

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Manajemen sumber daya air yang efektif merupakan pilar fundamental dalam menjamin ketahanan pangan, energi, dan air suatu bangsa, khususnya di negara tropis maritim seperti Indonesia yang dianugerahi curah hujan tinggi namun rentan terhadap distribusi spasial dan temporal yang tidak merata. Di tengah dinamika perubahan iklim global yang memicu fluktuasi ekstrem pola hujan mulai dari kekeringan berkepanjangan hingga banjir bandang yang merusak infrastruktur hidraulik seperti bendung memegang peranan esensial sebagai instrumen vital untuk regulasi aliran air. Bendung tidak hanya berfungsi sebagai struktur pengatur muka air untuk keperluan irigasi ekstensif, penyediaan air baku domestik dan industri, serta pengendalian banjir, tetapi juga seringkali diintegrasikan dalam skema pembangkit listrik tenaga air (PLTA) skala kecil hingga menengah, berkontribusi pada diversifikasi energi nasional. Keberadaan bendung secara langsung menopang produktivitas sektor pertanian, menjaga keseimbangan ekosistem sungai, dan melindungi komunitas dari dampak hidrometeorologi ekstrem.

Namun, optimalisasi fungsi bendung tidak terlepas dari kompleksitas interaksi antara struktur dan dinamika aliran fluida. Ketika air melintasi tubuh bendung, ia mengalami transformasi energi potensial menjadi energi kinetik yang sangat tinggi, memicu fenomena loncatan hidrolis di hilir. Proses ini sangat penting untuk mendisipasi kelebihan energi kinetik dan mengurangi kecepatan aliran yang berpotensi merusak. Namun, loncatan hidrolis seringkali disertai dengan turbulensi ekstrem dan tekanan pulsatif yang fluktuatif pada dasar serta dinding struktur. Apabila energi yang didisipasi tidak dikelola secara memadai melalui sistem peredam energi yang dirancang dengan cermat, dapat timbul masalah serius berupa tegangan struktural berlebihan, getaran yang merusak, hingga ancaman serius terhadap stabilitas komponen bendung itu sendiri. Efisiensi peredam energi dalam mengubah energi kinetik menjadi panas dan mengurangi gejolak aliran sangat menentukan umur pakai dan keamanan operasional bendung.

Lebih jauh, keberhasilan sebuah desain bendung modern tidak hanya diukur dari kemampuannya untuk mengalirkan debit secara aman, tetapi juga dari efisiensi hidraulik secara keseluruhan. Hal ini mencakup minimalisasi kehilangan energi yang tidak diinginkan di bagian hulu, optimalisasi bentuk ambang yang memungkinkan aliran lancar, hingga perancangan peredam energi yang mampu melakukan disipasi dengan dimensi struktural yang paling ekonomis. Desain yang menyebabkan inefisiensi operasional, misalnya membutuhkan pemeliharaan sering karena getaran berlebihan, atau bahkan kegagalan struktural, akan menimbulkan biaya perbaikan dan rehabilitasi yang substansial. Dengan pemahaman mendalam tentang mekanisme disipasi energi, distribusi tegangan, serta karakteristik aliran turbulen di sekitar bendung menjadi prasyarat untuk mencapai desain yang superior.



Dalam konteks rekayasa hidraulik, pemahaman yang komprehensif tentang perilaku aliran di sekitar bendung sangat esensial untuk mencegah berbagai permasalahan di atas. Desain peredam energi yang efektif, misalnya, membutuhkan data akurat mengenai pola aliran di bak olak pada berbagai kondisi debit. Tanpa data empiris yang memadai, perhitungan teoretis atau simulasi numerik sering kali harus bergantung pada asumsi yang menyederhanakan, yang berpotensi mengurangi akurasi hasil desain. Maka investigasi melalui model fisik menjadi fondasi untuk memvalidasi dan menyempurnakan pendekatan desain konvensional, memberikan wawasan yang tidak dapat diperoleh hanya dari perhitungan di atas kertas.

Tantangan dalam memprediksi fenomena hidraulik kompleks ini semakin meningkat seiring dengan bertambahnya skala proyek bendung dan kebutuhan akan presisi yang lebih tinggi. Meskipun telah banyak kemajuan dalam pengembangan model matematis dan komputasi untuk menganalisis aliran terbuka, akurasi prediksi untuk fenomena aliran yang sangat kompleks, tiga dimensi, dan melibatkan interaksi turbulen di sekitar bendung masih memiliki keterbatasan. Faktor-faktor seperti kekasaran dasar, geometri kompleks struktur, serta pengaruh udara terlarut dalam aliran berkecepatan tinggi seringkali sulit direpresentasikan secara presisi dalam model numerik murni. Oleh karena itu, studi model hidraulik fisik di laboratorium tetap menjadi metode yang sangat efektif dan teruji dalam rekayasa hidraulik. Pendekatan ini menawarkan kapabilitas untuk mereplikasi kondisi aliran prototipe dalam skala yang lebih kecil dengan kemiripan dinamis dan kinematik, memungkinkan observasi visual langsung terhadap pola aliran, pengukuran parameter hidraulik (kedalaman, kecepatan, tekanan) dengan presisi tinggi, serta evaluasi kinerja peredam energi di bawah berbagai skenario debit. Melalui model fisik, insinyur dapat memvalidasi teori, mengidentifikasi anomali aliran yang tidak terduga, dan mengoptimalkan desain struktural sebelum implementasi di lapangan, sehingga meminimalkan risiko kegagalan dan biaya modifikasi yang tinggi pasca konstruksi.

