

KARAKTERISTIK HIDRAULIK DAN PENGEMBANGAN BLOK BETON TERKUNCI TIPE KUBUS KAKI ENAM BERDASARKAN UJI MODEL FISIK 2D

HYDRAULIC CHARACTERISTICS AND DEVELOPMENT OF HEXAPOD TYPE CONCRETE BLOCK BASED ON 2D PHYSICAL MODEL

Nuryanto Sasmito Slamet¹⁾, Marta Nugraha Hidayat²⁾

^{1,2)} Peneliti Pertama Bidang Bangunan Hidraulik dan Geoteknik Keairan
Pusat Litbang Sumber Daya Air
e-mail: nss_f1@yahoo.com

Diterima: 06 Oktober 2013 :Disetujui: 28 November 2013

ABSTRAK

Pengembangan Blok Beton Terkunci (BBT) diinisiasi dalam bidang pengamanan pantai untuk mengamankan dan melindungi infrastruktur di daerah pantai dari bahaya gelombang. Namun demikian dengan kemudahan dan keseragaman yang baik dari Blok Beton, maka adaptasi Blok Beton dalam bidang sungai mulai dikembangkan. Kerusakan yang terjadi pada beberapa BBT-TKE di lapangan dapat dikelompokkan pada kerusakan susunan di lapangan serta kerusakan strukturnya. Kelemahan ini diperbaiki dan dijadikan acuan sebagai dasar untuk pengembangan BBT-TKE. Untuk mendapatkan karakteristik gerak mula BBT-TKE maka uji model hidraulik dua dimensi dilaksanakan di saluran kaca. Penyelidikan ini menggunakan model tanpa distorsi dengan skala model 1:33 $\frac{1}{3}$. Penyelidikan di fokuskan pada kecepatan minimal yang dapat menggerakkan model BBT-TKE. Hasil penyelidikan menunjukkan bahwa material BBT-TKE mempunyai bagian paling lemah pada susunan paling. BBT-TKE mengalami penurunan kinerja dengan bertambahnya jumlah lapisan yang disusun akibat dari efek pembendungan yang terjadi. Secara satuan pengembangan BBT Tipe Kubus Kaki Enam hasil pengembangan dapat meningkatkan kecepatan aliran minimal yang menggerakkan dari 1,3 m/s menjadi 2,07 m/s. Pengujian secara tersusun menunjukkan rentang pergerakan BBT Tipe Kubus Kaki Enam hasil pengembangan berkisar pada kecepatan 0,55 m/s hingga 3,21 m/s, sedangkan BBT Tipe Kubus Kaki Enam berada pada kisaran 0,7 m/s hingga 1,7 m/s.

Kata kunci: Angka Froude, blok beton terkunci tipe kubus kaki enam (BBT-TKE), kecepatan gerak mula, model tanpa distorsi 2D, skala model

ABSTRACT

The development of Concrete Bloks were initiated from coastal protection to protect and maintain coastal infrastructures from wave and storm surge. The uniformity of Concrete Blocks initiate an adaptation of Concrete Blocks in the river field. Depreciation on applied Concrete Blocks Hexapod Type can be distinguish into two kinds, system breakdown and structures breakdown. To obtain initial movement of Concrete Blocks Hexapod Type, a two dimentional hydraulic model test was conducted. The model is an undistorted model with the scale of 1:33 $\frac{1}{3}$. The model test was focused on minimum velocity to initiate the Concrete Blocks Hexapod Type movement. The model shows Concrete Blocks Hexapod Type has a weakness area on the downstream area of the formation. An increase of layer in the formation of Concrete Blocks Hexapod Type is not significantly increase the performance. Individually, the development of Concrete Blocks Hexapod Type has increase the minimum velocity from 1,3 m/s into 2,07 m/s. Formation of Concrete Blocks Hexapod Type result from the development has minimum velocity range from 0,55 m/s up to 3,21 m/s, while original one is in the range of 0,7 m/s up to 1,7 m/s.

Keywords : Froude number, hexapod concrete block, initial movement, 2D undistorted hydraulic model, model scale

PENDAHULUAN

Pemanfaatan material alternatif dalam bidang sumber daya air sedang mengalami perkembangan dengan berkembangnya material konstruksi yang lebih seragam, cepat dalam pelaksanaan konstruksi serta mempunyai ketahanan yang kuat. Material Blok Beton Terkunci (BBT) sebagai bahan konstruksi di bidang sungai mengadaptasi dari kesuksesan pemanfaatan material sejenis pada bidang pantai sebagai bahan penyusun *breakwater*, tanggul laut dan lain – lain.

Perkembangan material ini bermula pada tahun 1950 an di negara Perancis dengan dikembangkannya Blok Beton untuk perlindungan pantai berbentuk tetrapod. Secara teknis pembagian Blok Beton dalam bidang pantai dibedakan dalam hal cara penyusunan, jumlah lapisan, serta bentuk yang ada. Sedangkan stabilitas Blok Beton yang ada dibedakan akibat dari berat sendiri, kuncian antar Blok Beton, serta gesekan yang terjadi antar Blok Beton (Bakker, 2003).

Aplikasi yang diterapkan dalam bidang sungai oleh Pusat Penelitian Sumber Daya Air dilaksanakan dengan mempertimbangkan aspek kuncian yang ada antar Blok Beton Pusair (2003). Cara penyusunan yang telah diterapkan dalam aplikasi Blok Beton untuk pengamanan bangunan melintang sungai berupa penyusunan acak dengan jumlah lapisan bervariasi lebih dari satu lapis.

Penelitian yang dilaksanakan melakukan pendekatan gerak mula partikel untuk mengetahui kecepatan aliran minimal yang dapat menggerakkan Blok Beton terkunci yang diuji. Gerak mula partikel adalah pergerakan awal partikel sedimen akibat dari lebih besarnya gaya seret kritis daripada tahanan geser yang dimiliki. Gaya geser kritis ini terjadi akibat dari kenaikan kecepatan air hingga melebihi kecepatan minimal yang dapat menggerakkan (Chih Ted Yang 1996).

METODOLOGI

Penelitian ini dilaksanakan sebagai tindak lanjut dari informasi kerusakan yang terjadi pada Blok Beton Terkunci (BBT) yang pernah diterapkan di lapangan. Penerapan yang dilaksanakan pada rentang waktu tahun 2003 – 2004 di hilir beberapa bangunan bendung telah mengalami perubahan secara signifikan sehingga

mengakibatkan beberapa Blok Beton Terkunci yang diterapkan mengalami kerusakan secara susunan dan strukturnya. Kerusakan ini menyebabkan menurunnya performa dari BBT yang diterapkan di lapangan, sehingga pada tahapan berikutnya dapat mengganggu stabilitas bangunan air di udiknya.

