

LONCATAN AIR PADA SALURAN MIRING TERBUKA DENGAN VARIASI PANJANG KOLAM OLAKAN

Ign. Sutyas Aji¹⁾ – Maraden S²⁾

¹⁾ Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik UKRIM Yogyakarta

²⁾ Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik UKRIM Yogyakarta

INTISARI

Loncatan air yang tidak terkendali pada bendung dapat menimbulkan terjadinya penggerusan/pengikisan yang disebabkan adanya energi aliran yang tinggi. Jika hal ini berkelanjutan, maka akan mengakibatkan kerusakan pada struktur bangunan air yang ada pada bagian hilir bendung. Guna menanggulangi hal tersebut, banyak digunakan kolam olakan dengan dilengkapi sekat ambang untuk mereduksi energi sebanyak-banyaknya dan menstabilkan gerak loncat air.

Pada penelitian ini dibuat suatu alat peraga berupa saluran miring yang dilengkapi sekat ambang datar. Pemberian sekat ini dimaksudkan agar dapat ditunjukkan secara langsung gerak loncatan air pada bendung. Karakteristik loncatan air dan karakteristik aliran pada penggunaan sekat maupun tanpa sekat selanjutnya dibandingkan, kemudian ditentukan efektifitas sekat pada berbagai variasi debit, panjang kolam olakan, dan dimensi ambang atau sekat.

Hasil pengamatan pada peragaan ini menunjukkan bahwa penggunaan sekat ambang datar pada saluran miring secara umum dapat memperagakan loncatan air. Hal ini ditunjukkan dengan terjadinya aliran subkritis pada hilir loncatan dan aliran superkritis pada awal loncatan. Keefektifan penggunaan sekat ambang datar pada berbagai variasi Q dan L_B terdapat pada sekat berukuran 3×3 cm.

Keywords : loncatan air, aliran

I. PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Saluran alami maupun saluran buatan sangat diperlukan dalam mengoptimalkan pelayanan air khususnya untuk keperluan pertanian. Optimalisasi pelayanan air untuk berbagai kepentingan tak jarang dihadapkan dengan berbagai permasalahan. Salah satu permasalahan adalah terjadinya penggerusan/pengikisan di hilir bendung yang disebabkan adanya energi aliran

yang tinggi, sebagai akibat adanya loncatan air (*hydraulic jump*) yang tidak terkendali.

Guna mengantisipasi dan menanggulangi bahaya penggerusan tersebut, maka diperlukan suatu konstruksi peredam energi (kolam olak) yang dapat berfungsi mereduksi energi. Untuk tujuan ini, diperlukan adanya pemahaman yang baik terhadap pola loncatan air yang terjadi pada bangunan air kemudian membuat kolam olak yang dilengkapi dengan ambang (sekat). Ambang akan bekerja melemparkan pancaran jauh dari lantai dan akan menaikkan muka air hilir sehingga mengurangi gerusan dibagian hilir saluran. Penetapan panjang kolam olak perlu direncanakan seefektif mungkin dengan memperhatikan karakteristik loncatan air yang terjadi.

Secara teoritis loncat air terjadi apabila aliran superkritis berubah kedalam aliran subkritis yang sering sulit dipahami perbedaan kedua jenis aliran tersebut. Pentingnya kajian mengenai loncat air dalam ilmu keairan terutama dalam merencanakan panjang kolam olak, maka dalam penelitian ini direncanakan pembuatan sebuah alat peraga berupa

B. Tujuan dan Manfaat Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah untuk menyelidiki gerak loncatan air pada saluran miring, mengetahui keefektifan penggunaan ambang/sekat, dan melihat perbandingan karakteristik aliran dan loncatan air pada kolam olak yang dilengkapi sekat terhadap kolam olak yang tidak dilengkapi sekat. Manfaat yang diharapkan dari hasil penelitian adalah berupa masukan pengetahuan, khususnya di bidang hidrolika terapan yang berkaitan karakteristik loncatan dan aliran air demi efektivitas pengelolaan pelayanan air melalui saluran dan bangunan-bangunan hidrolik lainnya.

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Jenis Aliran

Aliran dalam saluran terbuka dikatakan tunak (*steady*) bila kedalaman aliran tidak berubah atau dapat dianggap konstan selama selang waktu tertentu. Aliran dikatakan tak tunak (*unsteady*) bila kedalamannya berubah sesuai dengan waktu. Debit Q pada suatu penampang saluran untuk sembarang aliran dinyatakan dengan :

$$Q = VA \quad \dots\dots\dots (2.1)$$

dengan v merupakan kecepatan rata-rata dan A adalah luas penampang melintang tegak lurus terhadap aliran, karena kecepatan rata-rata dinyatakan dengan debit dibagi luas penampang melintang. Debit dianggap tetap di sepanjang bagian

saluran yang luas, atau dengan kata lain aliran bersifat kontinu. Oleh sebab itu, berdasarkan Persamaan (2.1)

$$Q = V_1 A_1 = V_2 A_2 \quad \dots\dots\dots (2.2)$$

Aliran saluran terbuka dikatakan seragam bila kedalaman aliran sama pada setiap penampang saluran. Suatu aliran seragam dapat bersifat tunak atau tidak tunak, tergantung apakah kedalamannya berubah sesuai dengan perubahan waktu. Aliran seragam yang tunak (*Steady Uniform Flow*) merupakan jenis pokok aliran yang dibahas dalam hidroulika saluran terbuka. Penetapan bahwa suatu aliran bersifat seragam yang tak tunak (*Unsteady Uniform Flow*) harus dengan syarat bahwa permukaan air berfluktuasi sepanjang waktu dan tetap sejajar dasar saluran. Sebagian besar rumus dinyatakan dalam bentuk umum :

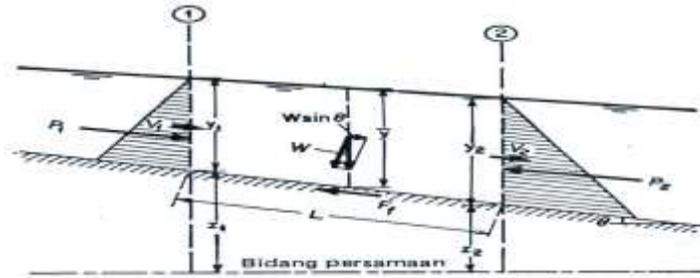
$$V = C \cdot R_x S_y \quad \dots\dots\dots (2.3)$$

dengan V kecepatan rata-rata dalam meter kubik per detik, R jari-jari hidrolis dalam meter, S kemiringan energi, x dan y adalah eksponen dan C adalah faktor tekanan aliran yang bervariasi menurut kecepatan rata-rata, jari-jari hidroulis, kekasaran saluran dan berbagai faktor-faktor lainnya.

