman gelombang refleksi, C_r , dapat mencapai 70%. Sebaliknya dissipasi (penyerapan) energi gelombang datang dapat mencapai 80%. Jadi sangat efektif.
 7. Meskipun penambahan lebar pemecah gelombang, B , secara umum akan memberikan hasil-hasil yang lebih efektif namun percobaan ini menunjukkan ada batas-batas yang optimum.
 8. Dengan keunggulan-keunggulan seperti yang diuraikan di atas, diharapkan pemecah gelombang komposit sistem tiang pancang dengan pengisi batu dapat menjadi jalan keluar (breakthrough) terhadap kesulitan membangun pemecah gelombang untuk pelabuhan-pelabuhan kecil pada pulau-pulau yang tersebar di seluruh Indonesia terutama bahagian timur. Dengan demikian hasil studi ini dapat menunjang suksesnya program pemerintah membangun sistem toll laut dan benua maritim serta Indonesia sebagai poros maritim dunia yang merupakan satu-satunya jalan bagi Indonesia untuk survive ke masa depan.
- Hughes, S. A. (1993). *Physical Models and Laboratory Techniques in Coastal Engineering*. World Scientific, Singapore, p 130.
- Kamphuis, J.W. (2010). *Introduction to Coastal Engineering and Management*. World Scientific, Singapore, pp 47-49.
- Rabung, F. and Nurfan, N. (2012). *Pola angin pembangkit gelombang yang berpengaruh atas morfologi dan bangunan pantai di sekitar Makassar*. Prosiding Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
- Rabung, F.; Pallu, M. S.; Thaha, M.A. and Muhiddin, A. B. (2016). *Wave predictions and deformations along Makassar coast*. International Conference Himpunan Ahli Teknik Hidraulik Indonesia. Denpasar, Bali, August 2016
- Rageh, O. S. (2009). *Hydrodynamic efficiency of vertical thick porous breakwaters*. Thirteenth International Water Technology Conference, IWTC 13 2009, Hurghada, Egypt, pp 1659-1671
- Rageh, O. S. and Koraim, A. S. (2009). *The use of vertical walls with horizontal slots as breakwaters*. Thirteenth International Water Technology Conference, IWTC 13 2009, Hurghada, Egypt, pp 1689-1710.
- van Gent, M. R. A. (1995). *Porous flow through rubble-mound material*. Journal of Waterway Port Coastal and Ocean Engineering, May 1995, 121:176-181. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-950X\(1995\)121:3\(176\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-950X(1995)121:3(176))

REFERENSI

- Gerhart, P. M. and Gross, R. (1985). *Fundamentals of Fluid Mechanics*. Addition-Wesley Publishing Company, Sidney, p.167.