Tahapan pelaksanaan dalam penelitian ini adalah:

- 1 Monitoring dan evaluasi kondisi BBT tipe Kubus Kaki Enam lapangan.
- 2 Pengembangan dan pengujian BBT tipe Kubus Kaki Enam di saluran kaca.

Secara garis besar pelaksanaan penelitian BBT Tipe Kubus Kaki Enam dan pengembangannya dilaksanakan dengan melaksanakan monitoring dan evaluasi terhadap BBT eksisting yang pernah diterapkan di lapangan. Pada tahapan ini akan diidentifikasi jenis kerusakan yang terjadi pada BBT yang diterapkan di lapangan. Identifikasi awal kerusakan yang terjadi di lapangan ini digunakan sebagai masukan dan acuan untuk pengembangan BBT Tipe Kubus Kaki Enam. Sebagai material alternatif, BBT Tipe Kubus Kaki 6 diperbandingkan dengan batu boulder untuk dapat mengetahui faktor-faktor kelebihanannya.

Kelemahan yang ada pada BBT Tipe Kubus Kaki Enam eksisting ditindaklanjuti dengan mengembangkan BBT Tipe Kubus Kaki Enam yang mengakomodir kelemahan pada BBT versi sebelumnya. Uji model fisik dilaksanakan untuk mendapatkan karakteristik dari BBT Tipe Kubus Kaki Enam hasil pengembangan. Sebagai pertimbangan praktis, kecepatan aliran digunakan sebagai parameter yang mempengaruhi pergerakan awal BBT di lapangan.

Monitoring dan Evaluasi BBT Lapangan

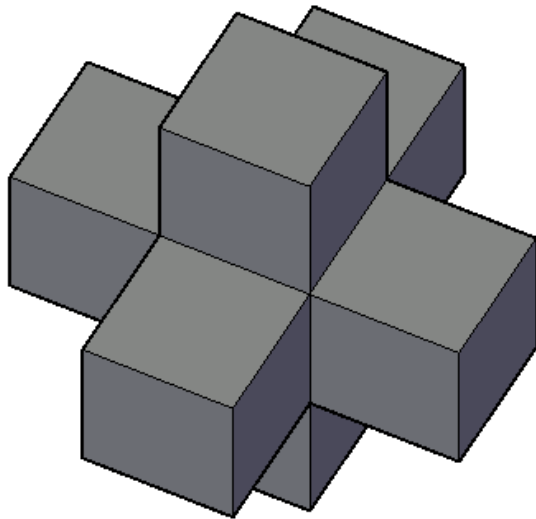
BBT Tipe Kubus Kaki Enam pernah diterapkan di hilir Bendung Gerak Pamarayan Baru serta Bendung Karet Jatimlerek. Namun demikian terdapat perbedaan jarak antara lokasi kedua susunan BBT Tipe Kubus Kaki Enam yang ada di lapangan, dimana lokasi BBT Tipe Kubus Kaki Enam di hilir Bendung Gerak Pamarayan Baru berada \pm 400 m di hilir peredam energi yang ada, sedangkan pada Bendung Karet Jatimlerek terletak tepat di hilir peredam energi yang ada. Penerapan BBT Tipe Kubus Kaki Enam di hilir Bendung Karet Jatimlerek dikombinasikan dengan tetrapod.



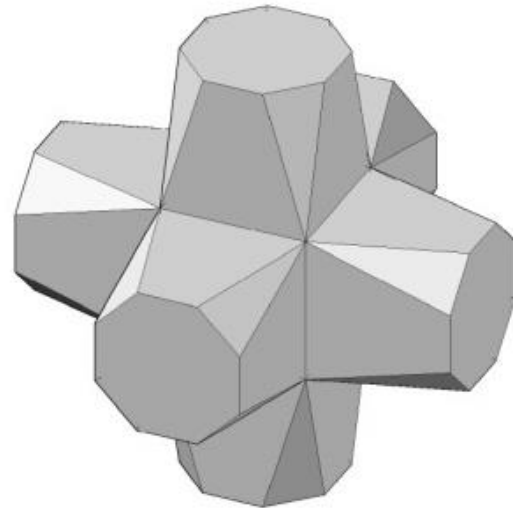
Gambar 1 Kondisi BBT di hilir Bendung Gerak Pamarayan Baru



Gambar 2 Kondisi BBT di hilir Bendung Karet Jatimlerek



Gambar 3 Desain Awal BBT Kubus Kaki Enam



Gambar 4 Desain Pengembangan BBT Kubus Kaki Enam

Perbedaan jarak ini menyebabkan adanya perbedaan kecepatan aliran yang terjadi di sekitar BBT Tipe Kubus Kaki Enam yang ada di lapangan. Berikut adalah kondisi BBT Tipe Kubus Kaki Enam yang ada di lapangan.

Pengamatan kondisi BBT di lapangan menunjukkan kerusakan pada BBT terjadi di hilir Bendung Karet Jatimlerek (Gambar 2), kerusakan yang terjadi adalah terkelupasnya selimut beton yang ada serta patahnya lengan BBT Tipe Kubus Kaki Enam yang diterapkan di lapangan. Identifikasi kerusakan ini tidak terjadi pada BBT yang diterapkan di hilir Bendung Gerak Pamarayan Baru (Gambar 1).

Pengembangan dan Pengujian BBT Tipe Kubus Kaki Enam

Identifikasi kerusakan BBT yang diterapkan di lapangan digunakan sebagai acuan dalam mengembangkan BBT versi pengembangan,

dalam hal ini disebut BBT Tipe Kubus Kaki Enam V.1. Indikasi kerusakan BBT tipe lain yang diterapkan di hilir Bendung Karet Jatimlerek tidak ditemukan pada BBT Tipe Tetrapod di lapangan. Secara bentuk, Tetrapod mempunyai bentuk yang lebih aerodinamis sehingga tahanan terhadap tekanan air lebih rendah dibandingkan bentuk BBT Tipe Kubus Kaki Enam .

Identifikasi bentuk awal ini digunakan untuk mengembangkan BBT menjadi bentuk yang lebih *streamline* sehingga tahanan terhadap tekanan air yang terjadi menjadi lebih kecil dibandingkan dengan kondisi eksisting. Pengembangan dilaksanakan dengan memangkas dimensi pada bagian kaki-kaki kubusnya sehingga menjadi lebih kecil pada bagian ujungnya. Perubahan BBT Tipe Kubus Kaki Enam yang dikembangkan dapat dilihat pada Gambar 3 sampai Gambar 6.