B. Momentum Pada Saluran Terbuka

Untuk menguraikan prinsip-prinsip persamaan momentum pada saluran terbuka dengan kemiringan dasar saluran θ , menurut hukum Newton II tentang gerak perubahan momentum aliran air per satuan waktu dalam saluran adalah sama dengan resultan semua gaya-gaya luar yang bekerja pada kedua tampang aliran yang ditinjau. Pada saluran dengan kemiringan besar, penerapan rumusan perubahan momentum per satuan waktu aliran diantara tampang 1 dan 2 (Gambar 2.1), dapat ditulis :

$$\frac{Qy}{q} (\beta_2 \cdot v_2 - \beta_1 \cdot v_1) = P_1 - P_2 + W \sin \theta - Fr \quad \dots\dots\dots (2.4)$$



Gambar 2.1. Prinsip kesetimbangan gaya-gaya dalam aliran air pada saluran dengan kemiringan dasar saluran θ (R. Raju, 1986)

dengan Q adalah debit, γ adalah berat per volume air, β adalah koefisien momentum, v adalah kecepatan, P adalah resultan yang bekerja pada kedua tampang, W adalah berat air yang terdapat diantara kedua tampang, θ adalah sudut kemiringan dasar saluran dan Fr adalah jumlah gaya luar dari gesekan dan tahanan yang bekerja disepanjang bidang kontak air dengan saluran. Persamaan 2.4 dikenal dengan persamaan momentum.

C. Loncatan Air

Apabila tipe aliran di saluran turbulen berubah dari aliran superkritis menjadi subkritis, maka akan terjadi loncat air. Loncat air merupakan salah satu contoh bentuk aliran berubah cepat (*rapidly varied flow*). Gambar 2.2 menunjukkan tampang memanjang saluran dengan kemiringan berubah dari kemiringan curam menjadi landai. Keadaan ini terjadi misalnya pada kaki bangunan pelimpah. Aliran di bagian hulu adalah subkritis sedang di bagian hilir adalah superkritis. Di antara kedua tipe aliran tersebut terdapat daerah transisi dimana loncat air terjadi.



Gambar 2.2. Loncat air (B. Triatmodjo, 1993)

Loncatan hidrolis yang terjadi pada dasar horisontal terdiri dari beberapa tipe. Sesuai penelitian yang dilakukan oleh Biro Reklamasi Amerika Serikat, tipe-tipe tersebut dapat dibedakan berdasarkan bilangan Froude (Fr), yaitu :

1. Bilangan Froude (Fr) = 1, aliran kritis, sehingga tidak terbentuk loncatan.
2. Bilangan Froude (Fr) = 1 - 1,7, terjadi ombak pada permukaan air, dan loncatan yang terjadi dinamakan loncatan berombak.
3. Untuk bilangan Froude (Fr) = 1,7 sampai 2,5, terbentuk rangkaian gulungan ombak pada permukaan loncatan, tetapi permukaan air dihilir tetap halus. Secara keseluruhan kecepatannya seragam, dan rugi-rugi energinya kecil dan dinamakan loncatan lemah.
4. Untuk bilangan Froude (Fr) = 2,5 sampai 4,5, terdapat semburan berisolasi menyertai dasar loncatan bergerak ke permukaan dan kembali lagi tanpa periode tertentu. Loncatan ini dinamakan *Loncatan berisolasi*.
5. Untuk bilangan Froude (Fr) = 4,5 sampai 9,0, ujung-ujung permukaan hilir akan bergulung dan titik dimana kecepatannya tinggi cenderung memisahkan diri dari aliran. Loncatan semacam ini sangat seimbang dan karakteristiknya adalah yang terbaik. Loncatan ini dinamakan *loncatan tetap*.

6. Untuk bilangan Froude (Fr) = 9 dan yang lebih besar, kecepatan semburan yang tinggi akan memisahkan hampasan gelombang gulung dari permukaan loncatan, menimbulkan gelombang – gelombang hilir dan loncatan ini disebut loncatan kuat.

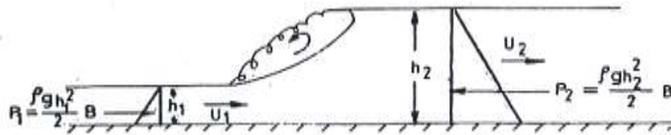
Pengaruh gravitasi terhadap aliran dapat dinyatakan dengan angka Froude. Untuk menghitung angka Froude pada awal loncat air dan di bagian hilir setelah loncatan air digunakan persamaan sebagai berikut :

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{g \cdot h}} \dots\dots\dots (2.5)$$

dengan Fr = angka froude, V = kecepatan aliran (cm/det), g = gravitasi (cm/det²), h = kedalaman aliran (cm)

Pada saluran mendatar atau saluran dengan kemiringan kecil yang lurus dan prismatic, gaya-gaya luar akibat gesekan dan pengaruh berat air diabaikan. Persamaan momentum pada saluran terbuka mendatar dapat dijelaskan dalam Gambar 2.3. Dengan memberikan nilai $\theta = 0$, $Fr = 0$, dan $\beta_1 = \beta_2 = 1$, maka Persamaan 2.4. dapat ditulis menjadi :

$$\frac{Q\gamma}{q}(v_2 - v_1) = P_1 - P_2 \dots\dots\dots (2.6)$$



Gambar 2.3. Persamaan momentum yang digunakan dalam loncat air (Raju R,1986)

Gaya- gaya hidrostatis P_1 dan P_2 dapat dinyatakan sebagai :

$$P_1 = \frac{\gamma \cdot h_1^2}{2} b = \gamma \bar{z}_1 \cdot A_1 \text{ dan } P_2 = \frac{\gamma \cdot h_2^2}{2} b = \gamma \cdot \bar{z}_2 \cdot A_2 \dots\dots\dots (2.7)$$

dengan \bar{z}_1 dan \bar{z}_2 merupakan jarak titik berat masing-masing bagian air seluas A_1 dan A_2 dibawah muka air.

Dengan mendistribusikan nilai $v_1 = \frac{Q}{A_1}$ dan $v_2 = \frac{Q}{A_2}$ pada Persamaan (2.6), maka persamaan momentum diatas dapat ditulis menjadi :

$$\frac{Q^2}{g.A_1} + z_1 . A_1 = \frac{Q^2}{g.A_2} + z_2 . A_2 \dots\dots\dots (2.8)$$

Karena kedua suku pada Persamaan (2.8) sejenis, maka untuk setiap tampang berlaku fungsi umum :

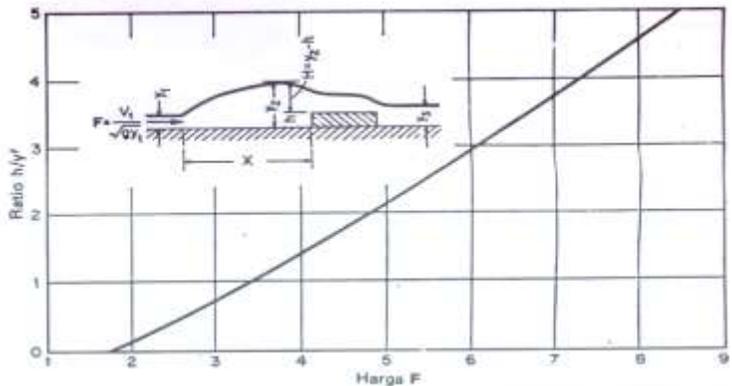
$$F = \frac{Q^2}{g.A} + z_A \dots\dots\dots (2.9)$$

Persamaan (2.9) merupakan fungsi yang memuat dua hal, yaitu momentum aliran melalui tampang saluran per satuan waktu tiap satuan berat air dan gaya persatuan berat air. Keduanya merupakan gaya per satuan berat air, maka jumlahnya disebut gaya spesifik.