Merujuk pada data teknis dari skripsi terdahulu mengenai prototipe bendung mercu bulat dengan kolam olak tipe vluhter, penelitian ini dirancang untuk melakukan analisis mendalam terhadap kinerja sistem peredam energi tersebut. Melalui manipulasi sistematis terhadap tiga parameter kunci (debit aliran, panjang kolam olak, dan ambang kontrol muka air hilir) studi ini bertujuan untuk mengevaluasi secara terperinci pengaruh interaktif dari variabel-variabel tersebut terhadap efisiensi peredaman energi. Langkah investigatif ini diambil untuk mengisi kesenjangan data empiris yang ada, sehingga dapat menyediakan landasan yang lebih kuat untuk menyempurnakan pedoman desain kolam olak. Pada akhirnya,



anyu berkontribusi pada literatur hidraulika melalui penyajian konfigurasi yang diuji, tetapi juga berupaya menawarkan t meningkatkan keandalan dan efektivitas desain infrastruktur an.

1.1.1 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, masalah-masalah yang akan diteliti dalam penelitian ini dapat dirumuskan sebagai berikut:

1. Bagaimana perubahan energi spesifik terjadi di sepanjang saluran akibat variasi debit?
2. Bagaimana efektivitas peredaman energi pada kolam olak dipengaruhi oleh variasi panjang kolam olak?
3. Bagaimana pengaruh variasi ketinggian ambang kontrol hilir terhadap efektivitas peredaman energi pada tiap kolam olak?

1.1.2 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan yang ingin dicapai dalam penelitian ini adalah:

1. Menganalisis perubahan energi spesifik di sepanjang saluran untuk 3 variasi debit.
2. Menganalisis pengaruh variasi panjang kolam olak terhadap efisiensi peredaman energi.
3. Menganalisis pengaruh variasi ketinggian ambang kontrol hilir terhadap efisiensi peredaman energi pada tiap kolam olak.

1.1.3 Manfaat penelitian

Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat, baik secara akademis maupun praktis:

- Manfaat akademis: memberikan data dan analisis empiris mengenai perilaku hidraulik model bendung mercu bulat dan kolam olak tipe vluhter, yang dapat menjadi referensi bagi mahasiswa dan peneliti di bidang hidraulika untuk studi lebih lanjut.
- Manfaat praktis: memberikan wawasan teknis yang dapat menjadi bahan pertimbangan bagi para praktisi dalam upaya merancang bendung dan kolam olak yang lebih efektif, efisien, dan aman, sehingga dapat meminimalkan risiko kerusakan akibat gerusan di hilir bendung.

1.1.4 Batasan Masalah

Untuk menjaga fokus penelitian dan memastikan hasil yang dapat an, penelitian ini memiliki batasan-batasan sebagai berikut:



imen model fisik: penelitian ini menggunakan model fisik 'cu bulat dengan dimensi dan skema yang mengacu pada data gas akhir terdahulu, sehingga tidak mencakup desain bendung

2. Pengukuran profil muka air: data utama yang dikumpulkan adalah profil muka air di sepanjang saluran. Parameter hidraulika lainnya, seperti kecepatan aliran, bilangan froude, energi spesifik dan disipasi energi, dihitung berdasarkan data profil muka air dan debit yang terukur.
3. Analisis disipasi energi: fokus utama analisis adalah pada disipasi energi yang terjadi akibat terbentuknya loncat air di dalam kolam olak. Faktor-faktor kehilangan energi lainnya, seperti gesekan dinding saluran dan turbulensi di luar zona loncat air utama, diasumsikan kecil dan tidak dianalisis secara mendalam.

1.2 Teori

1.2.1 Saluran Terbuka

Pada aliran saluran terbuka maupun tertutup, keadaan aliran pada semua saluran akan mengalami perubahan. Perubahan tersebut dapat terjadi karena adanya perubahan bentuk penampang ataupun perubahan bentuk dari saluran. Hal ini mengakibatkan keadaan aliran juga berubah misalnya perubahan tinggi muka air atau perubahan kecepatan aliran. (Suciana, 2016). Pada saluran terbuka, memiliki parameter seperti lintang saluran, kekasaran, kemiringan dasar, belokan, hambatan serta debit aliran dan lain sebagainya yang juga memungkinkan kecepatan aliran berubah.

