

ANALISIS PERUBAHAN PEREDAMAN ENERGI AKIBAT PENURUNAN DASAR PEREDAM ENERGI MENGGUNAKAN UJI MODEL FISIK HIDRAULIK

Syaiful Anam¹, Very Dermawan², dan Dian Sisinggih^{2*}

¹Program Teknik Sipil, Universitas Brawijaya

²Dosen Jurusan Teknik Pengairan, Universitas Brawijaya

*massyaifulanam@gmail.com

Pemasukan: 30 Juni 2024 Perbaikan: 30 September 2024 Diterima: 18 Desember 2024

Intisari

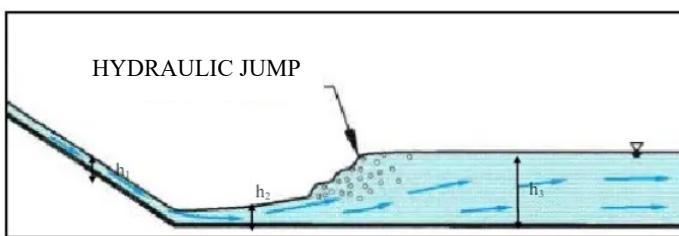
Bangunan utama (*Headworks*) pada bangunan jaringan irigasi didefinisikan sebagai kompleks bangunan di sepanjang sungai yang berfungsi untuk membelokkan air menuju saluran irigasi. Bangunan utama terdiri atas bangunan pengelak, peredam energi, kantong lumpur, bangunan pembilas. Pembangun sebuah bendung dapat menyebabkan terjadinya loncat air di bagian hilir bendung. Kecepatan aliran yang tinggi akibat perubahan elevasi dan tinggi energi sehingga diperlukan suatu konstruksi peredam energi. Dampak buruk yang dihasilkan oleh aliran energi yang tidak dapat diredam oleh bangunan adalah terjadinya penurunan muka tanah dasar sungai. Gerusan menyebabkan kerusakan pada struktur tanah yang berpotensi menyebabkan kerusakan bangunan hingga keruntuhan bangunan. Tipe peredam energi USBR biasanya dipakai untuk *head drop* yang lebih tinggi dari 10 meter. Penelitian ini difokuskan untuk melakukan analisis efektifitas peredam energi Tipe USBR II, yaitu peredam energi yang memiliki blok-blok saluran tajam (gigi pemencar) di ujung hulu dan didekat ujung hilir (*end sill*). Tujuan penelitian adalah untuk menentukan geometri bangunan peredam energi dengan membuat persamaan tinggi jatuh (Z_1) pada model penurunan lantai dasar saluran keseluruhan dan penurunan lantai dasar peredam energi (kombinasi *negatif slope*) pada peredam energi tipe datar dan tipe USBR II, sehingga mengetahui model peredaman yang paling efektif dan efisien. Berdasarkan perhitungan dan analisis dapat disimpulkan bahwa pemodelan peredam energi untuk meningkatkan peredaman energi yang paling efektif adalah Model Penurunan Dasar Peredam Energi (Kombinasi *Negatif Slope*) dengan Tipe Peredam Energi USBR II.

Kata Kunci: Peredam Energi, USBR II, Penurunan Lantai Dasar.

Latar Belakang

Bendung merupakan bangunan melintang sungai yang dibangun untuk mengubah karakteristik aliran sungai. (Mawardi dan Memet, 2010) mengatakan bahwa fungsi utama dari bendung adalah untuk meninggikan elevasi muka air sungai. Pembendungan aliran akan menyebabkan perbedaan elevasi muka air antara hulu dan hilir bendung yang cukup besar, sehingga mengakibatkan adanya terjunan dan terjadi perubahan energi yang cukup besar ketika air melewati mercu bendung.

Akibatnya, aliran akan mengalami kejut-normal atau loncatan hidraulik yaitu suatu aliran yang mengalami perubahan dari aliran superkritis menjadi subkritis (Frank, 2001). Perubahan aliran dari superkritis ke subkritis menyebabkan terjadinya loncatan hidraulik (Raju, 1986). Cara kerja pemecah energi air pada bangunan air yaitu dengan cara membuat gesekan air dengan lantai serta dinding struktur, membentuk pusaran air dan menghasilkan benturan aliran ke struktur serta menciptakan loncatan air di dalam ruang olakan (Agustin dkk, 2021). Loncatan hidraulik atau loncat air merupakan salah satu contoh bentuk aliran berubah cepat atau *rapidly varied flow* (Triatmodjo, 2003). Aspek hidraulik pada bendung merupakan salah satu faktor yang sangat penting dalam perencanaan kolam peredam energi. Sisa energi di hilir kolam peredam energi diharapkan seminimal mungkin sehingga tidak terjadi gerusan pada dasar sungai (Afrida dkk, 2023).



Gambar 1. Loncat Air

Untuk saluran persegi panjang bentuk horizontal datar, maka kedalaman aliran hilir yaitu (Triatmodjo, 2003):

$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + 8F_r^2} - 1 \right) \quad (1)$$

Kedalaman sebelum loncatan hidraulik (y_1) dan kedalaman setelah loncatan hidraulik (y_2) disebut juga dengan kedalaman konjugasi.