D. Loncatan dengan Ambang

Loncatan hidrolis dapat dikendalikan atau diarahkan dengan menggunakan ambang, misalnya sekat pelimpah bentuk tajam, sekat pelimpah lebar, dan penurunan atau kenaikan mendadak pada lantai saluran. Fungsi ambang adalah untuk menjaga agar loncatan tetap terbentuk dan mengendalikan posisinya pada berbagai keadaan.

Pemasangan ambang atau sekat diawal terjadinya loncatan air dapat secara efektif meredam energi. Foster dan Skrinde (Chow,1959) mengembangkan grafik hubungan antara bilangan Froude, panjang loncatan hidrolis, tinggi muka air sebelum loncatan maupun tinggi sekat untuk sekat ambang lebar seperti gambar di bawah.



Gambar 2.4. Grafik hubungan analitis antara Fr dan c/h_1 untuk sekat ambang lebar (Chow,1985)

Penggunaan sekat ambang datar dapat efektif jika memenuhi persamaan berikut :

$$y_3 < \frac{(2.y_2 + h)}{3} \dots\dots\dots (2.10)$$

Jarak antara sekat dengan awal loncatan dapat dihitung dengan persamaan :

$$X = 5(h + y_3) \dots\dots\dots (2.11)$$

dengan X = jarak antara sekat dengan awal loncatan, y_3 = ketinggian muka air di hilir sekat, y_2 = ketinggian maksimal loncat hidrolis, dan h = tinggi sekat.

E. Panjang Loncatan Air

Panjang loncatan air yang lain adalah jarak mendatar antara permukaan awal loncatan air sampai pada titik di permukaan gulungan ombak yang segera menuju hilir (Chow, 1985). Panjang loncat air sukar ditentukan secara teoritis, tetapi telah diteliti dengan cara percobaan oleh beberapa ahli hidraulika. Dari hasil percobaan biro reklamasi Amerika Serikat (USBR) ditemukan persamaan empiris yang menyatakan panjang loncatan, yaitu :

$$L_j = A (h_2 - h_1) \dots\dots\dots (2.12)$$

dengan A = suatu konstanta yang nilainya berkisar antara 5,0 – 6,9, L_j = panjang loncat air, h_2 = kedalaman air di bagian hilir, dan h_1 = kedalaman awal loncatan air dan kecepatan aliran dihitung dengan menggunakan persamaan :

$$Q = A . V \rightarrow V = \frac{Q}{A} \rightarrow V = \frac{Q}{B.Y_1} \dots\dots\dots (2.13)$$

F. Energi Spesifik

Secara umum jumlah energi pada penampang saluran dinyatakan dengan :

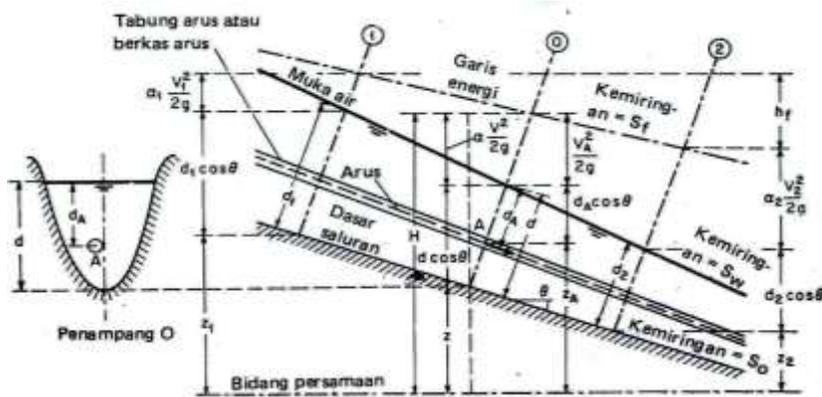
$$H = Z_A + d_A \cos \phi + \frac{VA^2}{2g} \dots\dots\dots (2.13)$$

Menurut prinsip kekekalan energi, jumlah tinggi energi pada penampang 1 dihilir akan sama dengan jumlah tinggi energi pada penampang 2 di hilir akan sama dengan jumlah tinggi hf di antara kedua penampang dan dinyatakan dengan persamaan energi dari Bernoulli :

$$Z_1 + d_1 \cos \theta + \alpha \frac{V_1^2}{2g} = Z_2 + d_2 \cos \theta + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} + hf \dots\dots (2.14)$$

dan , menurut Persamaan (2.14) untuk $z = 0$, energi spesifik adalah :

$$E = d \cos \theta + \alpha \frac{V^2}{2g} \dots\dots\dots (2.15)$$



Gambar 2.8. Persamaan energi dalam saluran terbuka berubah beraturan (Chow, 1985)

$$Z_1 + d_1 \cos \theta + \alpha \frac{V_1^2}{2g} = Z_2 + d_2 \cos \theta + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} + hf \quad \dots \quad (2.16)$$

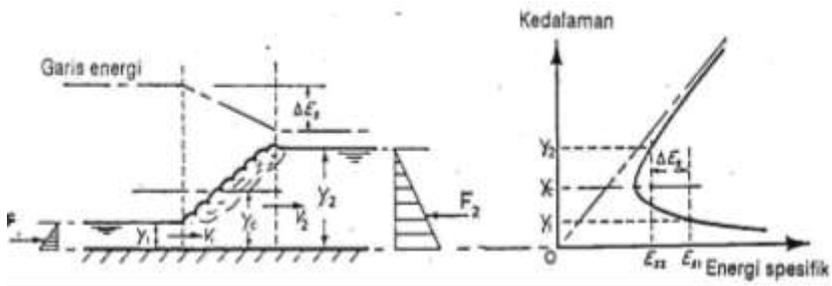
dan , menurut Persamaan (2.16) untuk $z = 0$, energi spesifik adalah :

$$E = d \cos \theta + \alpha \frac{V^2}{2g} \quad \dots \quad (2.17)$$

Atau, untuk saluran yang kemiringannya kecil dan $\alpha = 1$

$$E = h + \frac{V^2}{2g} \quad \dots \quad (2.17)$$

G. Kehilangan Energi



Gambar 2.9. Kehilangan energi pada loncat air (B. Triatmodjo, 1993)

Kehilangan energi pada loncat air adalah sama dengan perbedaan energi spesifik sebelum dan setelah loncat air yang diberikan oleh bentuk :

$$\begin{aligned} \Delta E &= E_1 - E_2 \\ \Delta E &= \left(h_1 + \frac{V_1^2}{2g} \right) - \left(h_2 + \frac{V_2^2}{2g} \right) \\ \Delta E &= (h_1 - h_2) + \frac{q^2}{2gh_1^2} - \frac{q^2}{2gh_2^2} \\ \Delta E &= (h_1 - h_2) + \frac{q^2}{2gh_1^2 h_2^2} (h_2^2 - h_1^2) \end{aligned}$$