Kekasaran pada saluran terbuka tergantung pada tergantung pada kedudukan permukaan bebas. Sebab itu pemilihan koefisien gesekan untuk saluran terbuka lebih bersifat tidak pasti dibandingkan dengan untuk pipa. Umumnya, penyelesaian untuk aliran saluran terbuka lebih didasarkan pada hasil pengamatan dibandingkan dengan pada aliran pipa (Chow V. T., 1992)

Kebanyakan aliran saluran terbuka adalah turbulen, biasanya dengan air sebagai cairannya. Metode menganalisis aliran saluran terbuka tidak semaju metode untuk saluran tertutup. Persamaan-persamaan yang dipakai mengasumsikan turbulensi penuh, dengan kerugian tinggi tekan yang sebanding dengan kuadrat kecepatan. Walaupun hampir segenap data tentang aliran saluran terbuka telah diperoleh eksperimen-eksperimen mengenai aliran air, persamaan-persamaannya kiranya akan menghasilkan nilai-nilai yang wajar untuk cairan lainnya yang viskositasnya rendah (Streeter Victor, 1988). Saluran digolongkan menjadi dua macam yaitu, saluran alam (*natural*) dan saluran buatan (*artificial*).

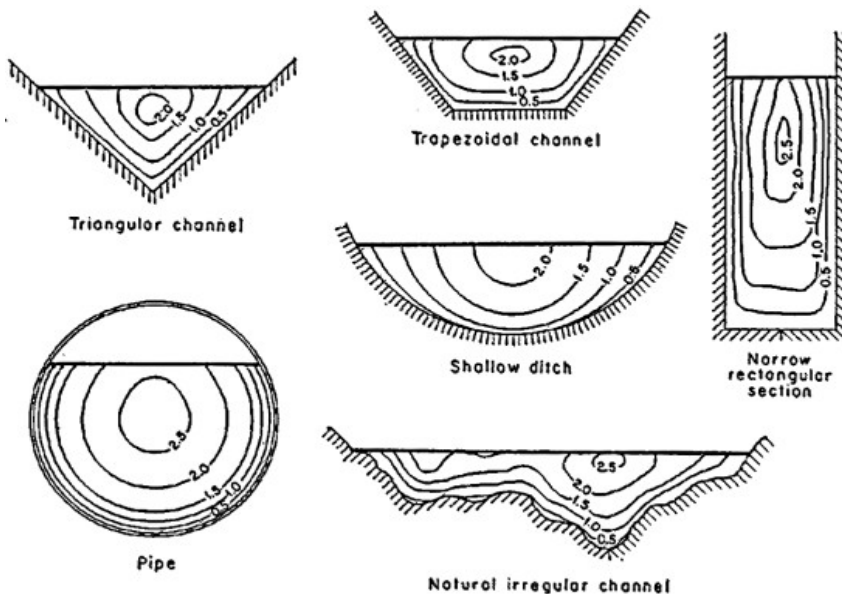


Saluran buatan merupakan suatu aliran yang meliputi semua alur aliran air sungai yang kecil dan besar dimana alirannya mengalir dari buatan adalah saluran yang dibuat dan direncanakan sesuai manfaatnya seperti, saluran irigasi, saluran drainase, saluran angkut listrik tenaga air dan saluran untuk industri. Karakteristik

aliran yang terjadi pada saluran buatan merupakan aliran seragam yang terjadi di sepanjang saluran.

1.2.1.1 Bentuk saluran

Penampang saluran alam umumnya sangat tidak beraturan, biasanya bervariasi dari bentuk seperti parabola sampai trapesium. Penampang saluran buatan biasanya dirancang berdasarkan bentuk geometris yang umum. Bentuk yang paling umum dipakai untuk saluran ber dinding tanah yang tidak dilapisi adalah bentuk trapesium, sebab stabilitas kemiringan dindingnya dapat disesuaikan. Bentuk persegi panjang dan segitiga merupakan bentuk khusus selain trapesium. Berhubung bentuk persegi panjang mempunyai sisi tegak, biasanya dipakai untuk saluran yang dibangun dengan bahan yang stabil, seperti pasangan batu, padas, logam atau kayu. Penampang segitiga hanya dipakai untuk saluran kecil, selokan, dan penyelidikan di laboratorium. Penampang lingkaran banyak dipakai untuk saluran pembuangan air kotor dan gorong-gorong berukuran sedang maupun kecil (Chow V. T., 1992).



Gambar 1. Macam-macam Bentuk Penampang dan tipikal kurva kecepatannya
Sumber. Chow, 1992



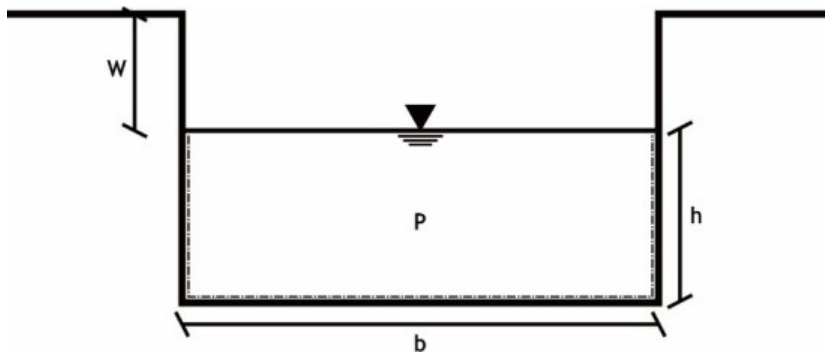
Saluran

adalah properti penampang saluran yang dapat didefinisikan geometri penampang dan kedalaman aliran. Elemen-elemen ini digunakan secara luas dalam perhitungan aliran. Untuk