Tabel 1. Klasifikasi Loncatan Hidraulik pada Saluran Persegi Mendatar

<i>Fr</i>	Definisi	Keterangan
1	Aliran kritis	Tidak terbentuk loncatan
1 – 1.70	Loncatan berombak	Terjadi ombak pada permukaan air
1.70 – 2.50	Loncatan lemah	Kehilangan energi kecil
2.50 – 4.50	Loncatan berosilasi	Terjadi semburan berosilasi yang tidak teratur menghasilkan gelombang besar menuju hilir, merusak tanggul.
4.50 – 9.00	Loncatan tunak	Peredaman energinya 45–70%. Loncatan hidraulik sangat seimbang.
> 9.00	Loncatan kuat	Perencanaan ekonomis yang terbaik. Loncatan kuat. Peredaman energi hingga 85%. Resiko erosi pada dasar saluran.

(sumber: Chanson, 2004)

Akibat loncatan hidraulik ini sering menimbulkan gulungan ombak atau pusaran (*vortex*) yang bisa menyebabkan gerusan pada dasar saluran, terutama bagian hilir yang tidak diberi perlindungan.

Ada beberapa penelitian tentang fenomena gerusan di hilir kolam olakan bendung, yaitu USBR. (Farhoudi, 1995) meneliti tentang pengaruh kolam olakan (*stilling*

basin) terhadap peredaman energi. (Kumar dkk, 1982) meneliti gerusan di hilir bendung. (Farhoudi dan Smith, 1985) meneliti tentang profil gerusan lokal (*local scour*) di hilir loncatan hidraulik. (Hoffmans dan Pilarczyk, 1995) meneliti tentang gerusan lokal di hilir bangunan hidraulik yang diberi apron atau lapisan lindung. (Mays, 1999) meneliti tentang ukuran batu dalam riprap kasar buatan yang berbentuk kutil (*wart*). Abdurrosyid dkk. pada tahun 2009 meneliti tentang gerusan di hilir kolam olakan tipe USBR-III tanpa meneliti tentang proteksi gerusannya.

Dengan adanya loncatan air maka diperlukan kolam olakan yang dapat melindungi dasar sungai. Walaupun menggunakan kolam olakan yang dapat meredam energi, akan tetapi kenyataannya masih terjadi gerusan pada dasar saluran di sebelah hilir kolam olakan, hal ini menyebabkan kerusakan pada bangunan tersebut (Abdurrosyid dkk, 2009).

Tipe kolam olak yang akan direncana di sebelah hilir bangunan bergantung pada energi air yang masuk, yang dinyatakan dengan bilangan Froude (*Fr*), dan pada bahan konstruksi kolam olak. Konstruksi tipe kolam olakan dibagi menjadi 5 (lima) tipe, yaitu: (i) Kolam olak tipe Vlugter; (ii) Kolam olak tipe Schoklitsch; (iii) Kolam olak tipe Bucket; (iv) Kolam olak tipe USBR; (v) Kolam olak tipe The SAF Stilling Basin (SAF = Saint Anthony Falls) (Sosrodarsono, 1977).

Penelitian terhadap peredam energi telah banyak dilakukan oleh para peneliti terdahulu. Kathibi dkk. pada tahun 2014 berpendapat bahwa untuk permodelan terhadap peredam energi pada bendung beronjong bertingkat menggunakan metode ANN (*Artificial Neural Network*) memiliki nilai keakuratan yang tinggi. (Guven dkk, 2006) berpendapat bahwa hasil pemodelan ANN (*Artificial Neural Network*) memiliki keunggulan dibandingkan dengan model regresi dan memiliki nilai kesalahan relatif yang kecil. (Narayana dkk, 1989) berpendapat bahwa bilangan froude rendah pada kolam peredam USBR IV, IS Tipe I dan SAF telah menunjukkan bahwa dua kolam pertama tidak memiliki peningkatan kinerja apapun dibandingkan dengan kolam peredam SAF pendek. (Habibzadeh dkk, 2012) berpendapat bahwa efisiensi efek dari tinggi, lebar, lokasi, dan jumlah balok penghalang pada rezim DSJ (*Deflected Surface Jet*) dan RWJ (*Reattaching Wall Jet*) tidak signifikan. (Toso dan Bowers 1988) berpendapat bahwa penambahan blok penghalang, menengah dan akhir (kolam USBR tipe II dan tipe III) tidak menghasilkan nilai konstanta tekanan kecepatan (*Cp*) secara signifikan.

Penelitian hingga desain untuk berbagai fenomena hidraulik membutuhkan suatu cara yang mampu memprediksi hasil dari berbagai macam atau jenis karakteristik fluida yang diteliti atau disimulasi dengan akurat dan cepat (Dermawan dkk, 2021).

Kolam olak USBR II banyak digunakan pada bendungan tinggi, bendungan urugan tanah dan struktur-struktur saluran besar dilengkapi dengan blok-blok di ujung hulu dan ambang bergigi di ujung hilir (Saputra dkk, 2019).

Dari penelitian yang sudah dilakukan tersebut dapat dilihat bahwa ada beberapa perlakuan yang dilakukan pada peredam energi untuk mendapatkan ukuran peredam energi yang optimal sehingga pada penelitian bertujuan untuk melakukan pengujian model fisik hidraulik terhadap peredam energi yaitu dengan uji model fisik hidraulik penurunan dasar saluran keseluruhan dan penurunan dasar peredam

energi (kombinasi *negatif slope*) dengan tipe peredam energi datar dan USBR II dengan harapan kecepatan aliran pada hilir saluran (setelah loncatan hidraulik) adalah subkritis sehingga diperlukan suatu model persamaan peredaman dalam menentukan kedalaman penurunan elevasi dasar saluran atau elevasi dasar peredam energi sehingga didapatkan model peredaman yang paling efektif dari 2 model fisik hidraulik tersebut.