Gambar tersebut adalah perbedaan antara BBT Kubus Kaki Enam eksisting (Gambar 3 dan 5)



Gambar 5 Model BBT Kubus Kaki Enam Skala 1:33%



Gambar 6 Model BBT Kubus Kaki Enam Hasil Pengembangan Skala 1:33%

dengan perubahannya (Gambar 4 dan 6). Pengembangan dilaksanakan dengan memangkas bagian kaki kubus menjadi segi delapan sehingga tahanan terhadap air menjadi berkurang karena bidang kontak terhadap air mengecil. Pengcilan kaki-kaki BBT Kubus Kaki Enam yang dilakukan juga dapat memperbesar faktor kunci antar BBT yang ada karena kaki kubus hasil pengembangan dapat lebih masuk ke rongga antar BBT. Pengembangan BBT ini kemudian diuji model fisiknya dalam saluran kaca untuk mempelajari karakteristik hidraulik dari BBT eksisting serta pengembangannya.

TINJAUAN PUSTAKA

Tipe-tipe kesebangunan hidraulika

Kesebangunan yang dipakai untuk mengembangkan parameter tidak berdimensi pada hubungan model-prototipe terdiri dari kesebangunan geometris, kinematis dan dinamis dengan mempertimbangkan dimensi.

a) Kesebangunan geometris

Kesebangunan geometris antara model dan prototipe tercapai jika semua dimensi (ukuran panjang) yang bersesuaian antara model dan prototipe adalah sama, dan ini merupakan persyaratan utama yang harus dipenuhi oleh skala model. Perbandingan ini dinamakan skala geometris. Yang termasuk dalam kelompok kesebangunan geometris adalah :

1. Panjang, lebar
2. Tinggi, kedalaman
3. Luas
4. Volume, isi

b) Kesebangunan kinematis

Kesebangunan kinematis antara model dan prototipe terpenuhi jika garis alirannya serupa secara geometris dan semua besaran yang bergantung waktu mempunyai perbandingan yang konstan. Perbandingan ini biasa disebut skala waktu. Yang termasuk dalam kelompok kesebangunan kinematis adalah:

1. Waktu
2. Frekuensi
3. Kecepatan
4. Percepatan
5. Gravitasi
6. Debit
7. Debit persatuan lebar

c) Kesebangunan dinamis

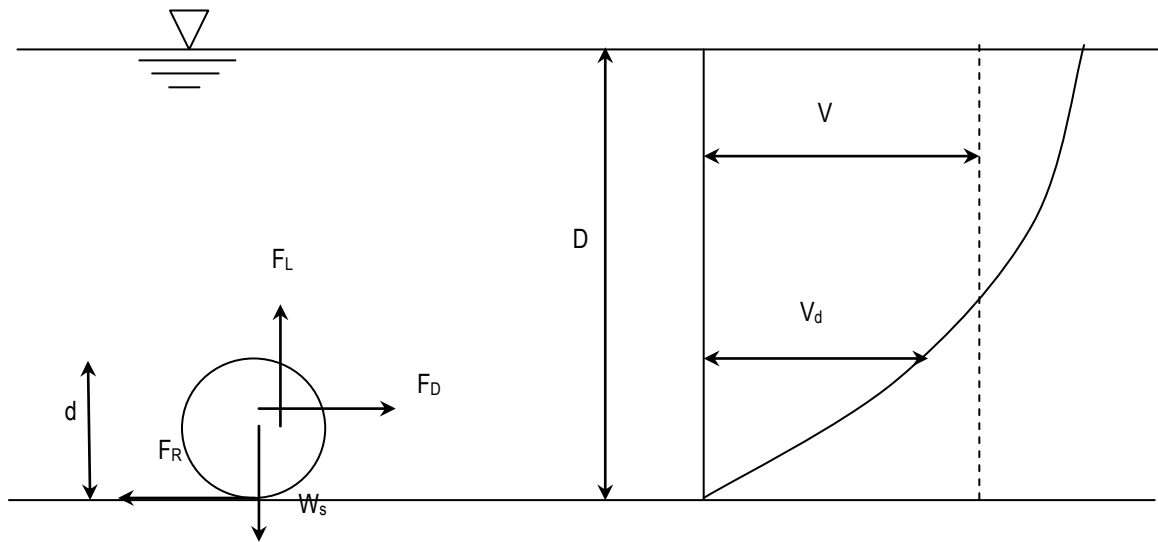
Kesebangunan dinamis antara model dan prototipe terpenuhi jika gaya-gaya yang bekerja pada titik-titik yang bersesuaian antara model dan prototipe mempunyai perbandingan yang konstan. Perbandingan ini disebut skala gaya.

Kesebangunan dinamis selalu tercapai dan memasuki kesebangunan kinematis dan dinamis. Sehingga kunci yang diperlukan adalah menjamin bahwa semua gaya yang bekerja pada model dapat direproduksi dengan perbandingan konstan terhadap prototipe. Yang termasuk dalam kelompok kesebangunan dinamis adalah:

1. Massa
2. Impuls
3. Viskositas dinamis
4. Rapat massa
5. Gaya
6. Kerja
7. Momen

Tabel 1 Skala Model Fisik

| BESARAN | LAMBANG NOTASI | SKALA BESARAN |
|---------------------|----------------|-------------------|
| - Panjang, tinggi | L, h | $n_L = n_h$ |
| - Kecepatan aliran | v | $n_v = n_h^{1/2}$ |
| - D e b i t | Q | $n_Q = n_h^{5/2}$ |
| - Waktu aliran | t | $n_t = n_h^{1/2}$ |
| - Kekasaran | k | $n_k = n_h$ |
| - Diameter butir | d | $n_d = n_h$ |
| - Koefisien Chezy | C | $n_C = 1$ |
| - Koefisien Manning | n | $n_n = n_h^{1/6}$ |
| - V o l u m e | V | $n_V = n_h^3$ |



Gambar 7 Skematisasi Gerak Mula Partikel (Yang, 1996)

8. Energi
9. Tegangan permukaan
10. Tekanan
11. Berat spesifik
12. Tenaga

Berdasarkan gaya yang dominan, model ini dapat dibedakan menjadi beberapa kelompok yaitu :

1. Model Froude
2. Model Reynolds
3. Model Newton
4. Model Euler
5. Model Weber, dan sebagainya

Dari ke 5 kelompok tersebut di atas, kelompok yang pemakaiannya paling luas adalah Model Froude, yaitu model yang dikembangkan dari gaya gravitasi.

Berdasarkan jenis dasarnya, model ini dapat dibedakan menjadi 2 kelompok yaitu:

1. Model dasar tetap (*Fixed bed model*).

2. Model dasar berubah atau bergerak (*Moveable bed model*).

Skala Model

Prinsip penentuan skala model adalah membentuk kembali masalah yang ada di prototip dengan suatu angka perbandingan, sehingga kejadian yang ada di model sebangun dengan kondisi di prototipe.