penampang saluran reguler sederhana, elemen geometris dapat dinyatakan secara matematis dalam hal kedalaman aliran dan dimensi lain dari penampang tersebut. Namun, untuk penampang yang rumit dan penampang sungai alami, tidak ada rumus sederhana yang dapat ditulis untuk menyatakan elemen-elemen ini, tetapi kurva yang menggambarkan hubungan antara elemen-elemen ini dan kedalaman aliran dapat disiapkan untuk digunakan dalam perhitungan hidraulik. Definisi beberapa elemen geometris yang sangat penting diberikan di bawah ini. Elemen geometris lain yang digunakan akan didefinisikan pada saat pertama kali muncul.

Kedalaman aliran adalah jarak vertikal dari titik terendah penampang saluran ke permukaan bebas. Istilah ini sering digunakan secara bergantian dengan kedalaman penampang aliran. Secara harfiah, kedalaman penampang aliran adalah kedalaman aliran yang tegak lurus terhadap arah aliran, atau tinggi penampang saluran yang berisi air. Untuk saluran dengan sudut kemiringan longitudinal θ , dapat dilihat bahwa kedalaman aliran sama dengan kedalaman penampang aliran dibagi dengan $\cos \theta$. Oleh karena itu, dalam kasus saluran curam, kedua istilah tersebut harus digunakan secara diskriminatif.

Ketinggian muka air adalah elevasi atau jarak vertikal permukaan bebas di atas datum. Jika titik terendah penampang saluran dipilih sebagai datum, maka ketinggian muka air identik dengan kedalaman aliran.



Gambar 2. Geometri Penampang Persegi

Keterangan:

W : tinggi jagaan saluran
h : kedalaman hidrolis saluran



saluran
h
ang melintang

penampang melintang adalah luas cairan yang dipotong oleh melintang dan tegak lurus pada arah aliran. Adapun ya, yaitu:

$$A = b \times h \quad (1)$$

Keterangan:

A = luas penampang basah saluran

b = lebar dasar saluran

h = kedalaman hidrolis saluran

b) Tinggi jagaan saluran

Tinggi jagaan saluran adalah tinggi saluran mulai dari permukaan air sampai tanggul. Adapun persamaan dari tinggi jagaan saluran, yaitu:

$$w = 0,3 + 0,25h \quad (2)$$

Keterangan:

w = Tinggi jagaan saluran

h = kedalaman hidrolis saluran

c) Keliling Basah

Keliling basah saluran adalah panjang dan sisi-sisi sampai permukaan cairan. Adapun persamaan dari keliling basah saluran, yaitu:

$$P = b + 2h \quad (3)$$

Keterangan:

P = keliling basah saluran

b = lebar dasar saluran

h = kedalaman hidrolis saluran

d) Jari-jari hidrolis

Jari-jari hidrolis adalah perbandingan luas penampang melintang dan keliling basah. Adapun persamaan jari-jari hidrolis, yaitu:

$$R = \frac{A}{P} \quad (4)$$

Keterangan:

R = jari-jari hidrolis saluran

A = luas penampang basah saluran

P = keliling basah saluran

e) Lebar dasar

Lebar dasar adalah lebar permukaan air bagian bawah atau dasar saluran. Adapun persamaan lebar dasar saluran, yaitu:

$$b = \frac{A}{h} \quad (5)$$

b = lebar dasar saluran

h = kedalaman hidrolis saluran

A = luas penampang basah saluran dengan b dengan h



Kedalaman hidrolis saluran adalah perbandingan luas penampang melintang dan lebar dasar saluran. Adapun persamaan kedalaman hidrolis saluran, adalah sebagai berikut:

$$h = \frac{A}{b} \quad (6)$$

Keterangan:

h = kedalaman hidrolis saluran

A = luas penampang basah saluran

b = lebar dasar saluran

1.2.2 Bendung

Menurut Mawardi dan Memed 2002, Bendung adalah suatu bangunan air dengan kelengkapan yang dibangun melintang sungai atau sudetan yang sengaja dibuat untuk meninggikan taraf muka air atau untuk mendapatkan tinggi terjun, sehingga air dapat disadap dan dialirkan secara gravitasi ke tempat yang membutuhkannya. Bendung berfungsi antara lain untuk meninggikan taraf muka air, agar air sungai dapat disadap sesuai dengan kebutuhan dan untuk mengendalikan aliran, angkutan sedimen dan geometri sungai sehingga air dapat dimanfaatkan secara aman, efektif, efisien dan optimal.