Metodologi Studi

Variabel Penelitian

Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Sungai dan Rawa, Teknik Pengairan, Universitas Brawijaya dengan menggunakan fasilitas laboratorium, antara lain: (a) Model fisik hidraulik pelimpah dengan saluran terbuka (*open channel*), pelimpah menggunakan tipe Ogee ambang tegak sebagai parameter tetapnya dengan kemiringan saluran peluncur adalah 1:4, lebar saluran tetap (B) 40 cm, (b) Tiga buah pompa air untuk suplai aliran air ke model, (c) Bak penampung air untuk menyuplai air ke model dan dilengkapi alat pengukur debit, (d) Alat ukur debit *Rechbox*, (e) Meteran taraf (*Point Gauge*), tabung pitot, alat ukur sifat datar (*Waterpass*), bak ukur, gelas takar, ember, *stopwatch*.

Dalam penelitian ini digunakan beberapa variabel untuk mendukung hasil penelitian. Variabel terikat terdiri atas Kedalaman kritis (Y_c), Kedalaman air di kaki pelimpah (Y_1), Kedalaman air di hilir saluran (Y_2), Bilangan froude (Fr), Panjang loncatan (L_j). Selain itu, variabel bebas terdiri atas Debit (Q), Pelimpah ogee tegak, Kemiringan saluran peluncur, Beda tinggi *crest* ambang dengan dasar peredam energi (Z_1), Peredam energi tipe datar dan Peredam energi tipe USBR II.

Rancangan Analisis Dimensi

Analisis dimensi banyak membantu dalam eksperimen dan akan mengarahkan pada sesuatu yang secara nyata mempengaruhi fenomena yang ada (Triatmodjo, 2003). Untuk menuliskan dimensi dari variabel yang terdapat pada bidang teknik hidraulik biasanya dipergunakan sistem MLT yaitu massa, panjang dan waktu. Dalam pembuatan model biasanya dilakukan pengecilan dari berbagai variabel tersebut, yaitu dengan memberikan skala (n) pada masing-masing variabel tersebut. Skala dari berbagai variabel atau parameter yang diekspresikan dalam bilangan tak berdimensi.

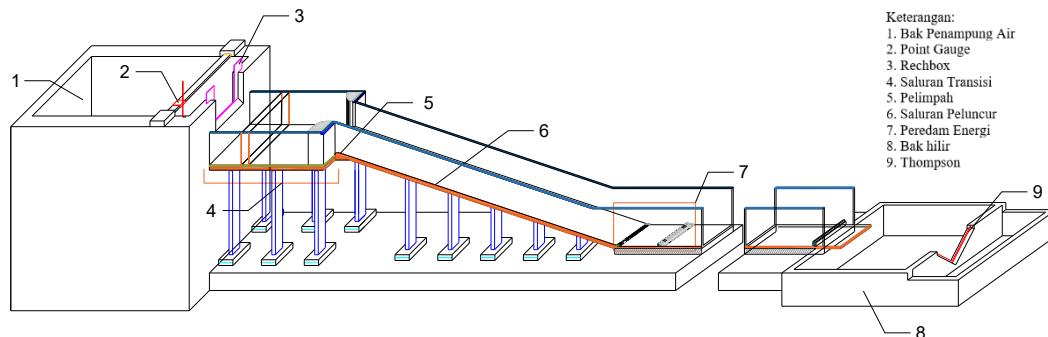
Untuk menentukan bilangan tak berdimensi tersebut dapat dilakukan dengan analisis dimensi. Analisis dimensi untuk menentukan bilangan tak berdimensi tersebut ada beberapa cara, salah satunya adalah dengan cara matriks Langhaar. Adapun langkah-langkah dalam perhitungan analisis dimensi penelitian, antara lain:

1. Melakukan tabulasi parameter untuk analisis dimensi untuk mengetahui jumlah bilangan tak berdimensi (Phi), serta menentukan parameter sebagai variabel berulang.
2. Melakukan perhitungan bilangan tak berdimensi dengan matriks Langhaar untuk menentukan bilangan tak berdimensi

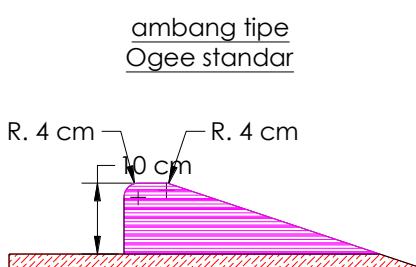
Rancangan Penelitian di Laboratorium

Secara garis besar rancangan penelitian meliputi:

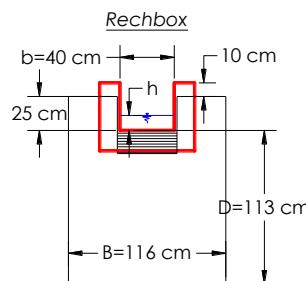
1. Studi *literatur* tentang peredaman energi tipe datar dan tipe USBR II.
2. Merencanakan dan membuat model fisik hidraulik dan menyiapkan tempat untuk penelitian (*set up experiment*)