Persamaan (2.17) digunakan untuk mengeleminasi nilai q, sehingga :

$$\Delta E = E_1 - E_2 = \frac{(h_2 - h_1)^3}{4h_1 h_2} \dots\dots\dots (2.18)$$

H. Hubungan Kedalaman Konjugasi

Untuk saluran persegi panjang dengan lebar saluran B, jika debit $Q_1 = v_1.A_1$ atau $Q_2 = v_2.A_2$, luas tampang aliran $A_1 = b.h_1$, $A_2 = b.h_2$, jarak titik berat tampang aliran $z_1 = h_1/2$, $z_2 = h_2/2$ angka Froude $Fr = v_1/\sqrt{g.h_1}$ di masukkan kedalam Persamaan (2.7), maka akan didapat :

$$\begin{aligned} \frac{Q^2}{g} \left(\frac{1}{A_1} - \frac{1}{A_2} \right) &= \bar{z}_2 . A_2 - \bar{z}_1 . A_1 \\ b \frac{q^2}{g} \left(\frac{1}{h_1} - \frac{1}{h_2} \right) &= \frac{1}{2} b.h_2 - \frac{1}{2} b.h_1 \\ 2 \frac{q^2}{g} \frac{(h_2 - h_1)}{h_1 . h_2} &= (h_1 + h_2) . (h_2 - h_1) \\ h_2 + h_1 &= \frac{2.q^2}{g.h_1 h_2} \rightarrow h_2^2 + h_1 . h_2 - \frac{2.q^2}{g.h} = 0 \dots\dots\dots (2.19) \end{aligned}$$

Persamaan (2.19) merupakan persamaan kuadrat yang dapat diselesaikan untuk mendapatkan nilai h_2 , yaitu :

$$h_2 = \frac{-h_1 \pm \sqrt{h_1^2 + 4.2q / gh_1}}{2}$$

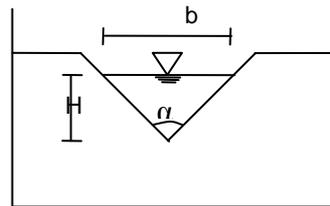
Dari kedua nilai h_2 diambil nilai yang positif, sehingga :

$$\frac{h_2}{h_1} = \frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + 8Fr^2} - 1 \right) \dots\dots\dots (2.20)$$

Persamaan (2.20) menyatakan hubungan kedalaman konjugasi antara dua kedalaman aliran pembentuk loncatan air, yaitu kedalaman awal loncatan h_1 , kedalaman akhir loncat air h_2 , dan angka Froude.

I. Alat Ukur Thomson

Alat ukur ini berbentuk segitiga sama kaki terbalik, dengan sudut puncak di bawah. Sudut puncak dapat merupakan sudut siku atau sudut lain, misalnya 60° atau 30° .



Gambar 2.10. Alat ukur debit Thomson

Alat ukur Thomson sering digunakan untuk mengukur debit-debit yang kecil. Ambang pada alat ukur Thomson merupakan suatu pelimpah air sempurna yang melewati ambang tipis dengan rumus pengalirannya adalah sebagai berikut maka :

$$Q = c \cdot H^{5/2} \dots\dots\dots (2.21)$$

dengan Q = debit, H = tinggi muka air pada Thomson, dan c = koefisien debit Thomson.

III. METODE PENELITIAN

A. Bahan dan Alat Penelitian

Hampir sebagian besar bagian saluran yang ada terdiri dari saluran tampang persegi. Saluran dibuat dengan panjang 15 m dengan lebar saluran 27 cm, ketinggian dinding saluran ditetapkan 20 cm. Saluran juga dilengkapi dengan tiga buah pintu air dan alat ukur debit Thomson. Alat peraga yang digunakan berupa bendung dan sekat ambang datar yang terbuat dari bahan papan dan balok kayu. Bendung berukuran panjang 25 cm, tinggi 10 cm, dan lebar bendung

27 cm. Ukuran sekat ditetapkan dengan yaitu 2×2 cm, dan 3×3 cm dan panjang sekat dibuat menyesuaikan lebar saluran. Model alat peraga diletakan pada saluran tampang persegi yang terdapat pada bak peragaan. Untuk mengalirkan air digunakan pompa jenis Genset TP 950 yang besar debitnya dapat diatur melalui gas yang terdapat pada pompa tersebut.

Bak penampungan hulu berfungsi menampung air yang dipompa dari sumur serta dari bak penampungan hilir. Bak didesain berukuran panjang 3 m, lebar 2 m, dan tinggi 1 m. Lantai bak berada pada elevasi $\pm 0,00$. Bak dilengkapi dengan pintu air dan alat ukur debit Thomson berupa bendung tipe segitiga. Ketinggian muka air yang melalui alat ukur debit Thomson diatur melalui bukaan pintu air yang terdapat pada bak penampungan ini.

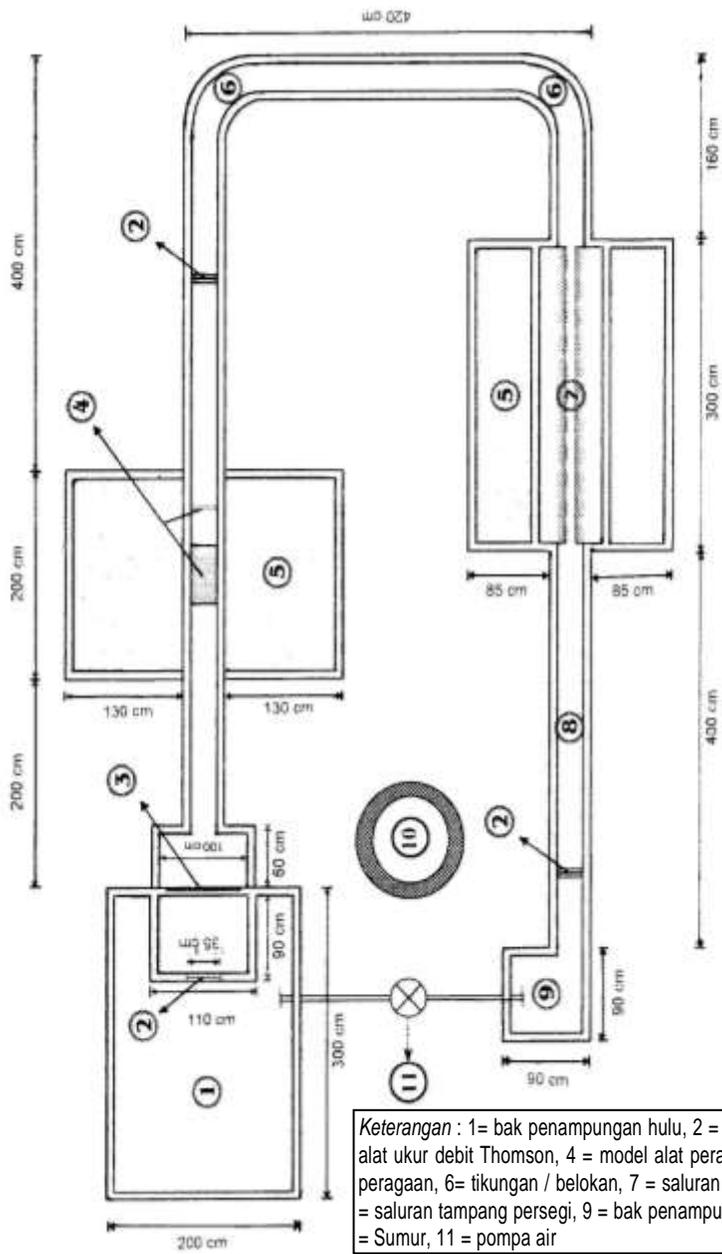
Saluran jenis trapesium terdapat pada bak peraga 2 dengan panjang saluran 3 m, lebar dasar saluran 8,5 cm, dengan kemiringan dinding 45° . Ketinggian saluran menyesuaikan ketinggian dinding saluran tampang persegi. Pembuatan belokan pada saluran ini dimaksudkan untuk mencegah pengaruh arus balik (*back water*) yang dapat mengganggu pada saat proses pengamatan berlangsung. Pada saluran ini dibuat dua buah belokan.