Berdasarkan fungsinya sebagai pengatur tinggi muka air sungai, bendung diklasifikasikan menjadi bendung pelimpah dan bendung gerak. Bendung pelimpah dikonstruksikan melintang sungai guna menjamin ketersediaan elevasi muka air minimum bagi bangunan pengambilan (*intake*) irigasi. Namun, struktur ini juga berfungsi sebagai penghalang aliran saat terjadi banjir, yang berpotensi menyebabkan genangan di wilayah hulu. Komponen utama bendung pelimpah meliputi tubuh bendung dan mercu bendung. Tubuh bendung merupakan ambang tetap yang berfungsi menaikkan taraf muka air sungai, sedangkan mercu bendung berperan dalam mengatur elevasi air minimum, melimpaskan debit banjir, serta membatasi tinggi genangan di bagian hulu.

1.2.2.1 Klasifikasi Bendung

Bendung berdasarkan fungsinya dapat diklasifikasikan menjadi:

- Bendung penyadap; digunakan sebagai penyadap aliran sungai untuk berbagai keperluan seperti untuk irigasi, air baku dan sebagainya.
- Bendung pembagi banjir; dibangun di percabangan sungai untuk mengatur aliran sungai, sehingga terjadi pemisahan antara debit banjir dan debit normal dengan kapasitasnya.
- Bendung pemahan pasang; dibangun di bagian sungai yang dipengaruhi pasang surut air laut antara lain untuk mencegah masuknya air asin.



Secara strukturnya bendung dapat dibedakan atas:

1. p,

- Bendung gerak,
- Bendung kombinasi,
- Bendung kembangkempis,
- Bendung bottom intake.

Ditinjau dari segi sifatnya bendung dapat pula dibedakan:

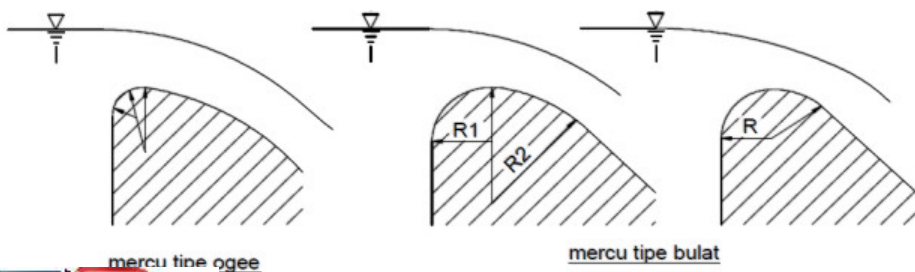
- Bendung permanen seperti bendung pasangan batu, beton, dan kombinasi beton dan pasangan batu,
- Bendung semi permanen seperti bendung bronjong, cerucuk kayu dan sebagainya,
- Bendung darurat; yang dibuat oleh masyarakat pedesaan seperti bendung tumpukan batu dan sebagainya.

1.2.2.2 Mercu Bendung

Menurut Mawardi dan Memed 2002, Mercu bendung yaitu bagian teratas tubuh bendung dimana aliran dari udik dapat melimpah ke hilir. Fungsinya sebagai penentu tinggi muka air minimum di sungai bagian udik bendung, sebagai pengempang sungai dan sebagai pelimpah aliran sungai. Letak mercu bendung bersama-sama tubuh bendung diusahakan tegak lurus arah aliran sungai agar aliran yang menuju bendung terbagi merata. Bentuk mercu bendung tetap, yaitu:

- Mercu bulat dengan satu jari pembulatan,
- Mercu bulat dengan dua jari pembulatan,
- Mercu tipe ogee, SAF, dan
- Mercu ambang lebar.

Menurut panduan KP 02 tentang bendung, di Indonesia pada umumnya hanya menggunakan dua tipe mercu untuk bendung pelimpah, yaitu tipe Ogee dan tipe Bulat.



Gambar 3. Bentuk mercu bendung
Sumber. Panduan KP-02, 2013



au dari aspek efisiensi aliran, bendung mercu bulat
 keunggulan signifikan dibandingkan bendung ambang lebar,
 ai dengan nilai koefisien debit sebesar 44% lebih tinggi.

Peningkatan kapasitas pengaliran ini memberikan keuntungan teknis berupa penurunan elevasi muka air di hulu bendung saat terjadi debit banjir. Fenomena peningkatan koefisien debit tersebut dipengaruhi oleh karakteristik aliran (*streamline*) yang melengkung serta terbentuknya tekanan negatif di sepanjang permukaan mercu.

b) Mercu Ogee

Secara fisik, mercu Ogee memiliki profil yang meniru bentuk tirai luapan bawah dari bendung ambang tajam ter-aerasi. Konfigurasi ini dimaksudkan untuk menghindari risiko tekanan subatmosfer pada permukaan mercu ketika debit aliran sesuai dengan rencana; sedangkan pada debit rendah, tekanan air akan menekan mercu ke arah bawah. Tipe Ogee sering menjadi pilihan desain apabila kondisi tanah di area kolam olak dinilai baik, sehingga tidak memerlukan struktur lantai muka yang rumit untuk mencegah penggerusan. Efisiensi biaya dapat dicapai dengan mengganti struktur tersebut menggunakan pasangan batu kosong (*riprap*) di sepanjang kolam olak.