Gambar 2. Potongan Melintang Model Saluran Penelitian



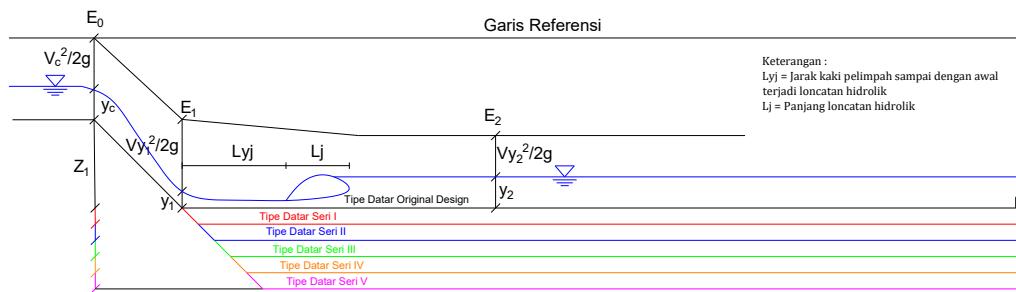
Gambar 3. Potongan Memanjang Ambang



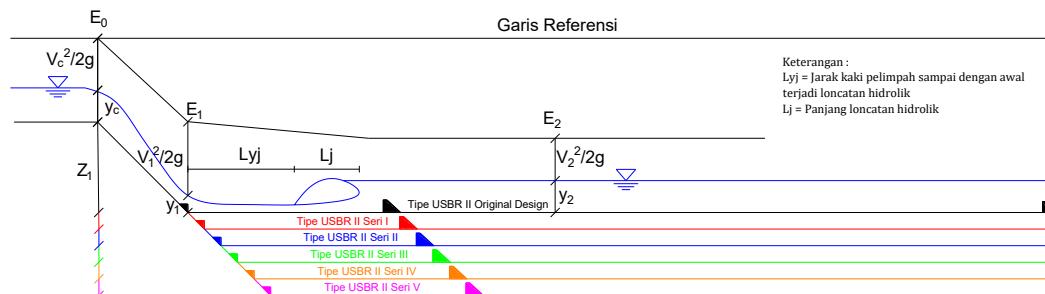
Gambar 4. Potongan Melintang Thompson

3. Melakukan kalibrasi alat sebelum dilakukan pengujian aliran pada pemodelan
4. Melakukan perumusan fenomena hidraulik aliran pada bangunan pelimpah dan menghitung profil muka air pada saluran peluncur. Rancangan perlakuan ini dimaksudkan untuk mendapatkan gambaran perilaku aliran.
5. Melakukan pengamatan dan pengukuran data pada bangunan. Pengukuran yang dilakukan meliputi kedalaman kritis (Y_c), kecepatan kritis (V_c), kedalaman aliran di hilir kaki pelimpah (Y_1), kecepatan aliran dihilir kaki pelimpah (V_{y1}) kedalaman aliran setelah loncatan hidraulik (Y_2), kecepatan aliran setelah loncatan hidraulik (V_{y2}) dan panjang loncatan air yang terjadi (L_j). Pengukuran dilakukan dengan bantuan alat ukur manual seperti waterpass, bak ukur, tabung pitot, dan penggaris.
6. Melakukan analisis terhadap parameter yang ada dan dilakukan pengecekan terhadap hasil penelitian. Analisis data sebagai berikut:
 - a. Melakukan analisis dimensi dengan cara Langhaar
 - b. Membuat grafik hubungan antar parameter
 - c. Dari grafik akan didapatkan rumus persamaan

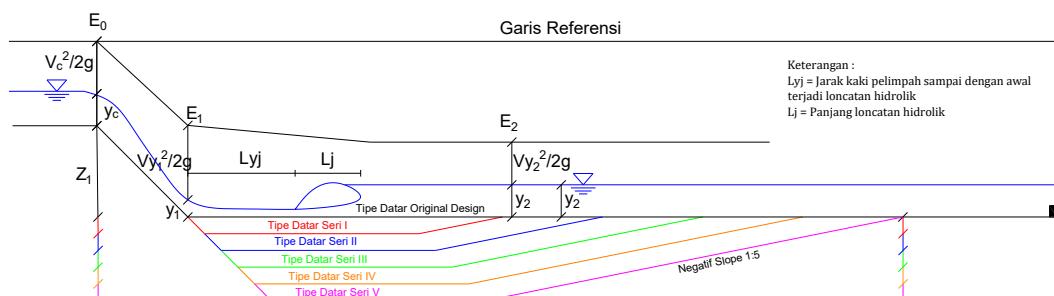
Skema saluran penelitian disajikan dalam Gambar 5-8 di bawah ini



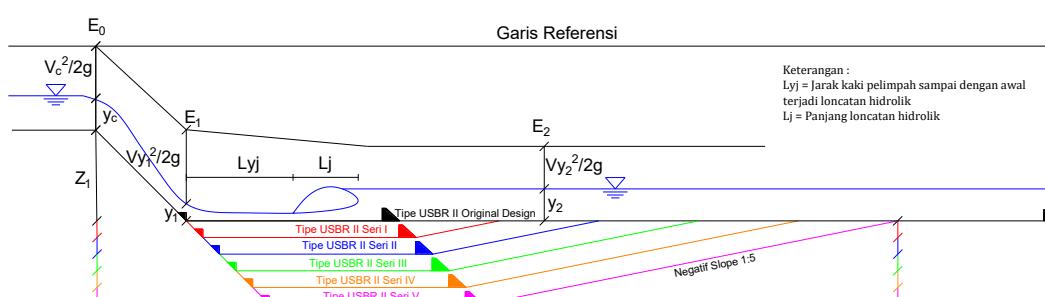
Gambar 5. Skema Penelitian Bangunan dengan Penurunan Dasar Saluran Keseluruhan dengan Kondisi Peredam Energi Datar