Bak penampungan hilir merupakan bagian terakhir dari proses mengalirnya air sebelum airnya dipompa kembali ke bak penampungan hulu. Bak mempunyai ukuran panjang 90 cm, dan lebar 90 cm. Lantai bak berada 50 cm dibawah muka tanah asli dan dibuat dengan menggali tanah tersebut. Volume tampungan bak hilir mencapai 405 liter.

B. Cara Pengukuran Debit Pada Saluran

Perhitungan debit aliran pada saluran terbuka dilakukan melalui proses kalibrasi pada alat ukur debit Thomson. Proses kalibrasi tersebut dilakukan dengan tujuan mencari nilai koefisien debit Thomson yang berlaku pada saluran. Adapun pelaksanaan kalibrasi secara garis besar dapat diuraikan dalam tahapan sebagai berikut :

1. Melakukan persiapan dan pengecekan pada peralatan, air, pompa, saluran, dan lain-lain, yang akan digunakan dalam pengamatan/pengukuran ini.
2. Mengisi bak penampungan hulu dengan air yang dipompa dari sumur
3. Pompa bagian input dipindahkan kedalam bak tampung hilir. Hal ini dimaksudkan agar air yang ditampung pada bak hilir dapat dialirkan kembali pada bak tampung hulu dengan pompa, sehingga proses sirkulasi air dalam saluran berjalan dengan lancar.
4. Membuka pintu air pada bak hulu, dan pompa dihidupkan sehingga air mengalir pada seluruh saluran dengan melewati alat ukur debit Thomson. Tinggi muka air pada Thomson diatur sesuai dengan ketinggian yang diinginkan.



Gambar 3.1. Denah saluran terbuka

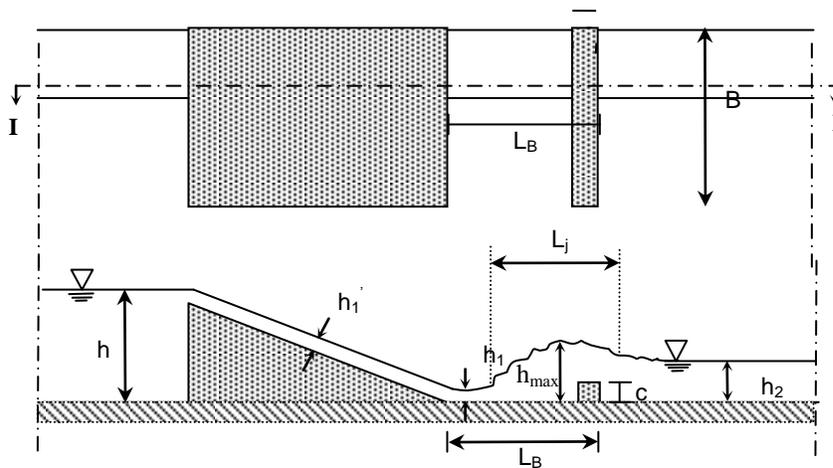
Keterangan : 1= bak penampungan hulu, 2 = pintu air, 3 = alat ukur debit Thomson, 4 = model alat peraga, 5 = bak peragaan, 6= tikungan / belokan, 7 = saluran trapesium, 8 = saluran tampang persegi, 9 = bak penampungan hilir, 10 = Sumur, 11 = pompa air

5. Setelah tinggi muka air pada Thomson konstan, pengukuran dilakukan dengan menampung air pada bak hilir dengan menggunakan *bucket* berkapasitas 23 liter. Waktu yang dibutuhkan untuk mengisi ember tersebut hingga penuh dicatat.
6. Pengukuran seperti yang telah dijelaskan diatas diulangi pada berbagai ketinggian muka air Thomson.

Besarnya debit (Q) aliran pada setiap tinggi muka air pada Thomson dihitung dengan menggunakan rumus perbandingan volum dan selanjutnya nilai koefisien debit Thomson (c) dapat dihitung.

C. Cara Pengukuran Alat Peraga

Data yang diambil dalam penelitian ini diperoleh dari hasil pengamatan dan pengukuran pada model bendung beserta kolam olakan. Letak loncatan yang terjadi terdapat pada badan bendung yaitu pada kondisi $h_1' = h_1$, dan pada kolam olak pada kondisi $h_1 \neq h_1'$. Parameter yang diukur dalam meliputi parameter aliran dan parameter loncatan air sebagaimana ditunjukkan pada Gambar (3.2).



Gambar 3.2. Potongan I - I

Keterangan : c = dimensi sekat, h_0 = tinggi muka air dibagian hulu bendung, h_1' = ketinggian muka air pada badan bendung, h_1 = tinggi muka air pada awal loncatan, h_2 = tinggi muka air setelah loncatan, h_{max} = tinggi muka air maksimum, L_j = panjang loncatan air, dan L_B = panjang kolam olak

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Kalibrasi Alat Ukur Debit Thomson

Tinggi muka air pada Thomson (H) = 4 cm = 0,04 m, volume air (V) = 23 liter = 0,023 m³. Diambil enam kali percobaan dengan waktu pengaliran sebagai berikut : 42,71 detik, 40,93 detik, 41,31 detik, 41,90 detik, 41,84 detik, 41,44 detik.. Total waktu pengaliran = 250,13 detik

$$\text{Waktu aliran rata-rata } \bar{tr} = \frac{250,13 \text{ dt}}{6} = 41,688 \text{ det}$$

$$Q = \frac{\text{Volume}(V)}{\text{Waktu Rata - rat } (\bar{tr})} = \frac{0,023 \text{ m}^3}{41,688 \text{ dt}} = 5,51 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 / \text{det}$$

$$Q = c \cdot H^{5/2} = \frac{5,51 \cdot 10^{-4}}{0,04^{5/2}} = 1,721$$

Perhitungan untuk $H = 5$ cm sampai 12 cm diselesaikan dengan cara yang sama dan hasilnya dirangkum dalam Tabel 4.1.