Ada dua jenis skala yang dapat digunakan dalam uji model test hidraulika, yaitu :

1. Skala model sama (*undistorted model*)

Skala model sama adalah skala model yang dibuat dengan perbandingan antara skala horisontal dan vertikal sama.

2. Skala model tidak sama (*distorted model*)

Skala model tidak sama adalah skala yang dibuat dengan perbandingan antara skala horisontal dan vertikal tidak sama.

Model Froude (Gaya gravitasi)-Skala Model Sama

Jika gaya gravitasi dominan dalam suatu sistem, maka skala model yang dipakai berdasarkan bilangan Froude. Bilangan Froude harus sama antara model dan prototipe.

$$(F_r)_m = (F_r)_p$$

Selanjutnya skala model untuk berbagai rumus yang diturunkan dari hukum Froude dapat dilihat pada Tabel 1.

Gerak Mula Partikel

Gaya yang bekerja dalam mempelajari gerak mula partikel terdiri atas beberapa pendekatan, beberapa di antaranya adalah (Chih Ted Yang 1996),

1. Pendekatan gaya geser, rumus pendekatan DuBoys', Shields', Kalinske's serta Chang, Simons dan Richardson's
2. Pendekatan garis energi, rumus pendekatan Meyer-Peter's, Meyer-Peter dan Müller's

Pendekatan debit, rumus pendekatan Schoklitsch

1. Pendekatan kecepatan aliran, rumus pendekatan Duboys
2. Pendekatan bentuk dasar saluran,
3. Pendekatan probabilistic, rumus pendekatan Einstein's, Einstein-Brown
4. Pendekatan stochastic,
5. Pendekatan regresi, rumus pendekatan Rottner's
6. Pendekatan persamaan pergerakan, rumus pendekatan Parker's

Diagram gaya yang bekerja pada suatu benda pada aliran sungai dapat digambarkan dengan pendekatan seperti Gambar 7 di atas,

D adalah kedalaman aliran, V adalah kecepatan rerata aliran dan V_d adalah kecepatan aliran di atas partikel. Gaya-gaya yang perlu diperhitungkan adalah, gaya seret (F_D), gaya angkat (F_L), berat terendam (W_s), dan gaya gesek (F_R). Gerak mula partikel dapat terjadi apabila salah satu dari beberapa kondisi ini terpenuhi,

$$F_L = W_s;$$

$$F_D = F_R;$$

$$M_0 = M_R$$

Sebagai pertimbangan kepraktisan di lapangan, pendekatan dengan kecepatan aliran digunakan untuk menganalisa gerak mula BBT Kubus Kaki Enam di saluran kaca.

Pengujian dilaksanakan dengan variasi pada jumlah barisan dan jumlah lapisan untuk mengetahui pengaruhnya terhadap kinerja BBT

yang dikembangkan. Skema pengujian dilaksanakan untuk dapat mengetahui jumlah lapisan dan baris yang optimum sehingga penerapan BBT di lapangan dapat sesuai dengan kebutuhan. Pengembangan penyusunan BBT yang optimum diharapkan dapat menekan biaya yang diperlukan dalam penerapannya. Kecepatan aliran dihitung berdasarkan atas ketinggian muka air dan debit yang mengalir.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian performa Blok Beton Terkunci dilaksanakan dengan mengalirkan debit tertentu hingga Blok Beton Terkunci yang tersusun mengalami pergerakan awal. Pergerakan awal ini mengindikasikan kemampuan maksimal dari susunan Blok Beton Terkunci yang ada dalam menahan kecepatan aliran yang terjadi. Untuk mengetahui indikator yang menyebabkan pergerakan awal dari Blok Beton Terkunci yang diuji maka dilakukan pembacaan muka air di lokasi udik dan hilir susunan Blok Beton Terkunci dalam menentukan kecepatan aliran yang terjadi ketika Blok Beton Terkunci bergerak. Pelaksanaan pembacaan parameter dilakukan dua kali untuk masing-masing variasi perubahan susunan Blok Beton Terkunci yang diuji. Nilai yang digunakan dalam analisis adalah rerata dari hasil pembacaan parameter pengujian. Pembacaan parameter pengujian dilaksanakan dua kali untuk mengurangi kemungkinan kesalahan pembacaan yang dilaksanakan oleh alat ukur maupun keterbatasan manusia.

Dasar saluran kaca yang digunakan dalam pengujian berupa lapisan besi yang mempunyai nilai kekasaran manning antara 0,01 hingga 0,014 dengan nilai normal yang direkomendasikan sekitar 0,012 (Chow, 1969). Nilai ini jauh lebih kecil dibandingkan dengan angka kekasaran manning yang direkomendasikan untuk sungai antara 0,025-0,06, dengan nilai yang direkomendasikan adalah 0,035 (Chow, 1969). Perbedaan nilai kekasaran ini menunjukkan bahwa pengujian di laboratorium dilaksanakan dengan pendekatan pesimistis, sehingga penerapan Blok Beton Terkunci di lapangan diharapkan dapat menunjukkan kinerja yang lebih baik daripada di laboratorium.

Pelaksanaan pengujian Blok Beton Terkunci dilaksanakan secara satuan dan tersusun untuk mengetahui pengaruh dari perletakan Blok Beton Terkunci secara sistem di lapangan. Skenario pengujian dengan melaksanakan pengujian secara satuan dan tersusun dilakukan untuk mengetahui efektifitas dan efisiensi dari jumlah susunan Blok Beton Terkunci yang diuji.

Analisa dilaksanakan untuk mengetahui kecepatan minimal yang dapat menggerakkan Blok Beton Terkunci. Kecepatan aliran merupakan parameter hidraulik yang dapat menggerakkan material di sungai. selain kecepatan aliran, angka Froude ketika Blok Beton Terkunci mengalami pergerakan awal dianalisa untuk mengetahui kemampuan Blok Beton Terkunci dalam menahan jenis aliran yang terjadi. Hasil pengujian disajikan dalam bentuk grafik hubungan antara variasi susunan dengan kecepatan aliran serta variasi susunan dengan angka Froude yang terjadi. Hasil pengujian BBT secara terkunci yang telah dilaksanakan di saluran kaca dengan skala 1 : 33 $\frac{1}{3}$ disajikan dalam beberapa bagian berikut ini.