Gambar 6. Skema Penelitian Bangunan dengan Penurunan Dasar Saluran Keseluruhan dengan Kondisi Peredam Energi USBR II

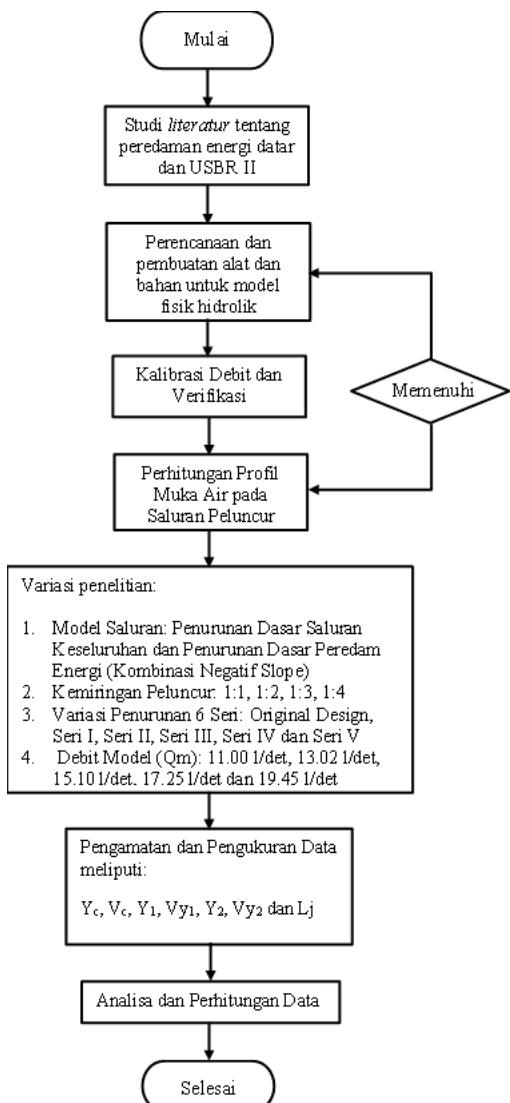


Gambar 7. Skema Penelitian Bangunan dengan Penurunan Dasar Peredam Energi (Kombinasi Negatif Slope 1:5) dengan Kondisi Peredam Energi Datar

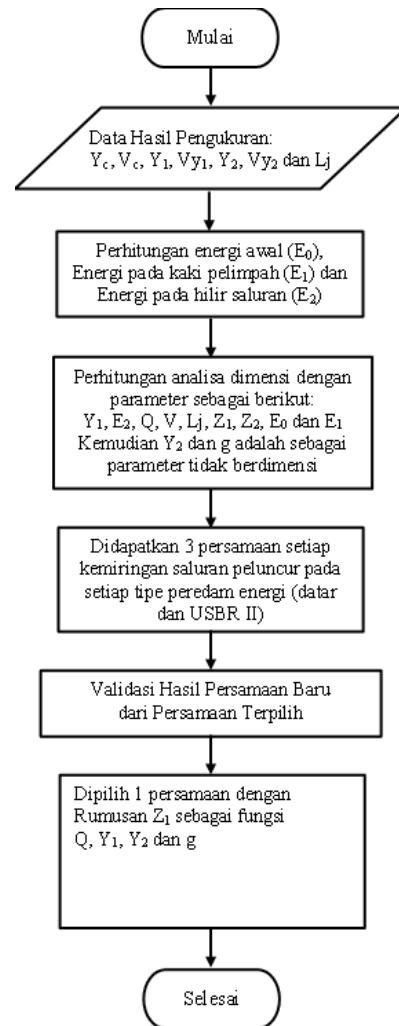


Gambar 8. Skema Penelitian Bangunan dengan Penurunan Dasar Peredam Energi (Kombinasi Negatif Slope 1:5) dengan Kondisi Peredam Energi USBR II

Langkah penelitian dijelaskan dalam diagram alir penelitian dan diagram alir analisis data pada Gambar 5 dan Gambar 6 berikut.



Gambar 9. Diagram Alir Penelitian



Gambar 10. Diagram Alir Analisis Data

Hasil Studi dan Pembahasan

Perhitungan Debit Aliran Pemodelan (Debit Model)

Perhitungan debit aliran dimulai dengan menghitung debit dengan persamaan *rechbox* dan perhitungan debit takar (manual) kemudian mencari kesalahan relatif dari perbandingan hasil perhitungan dan pengukuran tersebut.