1.2.3 Bangunan Peredam Energi

Menurut Mawardi E, dan Moch. Memed 2002, bangunan peredam energi bendung adalah struktur dari bangunan di hilir tubuh bendung yang terdiri dari berbagai tipe, bentuk dan di kanan kirinya dibatasi oleh tembok pangkal bendung dilanjutkan dengan tembok sayap hilir dengan bentuk tertentu. Fungsi bangunan yaitu untuk meredam energi air akibat pembendungan, agar air di hilir bendung tidak menimbulkan penggerusan setempat yang membahayakan struktur.

Prinsip dasar disipasi energi pada bangunan peredam energi melibatkan interaksi kompleks berbagai mekanisme hidraulik. Mekanisme tersebut meliputi gaya gesek antara aliran air dengan permukaan lantai dan dinding struktur, gesekan internal antar-partikel air, serta pembentukan turbulensi berupa pusaran vertikal maupun horizontal. Selain itu, reduksi energi juga dicapai melalui tumbukan aliran terhadap komponen struktur dan pembentukan loncatan hidraulik (*hydraulic jump*) di dalam kolam olak. Berdasarkan desainnya, bangunan peredam energi pada bendung diklasifikasikan ke dalam beberapa tipe, yaitu:

- Lantai hilir mendatar, tanpa atau dengan ambang akhir dan dengan atau tanpa balok lantai,
- Cekung masif dan cekung bergigi,
 - n bertangga,
 - air,
 - an air dan lain-lain.

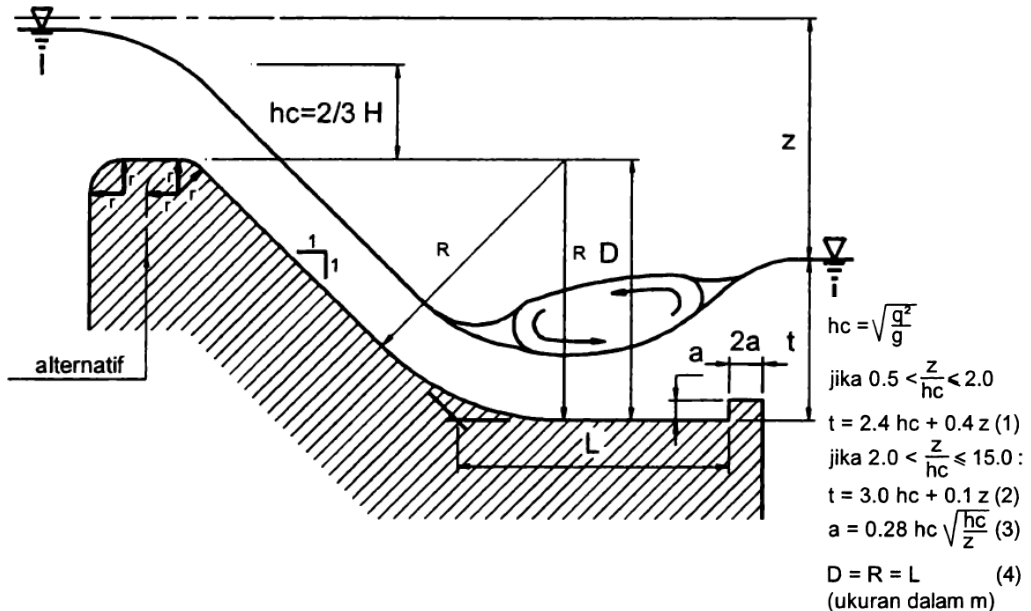


Bangunan peredam energi dikenal pula dengan istilah lain yaitu tipe:

- USBR
- Dan lain-lain.

1.2.3.1 Kolam Olak Vlughter

Kolam olak tipe Vlughter dikembangkan secara spesifik untuk bangunan terjun pada saluran irigasi. Desain ini menggunakan parameter hubungan antara rasio z / h_c (0,5; 2,0; dan 15,0) dengan bilangan Froude (1,0; 2,8; dan 12,8). Perlu dicatat bahwa penentuan bilangan Froude pada tipe ini didasarkan pada kedalaman z diukur dari garis energi hulu, berbeda dengan metode pada kolam loncat air konvensional yang mengacu pada kedalaman di lantai kolam. Penerapan kolam Vlughter dibatasi pada kondisi beda tinggi energi (z) maksimum 4,50 meter, atau kedalaman lantai kolam dari mercu tidak melebihi 8 meter. Selain batasan dimensi, pemilihan tipe ini juga harus mempertimbangkan porositas tanah setempat demi kemudahan pekerjaan pengeringan (dewatering) saat konstruksi.