Batu Boulder

Batu boulder merupakan salah satu material yang paling banyak digunakan dalam bidang persungai. Ketersediaan batu boulder di lokasi serta kemampuan dalam menahan gerusan lokal di hilir peredam energi bendung serta di kaki tanggul menjadikan batu boulder merupakan salah satu pilihan paling ekonomis dalam perlindungan bangunan di sungai. Pengujian batu boulder dilaksanakan dengan mengasumsikan batu boulder berukuran ± 30 cm sebagai ukuran material yang umum diaplikasikan di lapangan sebagai konstruksi pelindung kaki timbunan maupun hilir peredam energi. Ukuran lapangan ini menjadi ± 1 cm dengan skala model yang digunakan dalam pengujian model hidraulik di saluran kaca. Pengujian dilaksanakan secara satuan dan tersusun dengan variasi susunan tertentu. Pengujian dilaksanakan dengan mensimulasikan susunan batu boulder di lapangan dengan panjang ± 2 hingga 7 meter, dengan perubahan panjang susunan batu boulder tiap 1 meteran. Skenario pengujian dilaksanakan untuk mengetahui optimalisasi jumlah panjang susunan batu boulder.

Pengujian dilaksanakan dengan menaikkan debit air saluran kaca sedikit demi sedikit hingga batu boulder yang disusun mengalami pergerakan awal. Pergerakan awal ini mengindikasikan kecepatan minimal yang diperlukan untuk menggerakkan batu boulder yang diuji. Ketinggian muka air, dan bacaan debit yang terjadi digunakan untuk menghitung kecepatan aliran yang terjadi ketika batu boulder yang disusun mengalami pergerakan awal. Pengujian dilaksanakan sebanyak dua kali untuk mengurangi kemungkinan terjadinya kesalahan pembacaan parameter model.

Hasil pengujian secara satuan menunjukkan kecepatan aliran yang terjadi berada dalam rentang 0,251 m/s hingga 2,71 m/s.

Angka Froude yang terjadi dalam rentang kecepatan tersebut adalah 0,28 hingga 0,82. Kecepatan rerata ketika batu boulder mengalami pergerakan awal adalah 1,45 m/s dengan Angka Froude 0,47.

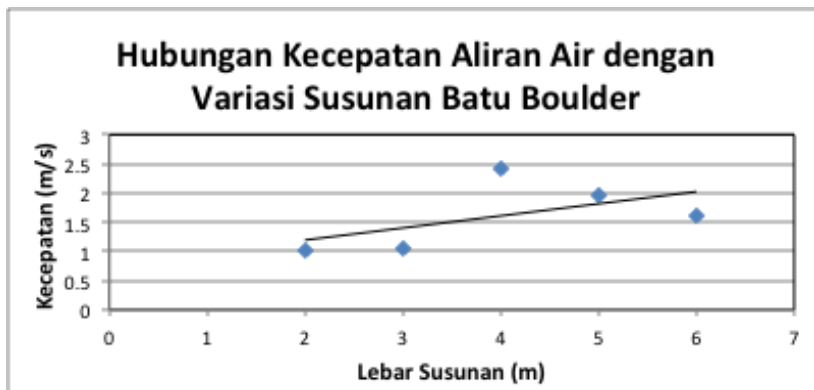
Hasil uji model fisik (Gambar 8) dua dimensi yang dilaksanakan menunjukkan batu boulder mengalami pergerakan awal pada kisaran kecepatan aliran antara 1,03 m/s hingga 2,41 m/s. Rentang variasi kecepatan mula yang dapat menggerakkan batu boulder ini akibat dari bentuk batu boulder yang diuji mempunyai tingkat keseragaman yang rendah.

Angka Froude yang terjadi (Gambar 9) ketika batu boulder mengalami pergerakan adalah 0,36 hingga 0,63. Nilai angka froude yang terjadi berada di dalam tipe aliran sub kritis. Bentuk batu boulder yang bulat dan cenderung aerodinamis menyebabkan kecepatan aliran yang dibutuhkan untuk menggerakkan cukup tinggi. Hasil pengujian dapat dilihat pada gambar di bawah.

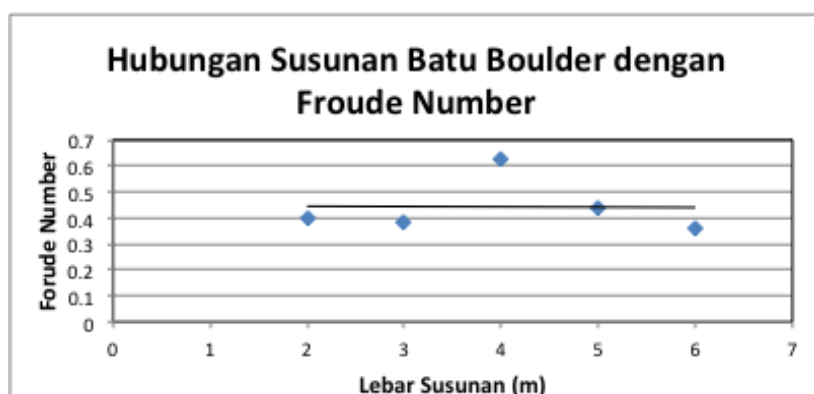
Penambahan panjang susunan dari 2 meter hingga 7 meter tidak secara signifikan menaikkan kecepatan aliran yang dapat menggerakkan batu boulder. Penambahan jumlah panjang batu boulder ini hanya menambah perlindungan yang ada di lokasi tersebut. Pengujian model fisik menunjukkan bahwa pergerakan batu boulder dimulai dari susunan paling hilir. Susunan paling hilir ini merupakan susunan paling lemah yang secara teknis tidak mempunyai tahanan di bagian hilirnya.