1. Perhitungan Debit Aliran Rechbox

$$Q = KBh^{\frac{3}{2}} \quad (2)$$

$$K = 107.1 + \frac{0.177}{h} + 14.2 \frac{h}{D} - 25.7 \left[\frac{(B-b)h}{DB} \right]^{\frac{1}{2}} + 2.04 \frac{B^{\frac{1}{2}}}{D} \quad (3)$$

2. Perhitungan Debit Takar (Manual)

$$Qtakar = \frac{Volume}{Durasi} \quad (4)$$

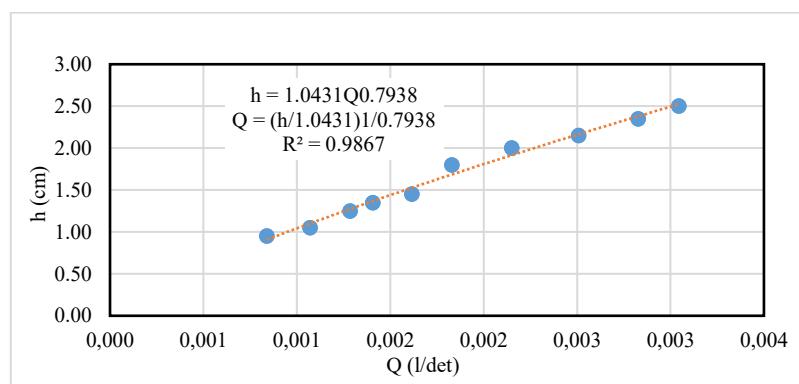
Kemudian dihitung kesalahan relatif rata-ratanya.

Dari hasil perhitungan 10 variasi debit diperoleh nilai kesalahan relatif kurang dari 4%.

3. Perhitungan Debit Model antara Debit Rechbox dengan Debit Takar

Perhitungan debit model dilakukan dengan cara mencari kesalahan relatif dan debit koreksi antara debit rechbox dan debit takar. Kemudian mencari nilai debit model melalui persamaan dari grafik lengkung debit yang diperoleh dari debit koreksi.

Kemudian dari perhitungan debit dan kesalahan relatif di atas diplotkan kembali dalam bentuk grafik hubungan antara debit koreksi dan h rechbox. Grafik dapat dilihat pada Gambar 6 berikut:



Gambar 11. Grafik Hubungan Antara Q dan H Hasil Takar Dan Rechox

Dari grafik diatas didapatkan persamaan yang digunakan untuk menghitung debit model *rechbox* yaitu:

$$h = 1.043Q^{0.7938} \quad (5)$$

dengan rumus tersebut selanjutnya dihitung nilai debit *rechbox* model.

Pada penelitian ini menggunakan 5 variasi debit yaitu 11.004 l/s, 13.019 l/s, 15.102 l/s, 17.246 l/s dan 19.446 l/s.

Perhitungan Profil Muka Air di Saluran Peluncur

Perhitungan profil muka air pada peluncur dilakukan dari hulu ke hilir dikarenakan aliran bersifat superkritis, analisis ini bertujuan untuk mencari nilai debit persatuan lebar (q), kedalaman kritis (Y_c), kecepatan (V), energi (E), jari-jari hidrolis (R), kehilangan energi akibat gesekan (hf), froude (Fr) dan kedalaman setelah loncatan (Y_2).

Kemudian menghitung nilai Y_2 (kedalaman air setelah loncatan) dengan rumus sebagai berikut:

$$Y_2 = 0.5 \times \sqrt{1 + 8 \times Fr^2} - 1 \times Y_1 \quad (6)$$

Perhitungan Bangunan Perdam Energi (USBR Tipe II)

Perhitungan dimensi untuk desain peredam energi USBR tipe II untuk model penelitian di laboratorium meliputi perhitungan panjang peredam energi, tinggi *chute block*, lebar *chute block*, jarak antar *chute block*, jarak *chute block* dengan dinding, tinggi *block* ujung, lebar *block* ujung, jarak antar *block* ujung dan tebal *block* ujung bagian atas.

Data Hasil Pengukuran

Data pengukuran yang diambil pada penelitian meliputi kedalaman kritis (Y_c), kecepatan kritis (V_c), kedalaman aliran di hilir kaki pelimpah (Y_1), kecepatan aliran dihilir kaki pelimpah (V_{y1}) kedalaman aliran setelah loncatan hidraulik (Y_2), kecepatan aliran setelah loncatan hidraulik (V_{y2}) dan panjang loncatan air yang terjadi (L_j). Diukur pada 6 seri penurunan dasar dengan 5 variasi debit. Dari data hasil pengukuran selanjutnya dilakukan perhitungan E_0 (energi awal), E_1 (energi pada kaki pelimpah) dan E_2 (energi pada hilir saluran).

Analisis Dimensi

Hasil analisis dimensi dengan teori Langhaar ditemukan beberapa persamaan yang kemudian dipilih persamaan yang mempunyai hubungan dengan fungsi Z_1 (beda tinggi antara *crest* pelimpah dengan dasar peredam energi).

1. Data Parameter Analisis Dimensi

Parameter-parameter yang digunakan untuk analisis dimensi adalah Z_1 , Y_c , V_c , E_0 , Y_1 , V_{y1} , E_1 , Y_2 , V_{y2} , E_2 dan L_j .

2. Perhitungan Bilangan Tak Berdimensi

Dari data parameter diatas kemudian setiap parameter dihubungkan menjadi bilangan tak berdimensi. Selanjutnya diplotkan pada grafik sehingga didapatkan persamaan linier.