Tabel 4.1. Data kalibrasi debit Thomson

No	H (m)	Waktu (detik)						\bar{tr} (detik)	Q (m ³ /detik)	c
		t ₁	t ₂	t ₃	t ₄	t ₅	t ₆			
1	0,04	42,71	40,93	41,31	41,90	41,84	41,44	41,688	5,51 x 10 ⁻⁴	1,721
2	0,05	27,62	27,41	27,35	27,53	28,32	28,27	27,750	8,28 x 10 ⁻⁴	1,481
3	0,06	17,60	18,69	18,41	18,53	18,31	17,56	18,183	1,26 x 10 ⁻³	1,428
4	0,07	9,00	9,94	9,8	8,78	9,06	8,69	9,211	2,50 x 10 ⁻³	1,928
5	0,08	8,88	8,84	8,84	8,81	8,75	9,01	8,855	2,60 x 10 ⁻³	1,436
6	0,09	7,06	7,72	7,25	7,13	7,21	7,03	7,233	3,17 x 10 ⁻³	1,304
7	0,10	6,56	6,34	6,50	6,16	6,25	6,38	6,365	3,61 x 10 ⁻³	1,141
8	0,11	5,15	5,28	5,15	5,12	5,10	5,31	5,185	4,43 x 10 ⁻³	1,103
9	0,12	4,81	4,63	4,75	4,78	4,69	4,78	4,740	4,85 x 10 ⁻³	0,972

$$c = \frac{1,721+1,428+1,436+1,481+1,928+1,304+1,141+1,103+0,972}{9} = 1,390$$

sehingga rumus Thomson yang berlaku dalam saluran terbuka adalah sebagai berikut :

$$Q = 1,390 \cdot H^{5/2}$$

B. Hasil Perhitungan Karakteristik Aliran

Data karakteristik aliran yang diamati meliputi tinggi muka air hulu (h_0), tinggi awal loncat air (h_1), dan tinggi muka air hilir setelah loncatan (h_2). Debit aliran yang digunakan adalah debit aliran hasil perhitungan kalibrasi. Dari data diatas dapat dihitung kecepatan aliran (v) maupun angka Froude aliran, baik diawal loncat air (Fr_1), maupun di bagian hilir setelah loncat air (Fr_2). Pengukuran karakteristik aliran dibedakan berdasarkan adanya penggunaan sekat.

Berikut ini adalah contoh perhitungan karakteristik aliran untuk debit (Q) = $2,51 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{detik}$, dimensi ambang $3 \times 3 \text{ cm}$, serta panjang kolam olak 10 cm .

1. Kecepatan Aliran

$$v = \frac{Q}{A} = \frac{Q}{B.h}$$

Kecepatan aliran awal loncatan (v_1) dan kecepatan aliran di hilir setelah loncatan (v_2)

$$v_1 = \frac{Q}{B.h_1} = \frac{2510}{(27).(1,0)} = 92,96 \text{ m/detik}$$

$$v_2 = \frac{Q}{B.h_2} = \frac{2510}{(27).(3,5)} = 26,560 \text{ m/detik}$$

2. Angka Froude

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{g.h}}$$

Angka Froude diawal loncatan dan di bagian hilir setelah loncatan :

$$Fr_1 = \frac{v_1}{\sqrt{g.h_1}} = \frac{92,962}{\sqrt{(981).(1,0)}} = 2,968$$

dan

$$Fr_2 = \frac{v_2}{\sqrt{g.h_2}} = \frac{26,560}{\sqrt{(981).(3,5)}} = 0,453$$

Perhitungan seperti diatas, dilakukan pada tiga variasi debit dan pada setiap debit terdapat tiga variasi panjang kolam olak dan hasilnya disajikan pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2. Hasil perhitungan karakteristik aliran dengan sekat

Ukuran Sekat (cm)	Q (cm ³ /dt)	L _B (cm)	h _o (cm)	h ₁ ' (cm)	h ₁ (cm)	h ₂ (cm)	h _{max} (cm)	v ₁ (cm/dt)	v ₂ (cm/dt)	Fr ₁	Fr ₂	
3 x 3	2510	10	12,5	1,20	1,00	3,5	4,7	92,96	26,56	2,96	0,45	
	2510	20	12,5	1,30	1,10	3,2	4,3	84,51	29,05	2,57	0,51	
	2510	30	12,5	1,30	1,15	3,2	4,0	80,83	29,05	2,40	0,51	
	4395	10	13,2	1,40	1,40	5,3	7,0	116,27	30,71	3,13	0,42	
	4395	20	13,2	1,35	1,35	5,3	7,3	120,57	30,71	3,31	0,42	
	4395	30	13,2	1,40	1,30	5,3	7,4	125,21	30,71	3,50	0,42	
	5570	10	13,3	1,80	1,80	5,4	7,3	114,60	38,20	2,72	0,52	
	5570	20	13,3	1,50	1,50	5,5	7,7	137,53	37,50	3,58	0,50	
	5570	30	13,3	1,70	1,60	5,45	7,6	128,93	38,20	3,25	0,52	
	2 x 2	2510	10	12,5	1,1	1,20	2,9	4,0	77,46	32,05	2,25	0,60
		2510	20	12,5	1,1	1,15	3,1	4,0	80,83	29,98	2,40	0,54
		2510	30	12,5	1,1	1,30	3,1	3,9	71,50	29,98	2,00	0,54
4395		10	13,2	1,5	1,50	4,9	6,3	108,51	33,21	2,82	0,47	
4395		20	13,2	1,5	1,30	5,1	6,7	125,21	31,91	3,50	0,45	
4395		30	13,2	1,5	1,40	5,0	6,6	116,26	32,55	3,13	0,46	
5570		10	13,3	1,7	1,90	5,1	6,6	108,57	40,45	2,51	0,57	
5570		20	13,3	1,7	1,70	5,2	6,8	121,35	39,67	2,97	0,55	
5570		30	13,3	1,7	1,65	5,2	6,9	125,02	39,67	3,10	0,55	

Tabel 4.3. Hasil perhitungan karakteristik aliran tanpa sekat

Q (cm ³ /dt)	h _o (cm)	h ₁ ' (cm)	h ₁ (cm)	h ₂ (cm)	h _{max} (cm)	v ₁ (cm/dt)	v ₂ (cm/dt)	Fr ₁	Fr ₂
2510	12,4	1,1	1,2	2,95	3,8	77,46	31,51	2,25	0,58
4395	13,0	1,4	1,7	4,80	5,4	95,75	33,91	2,34	0,49
5570	13,2	1,6	1,9	5,70	6,6	108,57	36,19	2,51	0,48

C. Hasil Perhitungan Karakteristik Loncat Air

Berikut ini adalah contoh perhitungan karakteristik loncat air pada debit 2510 cm/detik, panjang kolam olak (L_B) = 10 cm, dengan ukuran sekat 3 x 3 cm. Hasil perhitungan karakteristik loncatan air selengkapnya diberikan pada Tabel 4.4

Energi spesifik di awal dan akhir loncatan :

$$E = h + \frac{v^2}{2.g}$$

$$E_1 = h_1 + \frac{v_1^2}{2.g} = 1,0 + \frac{92,96^2}{2,981} = 5,40 \text{ cm}$$

$$E_2 = h_2 + \frac{v_2^2}{2.g} = 3,5 + \frac{26,56^2}{2,981} = 3,85 \text{ cm}$$

Kehilangan energi sebelum dan sesudah dihitung dengan Persamaan 2.15.