Kubus Kaki Enam

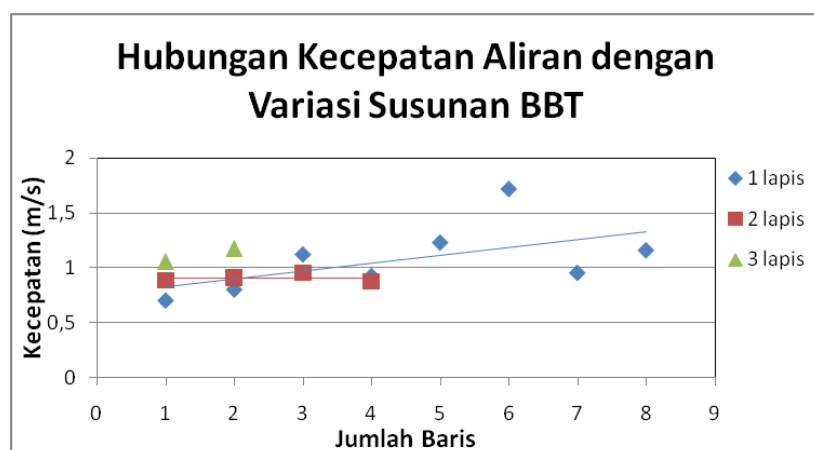
Pengujian Blok Beton tipe Kubus Kaki Enam dilaksanakan dengan skema awal pengujian secara satuan, kemudian dilanjutkan dengan pengujian secara tersusun. Skema ini dilaksanakan untuk mengetahui kemampuan Blok Beton Kubus Kaki Enam dalam menahan kecepatan aliran secara satuan dan tersusun. Hasil pengujian secara satuan menunjukkan kecepatan aliran yang dapat menggerakkan Blok Beton Kubus Kaki Enam berkisar antara 0,546 m/s hingga 3,43 m/s. Angka Froude yang terjadi ketika terjadi pergerakan awal Blok Beton Kubus Kaki Enam berkisar antara 0,11 hingga 0,67. Rentang perbedaan kecepatan yang besar ini akibat dari perletakan Blok Beton Kubus Kaki Enam yang tidak beraturan dalam menahan aliran, sehingga luas bidang kontak antara Blok Beton Kubus Kaki Enam dengan aliran berbeda - beda. Akibat dari perbedaan luas bidang yang menahan aliran ini berimplikasi pada kecepatan aliran serta gaya yang dapat ditahan oleh Blok Beton Kubus Kaki Enam bervariasi.



Gambar 8 Grafik Hubungan antara Kecepatan Aliran dengan Variasi Susunan Batu Boulder



Gambar 9 Grafik Hubungan antara Angka Froude dengan Variasi Susunan Batu Boulder



Gambar 10 Grafik Hubungan antara Kecepatan Aliran dengan Variasi Susunan BBT

Pengujian BBT Tipe Kubus Kaki Enam dilaksanakan dengan berbagai variasi jumlah susunan. Susunan yang dimaksud adalah jumlah barisan serta lapisan BBT yang diuji. Pengujian dilaksanakan dengan menyusun BBT secara acak sebanyak satu lapis dan satu baris untuk pengujian pertama. Lapisan dalam susunan Blok Beton Kubus Kaki Enam disusun secara acak tiap lapisan yang ada.

Grafik pada Gambar 10 menunjukkan perbandingan antara variasi lapisan dan baris Kubus Kaki Enam dengan kecepatan aliran yang mulai dapat menggerakkannya.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa kenaikan jumlah lapisan dalam susunan Blok Beton Kubus Kaki Enam tidak berkorelasi secara langsung dengan kemampuan Blok Beton Kubus Kaki Enam dalam mengalami pergerakan awal.

Susunan lapisan Kubus Kaki Enam disusun maksimal hingga tiga lapis secara acak. Kecepatan minimal untuk menggerakkan Kubus Kaki Enam berkisar antara 0,704 m/s hingga 1,716 m/s.

Selain hubungan antara kecepatan aliran dengan variasi susunan BBT, hubungan antara angka Froude dengan variasi susunan BBT ditelaah secara lebih lanjut. Pergerakan awal Kubus Kaki Enam berada pada rentang angka Froude 0,14 hingga 0,322 (Gambar 11). Kecepatan rerata yang dapat menggerakkan Blok Beton Kubus Kaki Enam sebesar 1,03 m/s dengan Angka Froude rerata 0,18. Grafik yang ada menunjukkan adanya kecenderungan kenaikan performa Blok Beton Kubus Kaki Enam yang disusun satu lapis dengan variasi barisan yang diujicobakan. Kecenderungan kenaikan performa ini tidak terjadi ketika jumlah lapisan Blok Beton Kubus Kaki Enam menjadi dua dan tiga lapis. Performa Blok Beton Kubus Kaki Enam yang terjadi pada pengujian dua dan tiga lapis setara dengan kondisi pengujian satu lapis dengan jumlah baris yang sama, hal ini menunjukkan kelemahan Blok Beton Kubus Kaki Enam dalam penambahan jumlah lapisan. Penambahan jumlah lapisan yang diujicobakan menunjukkan kenaikan jumlah lapisan tidak berkorelasi secara langsung terhadap kenaikan performa susunan Blok Beton Kubus Kaki Enam dalam menahan kecepatan aliran yang terjadi.

Pengujian yang dilaksanakan menunjukkan susunan Blok Beton Kubus Kaki Enam mengakibatkan efek pembendungan di udik susunan. Efek pembendungan ini menyebabkan bagian paling hilir dari susunan Blok Beton Kubus Kaki Enam merupakan bagian paling lemah. Bagian ini mengalami pergerakan awal yang paling pertama terjadi dari semua susunan Blok Beton Kubus Kaki Enam yang ada.

Kubus Kaki Enam V.1

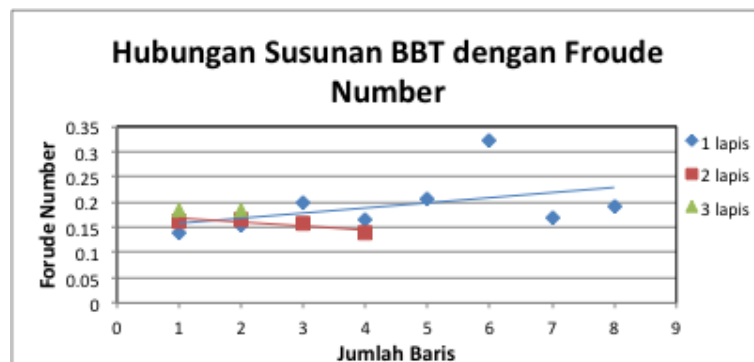
Pengembangan Blok Beton Kubus Kaki Enam dilaksanakan dengan memperkecil tahanan

bidang kontak antara Blok Beton dengan aliran yang terjadi. Skema pengujian dilaksanakan serupa dengan Blok Beton Kubus Kaki Enam. Hasil pengujian secara satuan menunjukkan bahwa Blok Beton pengembangan mengalami kenaikan kecepatan aliran yang dapat menggerakkan menjadi berkisar antara 0,663 m/s hingga 4,423 m/s dengan Angka Froude yang terjadi antara 0,137 hingga 0,874. Pengurangan tahanan bidang kontak Blok Beton ini telah dapat menaikkan kecepatan rerata yang menggerakkan Blok Beton menjadi 2,07 m/s dengan angka Froude 0,41.