3. Hasil Persamaan Bilangan Tak Berdimensi

$$Z_1 = \frac{\alpha y_2 - y_c - \frac{v_c^2}{2g}}{\beta} \quad \rightarrow \text{Persamaan 1} \quad (7)$$

$$\alpha \frac{Y_1 Q}{\sqrt{Y_2^5 g}} + \beta \frac{Q}{\sqrt{Y_2^3 g}} \quad \rightarrow \text{Persamaan 2} \quad (8)$$

$$Z_1 = \alpha \frac{Z_1 E_0}{Y_2 F_r} + \beta E_0 \quad \rightarrow \text{Persamaan 3} \quad (9)$$

Validasi Hasil Persamaan

Setelah didapatkan 3 persamaan dari hasil analisis dimensi, selanjutnya dilakukan validasi persamaan dengan membandingkan nilai Z_1 persamaan dengan nilai Z_1 penelitian kemudian dihitung nilai kesalahan relatifnya.

Berdasarkan hasil validasi persamaan dapat disimpulkan bahwa Z_1 pada persamaan 2 memiliki nilai kesalahan relatif yang kecil sehingga dipilih persamaan no. 2 yang memiliki parameter beda tinggi *crest* ambang dengan dasar peredam energi (Z_1), debit (Q), tinggi muka air di kaki pelimpah (Y_1), tinggi muka air dihilir saluran (Y_2), serta gravitasi (g) dengan persamaan dengan fungsi $Z_1 = f(Q, y_1, y_2, g)$. Ditemukan persamaan sebagai berikut:

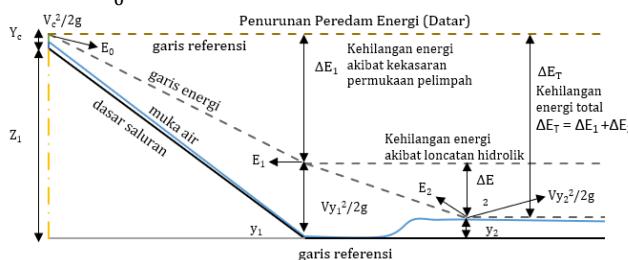
$$Z_1 = a \frac{Y_1 Q}{\sqrt{Y_2^5 g}} + b \frac{Q}{\sqrt{Y_2^3 g}} \quad (10)$$

Perhitungan Efektivitas Peredaman

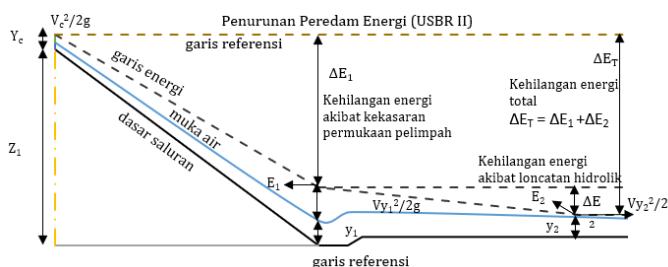
Dari persamaan diatas kemudian dihitung nilai Z_1 dengan data hasil penelitian, kemudian dihitung nilai energi awal di titik kritis (E_0) dengan nilai Z_1 dari hasil perhitungan tersebut. Selanjutnya dihitung nilai efektivitas peredaman dengan rumus sebagai berikut:

$$E_0 = Z_1 + Y_c + \frac{Vc^2}{2g} \quad (11)$$

$$Ef. Peredaman = \frac{(E_0 - E_1)}{E_0} \times 100\% \quad (12)$$



Gambar 12. Skema Penampang Memanjang Aliran (Tipe Datar)



Gambar 13. Skema Penampang Memanjang Aliran (Tipe USBR II)

Dari hasil perhitungan rata-rata nilai efektifitas peredaman didapatkan nilai efektifitas peredaman terbesar adalah pada model Penurunan Dasar Peredam Energi (Kombinasi *Negatif Slope*) Tipe USBR II yaitu sebesar 67,33%.

Kesimpulan dan Saran

Kesimpulan

Berdasarkan hasil perhitungan secara teoritis dan analisis data serta uji validasi persamaan untuk uji model fisik saluran dengan penurunan dasar saluran keseluruhan dan penurunan dasar peredam energi (kombinasi *negatif slope*) dapat disimpulkan bahwa beda tinggi *crest* ambang dengan dasar peredam energi (Z_1) dipengaruhi oleh parameter debit (Q), tinggi muka air di kaki pelimpah (Y_1), tinggi muka air di hilir saluran (Y_2) dan gravitasi (g). Penelitian ini menghasilkan kesimpulan sesuai rumusan masalah sebagai berikut:

- Persamaan (Z1) pada model penurunan dasar saluran keseluruhan dan penurunan dasar peredam energi (kombinasi *negatif slope*) dengan peredam energi tipe datar dan tipe USBR II adalah sebagai berikut:

$$Z_1 = \alpha \frac{Y_1 Q}{\sqrt{Y_2^5 g}} + \beta \frac{Q}{\sqrt{Y_2^3 g}} \quad (13)$$

- Berdasarkan perhitungan dan analisis dapat disimpulkan bahwa pemodelan peredam energi untuk meningkatkan peredaman energi yang paling efektif adalah Model Penurunan Dasar Peredam Energi (Kombinasi *Negatif Slope*) dengan Tipe Peredam Energi USBR II.

Saran

Berdasarkan pada hasil penelitian ini, terdapat beberapa saran guna mendukung studi dan penelitian lebih lanjut yaitu sebagai berikut:

- Disarankan untuk melakukan uji validasi hasil penelitian pada berbagai macam bangunan bendung pada banyak lokasi untuk meningkatkan keakurasaan hasil persamaan tinggi jatuh (Z1).
- Beberapa topik bahasan lanjutan yang dapat dikembangkan dari penelitian ini adalah: Penurunan Dasar Peredam Energi Tipe USBR III, USBR IV atau tipe Peredam Lainnya (Roller Bucket), Penelitian Persamaan Panjang Peredam Energi (L) dengan Penurunan Dasar Peredam Energi.