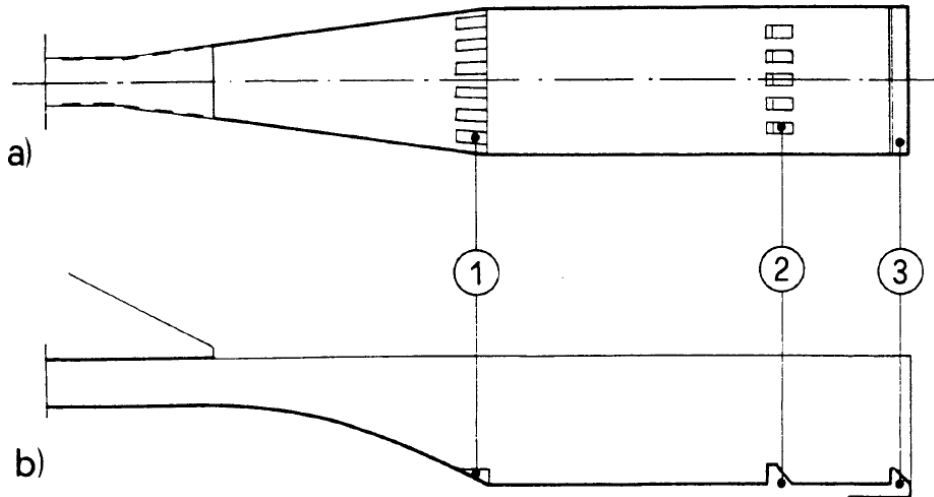
Gambar 4. Kolam olak vlughter

Sumber. Panduan KP-04, 2008

1.2.3.2 Kolam Olak SAF



thony Falls (SAF) dapat dianggap sebagai struktur pertama digeneralisasi. Ukuran kolam dikurangi melalui penggunaan dan ambang dan untuk panjang kolam dapat sangat dikurangi (of jump) terletak di ujung hulu kolam. Kolam ini dikembangkan (ager, 1992)



Gambar 5. Kolam olak SAF.
 a) tampak atas, b) tampak samping
 1) Blok saluran, 2) Blok penyekat, 3) Ambang akhir
Sumber. Hager, 1992

Tujuan instalasi balok muka adalah untuk mengelola aliran deras yang masuk ke kolam olak dengan meningkatkan kedalaman efektif serta mendistribusikannya menjadi aliran-aliran kecil. Adapun ambang akhir didesain untuk membelokkan arus dasar ke atas menuju permukaan air, yang bertujuan menciptakan pusaran bawah (*ground roller*) guna memaksimalkan peredaman energi.

1.2.3.3 Kolam Olak USBR

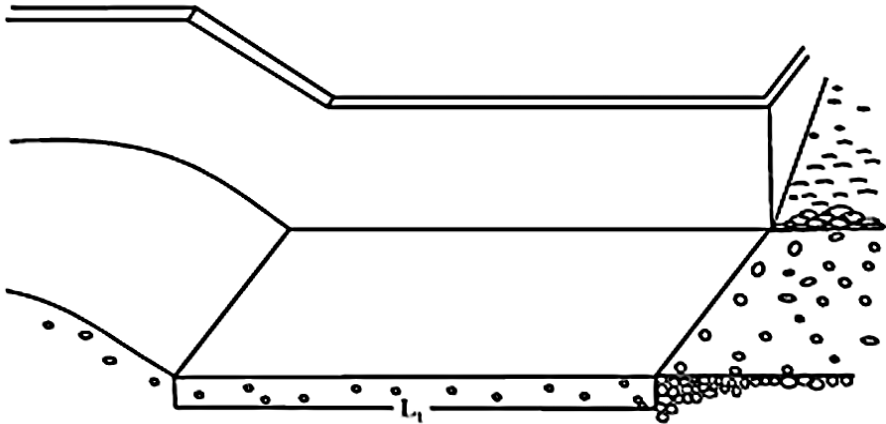
Ketika energi aliran pada sebuah pelimpah harus diredam sebelum dialirkan kembali ke saluran sungai di hilir, kolam olak loncat hidraulis adalah perangkat yang efektif untuk mengurangi kecepatan keluar hingga kondisi yang tenang. Loncat hidraulis yang terjadi di kolam olak semacam ini memiliki karakteristik khas dan mengambil bentuk tertentu, tergantung pada hubungan antara energi aliran yang harus diredam dan kedalaman aliran (U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation, 1987). Berdasarkan bilangan froude, kolam olak USBR di bedakan



bilangan froude kurang dari 1,7

rentang kondisi aliran ini, fenomena loncatan hidraulik belum cara sempurna. Karakteristik hidraulik menunjukkan bahwa konjugat berkisar dua kali kedalaman awal, sementara ran di hilir tereduksi menjadi setengah dari kecepatan masuk.

Oleh karena itu, desain ini tidak memerlukan konstruksi kolam olak khusus ataupun penambahan elemen peredam seperti blok halang (*baffle blocks*). Persyaratan desain utamanya hanyalah penyediaan panjang saluran rata di bagian hilir minimal sepanjang empat kali kedalaman konjugat. Konfigurasi struktur sederhana ini diklasifikasikan sebagai Kolam Olak Tipe I.



Gambar 6. Kolam olak USBR tipe I

Sumber. U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation, 1987.