Gambar 12 menunjukkan perbandingan antara variasi lapisan dan baris susunan Kubus Kaki Enam V.1 dengan Kecepatan aliran yang mulai dapat menggerakkannya. Susunan lapisan Kubus Kaki Enam V.1 disusun maksimal hingga tiga lapis secara acak. Kecepatan minimal untuk menggerakkan Kubus Kaki Enam berkisar antara 0,556 m/s hingga 3,21 m/s. Secara tersusun, Blok Beton Kubus Kaki Enam V.1 mempunyai kemampuan dalam menahan kecepatan aliran mirip dengan Blok Beton Kubus Kaki Enam. Namun demikian pengurangan tahanan bidang kontak terhadap air menyebabkan volume dan berat Blok Beton Kubus Kaki Enam V.1 lebih ringan dibandingkan dengan versi sebelumnya.

Selain hubungan antara kecepatan aliran dengan variasi susunan BBT, hubungan antara angka Froude dengan variasi susunan BBT ditelaah secara lebih lanjut. Pergerakan awal Kubus Kaki Enam V.1 berada pada rentang angka Froude 0,112 hingga 0,6 (Gambar 13). Kecepatan rerata yang dapat menggerakkan Blok Beton Kubus Kaki Enam V.1 sebesar 1,615 m/s dengan Angka Froude rerata 0,296.

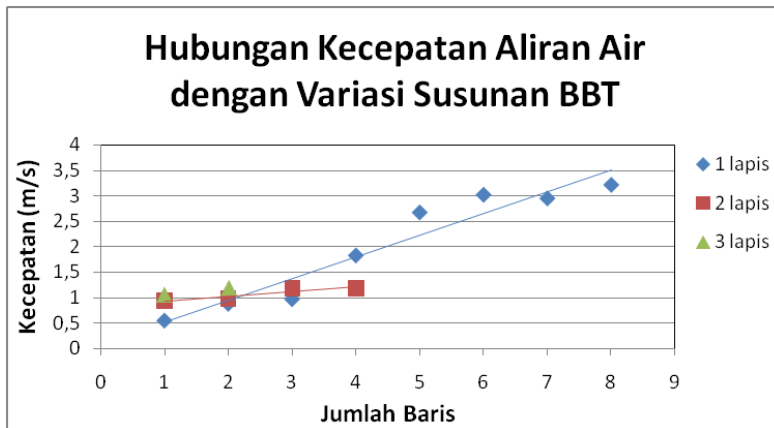
Grafik yang ada menunjukkan adanya kecenderungan kenaikan performa Blok Beton Kubus Kaki Enam V.1 yang disusun satu lapis dengan variasi barisan yang diujicobakan. Kenaikkan performa ini meningkat secara drastis jika dibandingkan dengan Blok Beton Kubus Kaki Enam. Kecenderungan kenaikan performa



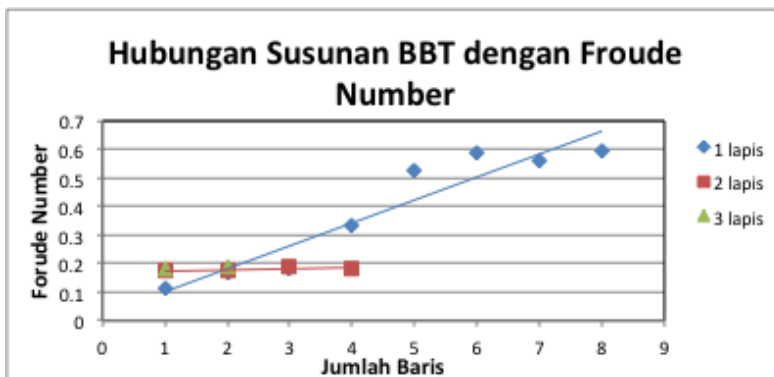
Gambar 11 Grafik Hubungan antara Angka Froude dengan Variasi Susunan BBT

ini tidak terjadi ketika jumlah lapisan Blok Beton Kubus Kaki Enam menjadi dua dan tiga lapis. Performa Blok Beton Kubus Kaki Enam V.1 yang terjadi pada pengujian dua dan tiga lapisan setara dengan kondisi pengujian satu lapis dengan jumlah baris yang sama, hal ini menunjukkan kelemahan Blok Beton Kubus Kaki Enam V.1 dalam penambahan jumlah lapisan.

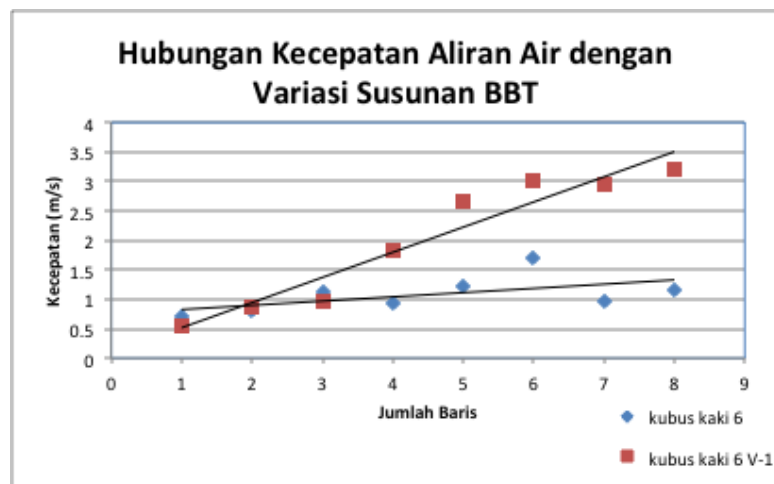
Penambahan jumlah lapisan yang diujicobakan menunjukkan kenaikan jumlah lapisan tidak berkorelasi secara langsung terhadap kenaikan performa susunan Blok Beton Kubus Kaki Enam V.1 dalam menahan kecepatan aliran yang terjadi. Peningkatan performa Blok Beton Kubus Kaki Enam V.1 dibandingkan dengan versi awal dapat dilihat dalam Gambar 14.



Gambar 12 Grafik Hubungan antara Kecepatan Aliran dengan Variasi Susunan BBT



Gambar 13 Grafik Hubungan antara Angka Froude dengan Variasi Susunan BBT



Gambar 14 Grafik Hubungan antara Angka Froude dengan Variasi Susunan BBT



Gambar 15 Grafik Hubungan antara Kecepatan Aliran dengan Angka Froude

Grafik di atas menunjukkan perbandingan performa Blok Beton Kubus Kaki Enam versi awal dengan versi pengembangan. Terlihat bahwa kenaikan performa kecepatan terjadi pada kenaikan jumlah baris dari tiga baris menjadi empat baris. Kecenderungan kenaikan kecepatan yang dapat menggerakkan Blok Beton Terkunci ini mengalami puncaknya pada baris keenam dengan sedikit terjadi penurunan performa pada jumlah baris sebanyak tujuh baris. Secara umum terlihat jumlah optimum baris yang masih dapat meningkatkan performa kenaikan kecepatan minimal untuk menggerakkan Blok Beton Kubus Kaki Enam versi awal dan pengembangannya berada dalam jumlah baris sebanyak enam baris.