Ucapan Terima Kasih

Terimakasih kepada Prof. Dr. Ir. Suhardjono, MPd., Dipl. HE. telah memberikan arahan dan masukan dalam penyelesaian penelitian ini, kepada Laboratorium Sungai dan Rawa, Teknik Pengairan, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya serta kepada Program Pascasarjana Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya.

Daftar Referensi

- Abdurrosyid, J., Wibowo, G.J., dan Nursahid, M. (2009). Studi Gerusan dan Perlindungan di Hilir Kolam Olakan Bendung Tipe USBR-I. *Jurnal Dinamika Teknik Sipil*, 9(1): 27-37. <https://publikasiilmiah.ums.ac.id/handle/11617/227>.
- Afrida, E., Apriyanto, T., dan Pujiastuti, R. (2023). Desain Kolam Peredama Energi Bendung Plaosan Kabupaten Semarang. *Jurnal Teknik Indonesia*, 4(1). <https://doi.org/10.61689/jti.v4i1.414>
- Agustin, D.N., Salim, N., dan Rizal, N.S. (2022). Kajian Model Fisik Perbandingan Perilaku Aliran pada Bendung dengan Kolam Olak tipe USBR II, III, IV. *Jurnal Smart Teknologi*, 3(6): 100-102. <http://jurnal.unmuhjember.ac.id/index.php/JST/article/view/8482>
- Chanson, H., 2004. *The Hydraulics of Open Channel Flow: An Introduction*, Second Edition, halaman 91-96, Elsevier, Oxford.
- Chow, V.T., 1997. *Hidraulika Saluran Terbuka*, halaman 25-26, Erlangga, Jakarta.
- Dermawan, D.R., Cahya, E.N., dan Sisinggih, D. (2021). Pemodelan Numerik Bangunan Peredam Energi Bendungan Pomalaa dengan Analisa Komputasi

- Fluida Dinamis. *Jurnal Teknik Pengairan*, 12(2): 139-150.
<http://dx.doi.org/10.21776/ub.pengairan.2021.012.02.06>
- Farhoudi, J., and Smith, K.V.H. (1985). Local Scour Profiles Downstream of Hydraulic Jump. *Journal of the Hydraulics Research*, 23(4): 343-358.
<https://doi.org/10.1080/00221688509499344>
- Guven, A., Gunal, M., and Cevik., A. (2006). Prediction of Pressure Fluctuations on Sloping Stilling Basins. *Canadian Journal Of Civil Engineering*, 33(11): 106-101. <https://doi.org/10.1139/l06-101>
- Habibzadeh, A., Loewen, M., and Rajaratnam, N. (2012). Performance of Baffle Blocks in Submerged Hydraulic Jumps. *Journal of Hydraulic Engineering*, 138(10): 902-908. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0000587](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000587)
- Hoffmans, G.J.C.M., and Pilarczyk, K.W. (1995). Local Scour Downstream of Hydraulic Structures. *Journal of Hydraulic Engineering*, 121(4): 326. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1995\)121:4\(326\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1995)121:4(326))
- Kathibi, R., Salmasi, F., Ghorbani, M.A., dan Ashadi, H. (2014). Modelling Energy Dissipation Over Stepped-gabion Weirs by Artificial Intelligence. *Water Resources Management*, 28(7): 1807-1821.
<http://dx.doi.org/10.1007/s11269-014-0545-y>
- Kumar, D., Mishra, G.C., and Chandra, S. (1982). Flow Under Weir On Scoured Bed. *Journal of the Hydraulics Division*, 108(4). <https://doi.org/10.1061/JYCEAJ.0005853>
- Mawardi, E. dan Memed, M. (2010). Desain Hidraulik Bendung Tetap untuk Irigasi Teknis, halaman 5-6, Alfabeta, Bandung.
- Mays, L.W. (1999). *Hydraulic Design Handbook*, halaman 17-18, McGraw-Hill Education, New York
- Raju, K.G. (1986). *Aliran Melalui Saluran Terbuka*, halaman 7-8, Erlangga, Jakarta.
- Saputra, D.T., Khaerudin, D.N., dan Sulistyani, K.F. (2019) . Kajian Pemilihan Jenis Kolam Olak Dari Segi Fisik Bendung Pada Bendung Di Dusun Darok. Prosiding Seminar Nasional Teknologi Industri, Lingkungan dan Infrastruktur (SENTIKUIN) Volume 2, page D6.1-D6.5. Fakultas Teknik Universitas Tribhuwana Tunggadewi, Malang, Indonesia. 24 Agustus 2019. <https://pro.unitri.ac.id/index.php/sentikuin>.
- Sosrodarsono, S. (1977). *Bendungan Type Urugan*, halaman 13-14, Pradnya Paramita, Jakarta.
- Toso, J.W., and Bowers, C.E. (1988). Extreme Pressures In Hydraulic-Jump Stilling Basins. *Journal of Hydraulic Engineering*, 114(8) : 829. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1988\)114:8\(829\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1988)114:8(829))
- Triatmodjo, B. 2003. *Hidraulika II*, halaman 87-135, Yogyakarta: Beta Ofset, Yogyakarta