$$\Delta E = E_1 - E_2 = \frac{(h_2 - h_1)^3}{4.h_1.h_2} = \frac{(3,5 - 1,0)^3}{4.(1,0).(3,5)} = 1,116 \text{ cm}$$

Panjang loncat air dihitung berdasarkan rumus empiris sesuai USBR :

$$L_j = A (h_2 - h_1) = 5 (3,5 - 1,0) = 12,5 \text{ cm}$$

$$L_j = 6,9 (3,5 - 1,0) = 17,25 \text{ cm}$$

Tabel 4.4. Hasil perhitungan karakteristik loncat air dengan sekat

Ukuran Sekat	Q (cm ³ /dt)	L _B (cm)	h ₁ (cm)	h ₂ (cm)	v ₁ (cm/dt)	v ₂ (cm/dt)	E ₁ (cm)	E ₂ (cm)	ΔE (cm)	L _j (cm)
3 x 3 cm	2510	10	1,00	3,5	92,96	26,56	5,40	5,281	1,116	12,50-17,25
	2510	20	1,10	3,2	84,51	29,05	4,74	3,630	0,657	10,50-14,49
	2510	30	1,15	3,2	80,83	29,05	4,48	3,630	0,585	10,25-14,14
	4395	10	1,40	5,3	116,27	30,71	8,29	5,818	1,998	19,50-26,91
	4395	20	1,35	5,3	120,57	30,71	8,75	5,763	2,153	19,75-27,25
	4395	30	1,30	5,3	125,21	30,71	9,29	5,730	2,322	20,00-27,60
	5570	10	1,80	5,4	114,60	38,20	8,49	5,946	1,200	18,00-24,84
	5570	20	1,50	5,5	137,53	37,50	11	6,005	1,939	20,00-27,60
	5570	30	1,60	5,45	128,93	38,20	0,07	5,897	1,587	19,25-26,56
2 x 2 cm	2510	10	1,20	2,9	77,46	32,05	4,25	3,343	0,352	8,50-11,73
	2510	20	1,15	3,1	80,83	29,98	4,48	3,504	0,519	9,75-13,45
	2510	30	1,30	3,1	71,50	29,98	3,90	3,558	0,361	9,00-12,42
	4395	10	1,50	4,9	108,51	33,21	7,50	3,558	1,336	17,0-23,46
	4395	20	1,30	5,1	125,21	31,91	9,29	5,530	2,069	19,0-26,22
	4395	30	1,40	5,0	116,26	32,55	8,29	5,499	1,666	18,0-24,84
	5570	10	1,90	5,1	108,57	40,45	7,90	5,791	0,845	16,00-22,08
	5570	20	1,70	5,2	121,35	39,67	9,20	5,764	1,212	17,50-24,15
	5570	30	1,65	5,2	125,02	39,67	9,61	5,746	1,303	17,75-24,49

Tabel 4.5. Hasil perhitungan karakteristik loncat air tanpa sekat

Q (cm ³ /dt)	h ₁ (cm)	h ₂ (cm)	v ₁ (cm/dt)	v ₂ (cm/dt)	E ₁ (cm)	E ₂ (cm)	ΔE (cm)	L _j (cm)
2510	1,2	2,95	77,46	31,51	4,258	2,606	0,072	8,75-12,07
4395	1,7	4,80	95,75	33,91	6,372	3,486	0,087	15,5-21,39
5570	1,9	5,70	108,57	36,19	7,908	3,667	0,058	19,0-26,22

Tabel 4.6. Perbandingan antara hasil perhitungan dan pengukuran panjang loncat air dengan menggunakan sekat.

Ukuran Sekat	Q (cm ³ /dt)	L _B (cm)	L _j Pengukuran (cm)	L _j USBR	
				Min (cm)	Max (cm)
3 x 3 cm	2510	10	17	12,50	17,25
	2510	20	14	10,50	14,49
	2510	30	13	10,25	14,14
	4395	10	22	19,50	26,91
	4395	20	26	19,75	27,25
	4395	30	23	20,00	27,60
	5570	10	22	18,00	24,84
	5570	20	26	20,00	27,60
	5570	30	25	19,25	26,56
2 x 2 cm	2510	10	12	8,50	11,73
	2510	20	10	9,75	13,45
	2510	30	9	9,00	12,42
	4395	10	19	17,00	23,46
	4395	20	23	19,00	26,22
	4395	30	21	18,00	24,84
	5570	10	20	16,00	22,08
	5570	20	25	17,50	24,15
	5570	30	26	17,75	24,49

Tabel 4.7. Perbandingan antara hasil perhitungan dan pengukuran panjang loncat air tanpa penggunaan sekat.

No.	Q (cm ³ /dt)	L _j Pengukuran (cm)	L _j USBR	
			Min (cm)	Max (cm)
1.	2510	19	8,75	12,07
2.	4395	27	15,5	21,39
3.	5570	31	19,0	26,22

D. Efektifitas Sekat

Tabel 4.8. Efektifitas sekat ambang datar pada berbagai variasi debit

Ukuran Sekat	Q (cm ³ /dt)	L _B (cm)	H _{max} (cm)	H ₂	H ₂ < (H _{max} .2+c)/3	Keefektifan Sekat
3 x 3 cm	2510	10	4,7	3,5	3,5 < 4,13	Efektif
	2510	20	4,3	3,2	3,2 < 3,86	Efektif
	2510	30	4,0	3,2	3,2 < 3,66	Efektif
	4395	10	7,0	5,3	5,3 < 5,66	Efektif
	4395	20	7,3	5,3	5,3 < 5,86	Efektif
	4395	30	7,4	5,3	5,3 < 5,93	Efektif
	5570	10	7,3	5,4	5,4 < 5,86	Efektif
	5570	20	7,7	5,5	5,5 < 6,13	Efektif
	5570	30	7,6	5,4	5,4 < 6,06	Efektif
2 x 2 cm	2510	10	4,0	3,2	3,2 < 3,33	Efektif
	2510	20	4,0	3,3	3,3 < 3,33	Efektif
	2510	30	3,9	3,1	3,1 < 3,26	Efektif
	4395	10	6,3	4,9	4,9 > 4,86	Tidak efektif
	4395	20	6,7	5,1	5,1 < 5,13	Efektif
	4395	30	6,6	5,0	5,0 < 5,06	Efektif
	5570	10	6,6	5,1	5,1 > 5,06	Tidak efektif
	5570	20	6,8	5,2	5,2 = 5,2	Tidak efektif
	5570	30	6,9	5,2	5,2 < 5,26	Efektif

E. Pembahasan

Berdasarkan bilangan froude terdapat dua macam aliran yang terjadi, yaitu aliran subkritis ($Fr < 1$) dan aliran superkritis ($Fr > 1$). Aliran subkritis terjadi dibagian hilir kolam olak, sedangkan aliran superkritis terjadi dibagian hulu kolam olak pada awal loncatan. Pada setiap debit Q_1 , Q_2 , dan Q_3 dengan variasi panjang kolam olak menghasilkan letak awal loncatan yang berbeda-beda. Pada kondisi $h_1 = h_2$ letak awal loncatan berada pada badan bendung, sedangkan pada kondisi $h_1 \neq h_2$ letak awal loncatan berada pada kolam olak. Besarnya kecepatan pada bagian hilir kolam olak cenderung lebih kecil dari pada kecepatan pada hulu kolam olak, hal ini kemungkinan besar dipengaruhi oleh adanya sekat yang menghambat gerak aliran.