Peningkatan performa Blok Beton Kubus Kaki Enam versi awal menjadi versi V.1 terlihat dengan kecepatan rerata yang dapat menggerakkan meningkat dari 1,03 m/s menjadi 1,615 m/s dengan Angka Froude 0,181 menjadi 0,296.

Gambar 15 di atas merupakan pendekatan hubungan antara kecepatan aliran dengan angka Froude yang terjadi ketika gerak mula Blok Beton Terkunci Tipe Kubus Kaki Enam terjadi secara satuan. Grafik yang ada mengindikasikan hubungan yang kuat antara kecepatan aliran dengan Angka Froude yang terjadi. Nilai hasil pengujian Blok Beton Kubus Kaki Enam versi awal dan versi pengembangan berada dalam satu garis yang menunjukkan hubungan kecepatan dan Angka Froude. Secara satuan, Blok Beton Kubus Kaki Enam mengalami pergerakan dalam rentang kecepatan aliran 0,545 m/s hingga 4,423 m/s. Rentang kecepatan ini berada dalam aliran sub kritis yang mempunyai nilai Angka Froude berkisar dari 0,11 hingga 0,87.

KESIMPULAN

Hasil pengujian di saluran kaca menunjukkan adanya perbaikan performa dari Kubus Kaki Enam hasil pengembangan dengan beberapa parameter sebagai berikut:

Kubus Kaki Enam mulai mengalami pergerakan pada saat kecepatan aliran berkisar antara 0,55–3,43 m/s secara satuan dengan kecepatan rerata 1,3 m/s dan menjadi 0,7–1,71 m/s secara tersusun.

Angka Froude yang terjadi ketika Kubus Kaki Enam mengalami pergerakan berkisar antara 0,11–0,66 secara satuan namun menjadi 0,138–0,322 secara sistem. Penurunan rentang kecepatan minimal untuk menggerakkan Blok Beton Terkunci Tipe Kubus Kaki Enam akibat dari efek pembendungan di depan susunan BBT yang diuji menyebabkan bagian paling hilir susunan mengalami efek gerusan yang lebih besar.

Kubus Kaki Enam V.1 mulai mengalami pergerakan pada saat kecepatan aliran berkisar antara 0,66–4,42 m/s secara satuan dengan kecepatan rerata 2,07 m/s namun menjadi 0,55–3,21 m/s secara tersusun.

Angka Froude yang terjadi ketika Kubus Kaki Enam V.1 mengalami pergerakan berkisar antara 0,13–0,87 secara satuan namun menjadi 0,112–0,59 secara sistem. Secara umum angka Froude yang terjadi berada dalam jenis aliran subkritis.

Penurunan kecepatan aliran yang dapat menggerakkan Kubus Kaki Enam dan Kubus Kaki Enam V.1 ini akibat dari efek pembendungan di udik susunan Kubus Kaki Enam dan Kubus Kaki Enam V.1.

| No | Jenis | Kecepatan (m/s) | | Angka Froude | |
|-----------------|------------------|-----------------|--------|---------------|--------|
| | | Rentang | Rerata | Rentang | Rerata |
| Satuan | | | | | |
| 1 | Batu Blouder | 0,251 - 2,71 | 1,44 | 0,117 - 0,825 | 0,468 |
| 2 | Kubus Kaki 6 | 0,546 - 3,43 | 1,3 | 0,11 - 0,66 | 0,255 |
| 3 | Kubus Kaki 6 V.1 | 0,663 - 4,423 | 2,07 | 0,138 - 0,87 | 0,41 |
| Tersusun | | | | | |
| 1 | Batu Blouder | 0,251 - 2,71 | 1,61 | 0,36 - 0,63 | 0,44 |
| 2 | Kubus Kaki 6 | 0,704 - 1,72 | 1,03 | 0,138 - 0,322 | 0,181 |
| 3 | Kubus Kaki 6 V.1 | 0,556 - 3,2 | 1,615 | 0,112 - 0,59 | 0,296 |

Kelemahan sistem kunci antar BBT Kubus Kaki Enam dan Kubus Kaki Enam V.1 terletak pada susunan BBT paling hilirnya.

Pengujian menunjukkan kenaikan performa BBT tidak terjadi ketika jumlah lapisan naik menjadi 2 hingga 3 lapis. Hal ini menunjukkan jumlah lapisan secara optimal ditunjukkan dengan hanya satu lapis BBT, jumlah baris BBT juga menunjukkan nilai optimum pada baris ke 4, namun demikian jumlah lapisan dan baris di lapangan sangat tergantung dengan perlindungan yang harus dilaksanakan.

Pengurangan bidang tahanan kontak Blok Beton dengan air dapat meningkatkan kecepatan aliran yang menggerakkan Blok Beton Kubus Kaki Enam V.1.

Penelitian ini mencoba menyajikan kecepatan minimal yang dapat menggerakkan BBT versi awal dan pengembangannya sebagai panduan dalam desain penerapan lapangan BBT. Penerapan BBT tipe Kubus Kaki Enam di lapangan harus memperhatikan rentang kecepatan, kecepatan rerata serta jenis aliran yang ada di ruas sungai rencana yang dapat menggerakkan BBT secara satuan dan tersusun. Secara teknis Blok Beton Kubus Kaki Enam versi awal dan pengembangannya mempunyai performa yang lebih baik dibandingkan dengan batu boulder. Secara teknis BBT tipe Kubus Kaki Enam dan pengembangannya dapat digunakan untuk menggantikan batu boulder yang semakin susah didapatkan.

DAFTAR PUSTAKA

- Bakker, Pieter., dkk., 2003. Development of Concrete Breakwater Armour Units.
- Chow, V.T., 1959. *Open Channel Hydraulics*. McGraw-Hill, New York.

Pusat Litbang Sumber Daya Air., 2003. *Penelitian Karakteristik Blok Beton Berkaki dan Uji Model Bangunan untuk Pengendalian Gerusan Lokal*.

Pusat Litbang Sumber Daya Air., 2003. *Hydraulic Model Test with Two Dimensional Model on Emergency Measures for Rehabilitation of Jatimlerek Rubber Dam in The Brantas River*.

Pusat Litbang Sumber Daya Air., 2004. *Hydraulic Model Test on Permanent Measures for Rehabilitation of Jatimlerek Rubber Dam on The Brantas River*.

Yang, C.T., 1996. *Sediment Transport Theory and Practice*. McGraw-Hill.

Yiniarti. F., 2011. *Angkutan Sedimen I (Bahan Ajar)*. Institut Teknologi Bandung.