Dengan memperhatikan hasil perhitungan angka froude pada awal loncatan dapat pula ditentukan bahwa sebagian besar tipe loncatan yang terjadi

adalah loncatan berisolasi yang mana angka froude $Fr = 2,5 - 4,5$. Loncatan ini ditunjukkan dengan semburan berisolasi yang menyertai dasar loncatan dan bergerak kepermukaan, serta adanya gelombang besar yang tidak teratur. Sedangkan pada bagian hilir setelah loncatan angka froude relatif kecil yaitu $Fr < 1$ sehingga hampir tidak terbentuk loncatan.

Kedalaman aliran dibagian hilir kolam olak sangat dipengaruhi oleh adanya sekat. Penggunaan sekat ambang datar dapat menaikkan muka air dibagian hilir kolam olak. Hal ini ditunjukkan dalam hasil perhitungan pada Tabel 4.4 dan 4.5. Ukuran sekat yang digunakan pada kolam olak harus disesuaikan dengan debit aliran pada saluran.

Panjang loncatan air yang dihasilkan pada setiap variasi debit dan panjang kolam olak adalah berbeda-beda. Loncatan terpanjang terjadi pada $Q = 5570 \text{ cm}^3/\text{detik}$, $L_B = 20 \text{ cm}$, dan ukuran sekat $3 \times 3 \text{ cm}$ dan terpendek pada debit $Q = 2510 \text{ cm}^3/\text{detik}$, $L_B = 10 \text{ cm}$, dan ukuran sekat $2 \times 2 \text{ cm}$. Penggunaan sekat ambang datar pada kolam olak terbukti dapat memperpendek loncatan. Hal tersebut diketahui dengan membandingkan panjang loncatan air pada kolam olak tanpa sekat pada debit yang sama cenderung lebih besar dibanding kolam olak dengan sekat. Besar redaman energi yang dihasilkan kolam olak dengan sekat ambang datar juga lebih besar bila dibandingkan pada kolam olak yang tidak dilengkapi sekat. Hal ini ditunjukkan pada hasil perhitungan karakteristik loncatan air dengan kehilangan energi terbesar terdapat pada $L_B = 30 \text{ cm}$, $Q = 4395 \text{ cm}^3/\text{detik}$, ukuran sekat $3 \times 3 \text{ cm}$ dan terkecil pada $L_B = 10 \text{ cm}$ dengan $Q = 2510 \text{ cm}^3/\text{detik}$ pada ukuran sekat $3 \times 3 \text{ cm}$.

Dengan membandingkan hasil pengukuran panjang loncatan air hasil pengujian dengan perhitungan menggunakan rumus USBR ternyata relatif mendekati. Ketidakkcocokan hanya terjadi pada $Q = 2510 \text{ cm}^3/\text{detik}$, $L_B = 20 \text{ cm}$, dan ukuran sekat $2 \times 2 \text{ cm}$. Hal ini dimungkinkan kurang akuratnya pengamatan akibat adanya gelombang/riak air.

Tinggi loncatan maksimum terjadi pada $Q = 5570 \text{ cm}^3/\text{detik}$, $L_B = 20 \text{ cm}$, dengan ukuran sekat $3 \times 3 \text{ cm}$ yaitu sebesar $7,7 \text{ cm}$ dan minimum terjadi pada $Q = 2510 \text{ cm}^3/\text{detik}$ tanpa adanya sekat dan tinggi loncatan pada kolam olak yang dilengkapi sekat lebih besar bila dibandingkan dengan kolam olak tanpa sekat.

Secara umum perencanaan panjang kolam olak dan ukuran sekat pada pengujian menunjukkan hasil yang efektif terutama pada sekat ukuran $3 \times 3 \text{ cm}$. Penggunaan sekat yang kurang efektif yaitu pada $Q = 4395 \text{ cm}^3/\text{detik}$, $L_B = 10 \text{ cm}$, serta $Q = 5570 \text{ cm}^3/\text{detik}$, $L_B = 10 \text{ cm}$ dan $L_B = 20 \text{ cm}$, untuk ukuran sekat $2 \times 2 \text{ cm}$. Ketidakefektifan disebabkan oleh ketidakmampuan sekat dengan dimensi yang kecil untuk meredam energi aliran dengan debit yang besar, sehingga untuk menghindari ketidakefektifan tersebut dibutuhkan pengaturan panjang kolam olakan dengan menyesuaikan besar debit aliran pada saluran.

V. KESIMPULAN DAN SARAN

A. Kesimpulan

Dari hasil pengujian yang telah dilakukan pada saluran terbuka dan analisis data-hasil pengukuran dapat disimpulkan :

- a. Sekat ambang datar dapat menaikkan tinggi muka air di hilir kolam olak dan memperpendek loncatan air pada bendung dan efektif meredam energi aliran.
- b. Panjang loncatan air yang dihasilkan secara umum memenuhi hasil perhitungan loncatan air menggunakan rumus empiris USBR.
- c. Keefektifan penggunaan sekat ambang datar pada berbagai variasi Q dan L_B tercapai pada sekat berukuran 3×3 cm
- d. Bendung beserta sekat ambang datar dalam saluran terbuka dapat menunjukkan loncatan air yang tampak dengan terjadinya aliran subkritis dan superkritis.
- e. Sekat ambang datar baik digunakan pada kolam olak dibelakang bangunan pelimpah karena dapat mengurangi bahaya penggerusan/pengikisan.
- f. Besarnya debit aliran sangat mempengaruhi perencanaan kolam olak beserta ukuran sekatnya.

B. Saran

Setelah memperhatikan hasil yang diperoleh, maka perlu dilakukan penyempurnaan-penyempurnaan sebagai berikut :

- a. Perlu dipikirkan agar air yang akan melewati alat ukur Thomson tidak timbul gelombang atau riak yang mengakibatkan kesulitan dalam pengamatan tinggi muka air Thomson.
- b. Volume bak penampungan hilir perlu dibuat lebih besar untuk mencegah meluapnya air pada bak tersebut pada saat pengujian dengan debit yang besar dilakukan sehingga proses sirkulasi air pada saluran berjalan lancar.
- c. Permukaan dasar saluran pada bak peragaan diusahakan lebih rata dan datar, agar loncatan tidak bergeser pada dinding saluran.

DAFTAR PUSTAKA

- Chow, Ven Te, 1985, *Hidrolika Saluran Terbuka*, Erlangga, Jakarta
- French, Richard. H, 1985, *Open-Channel Hydraulics*, Mc Graw Hill Book Company, New York.
- Raju, Ranga, K. G, 1986, *Aliran Melalui Saluran Terbuka*, Erlangga, Jakarta.
- Subarkah, Iman, 1979, *Bangunan Air*, Idea Dharma, Bandung.
- Triatmodjo, Bambang, 1993, *Hidrolika Jilid 1*, Beta offset, Yogyakarta.
- Triatmodjo, Bambang, 1993, *Hidrolika Jilid 2*, Beta offset, Yogyakarta.