2. Kolam untuk bilangan froude antara 1,7 dan 2,5

Kondisi aliran pada kolam tipe ini dikategorikan berada dalam fase pra-loncat. Mengingat karakteristik alirannya yang tidak menghasilkan turbulensi intensif, maka penggunaan komponen tambahan seperti penyekat (*baffle piers*) atau ambang tidak diperlukan. Desain kolam hanya mensyaratkan dimensi panjang yang memadai untuk mengakomodasi proses perlambatan aliran secara alamiah. Konfigurasi sederhana ini dikenal sebagai Kolam Olak Tipe I.

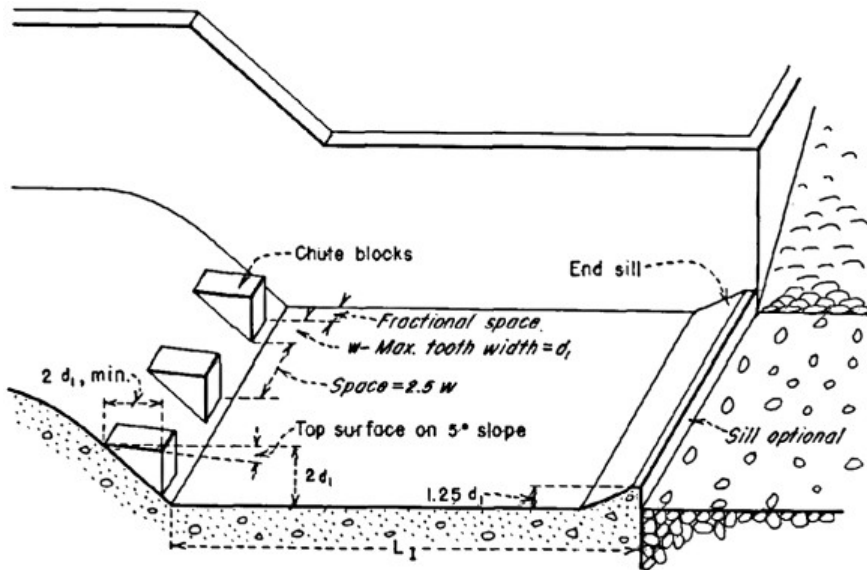
3. Kolam untuk bilangan froude antara 2,5 dan 4,5

Pada fase ini, aliran berada dalam tahap transisi di mana loncatan hidraulik sempurna belum terbentuk sepenuhnya. Kondisi ini dinilai paling sulit ditangani karena memicu timbulnya gelombang osilasi yang tidak stabil dan berbahaya, sehingga sering kali memerlukan struktur peredam hilir kolam.



Untuk pembuatan kolam olak mutlak diperlukan, tipe IV diperlukan karena relatif efektif dalam mereduksi sebagian besar energi, mengingat gelombang osilasi tidak dapat diredam secara signifikan dengan penambahan peredam gelombang (*wave suppressor*) tambahan. Sebagai langkah preventif untuk menekan

gelombang dan mencegah hanyutnya loncatan (*sweep-out*), kedalaman air di kolam disyaratkan sebesar 10% lebih tinggi dari kedalaman konjugat teoretis.



Gambar 7. Kolam olak USBR tipe IV

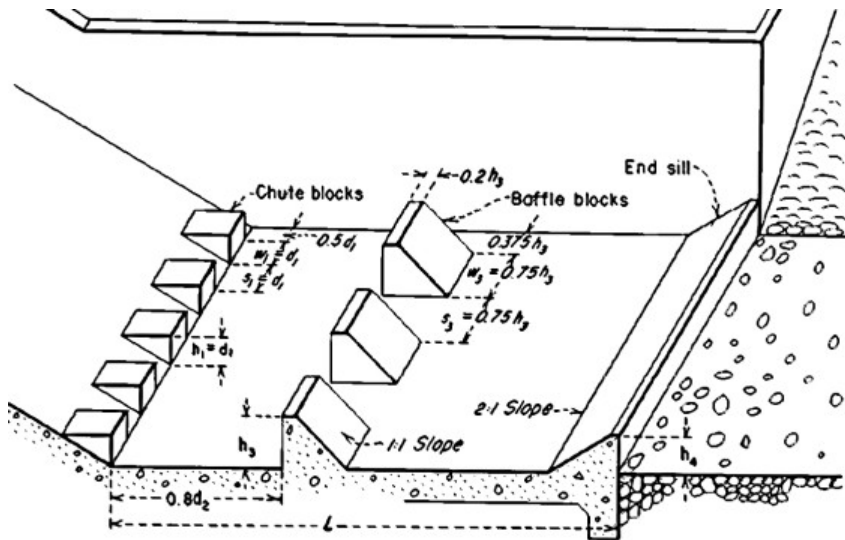
Sumber. U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation, 1987

4. Kolam untuk bilangan froude lebih tinggi dari 4,5

Pada kategori kolam ini, fenomena loncatan hidraulik sempurna dapat terbentuk dengan baik, di mana karakteristik spesifik loncatan tersebut bervariasi mengikuti besaran bilangan Froude. Integrasi komponen disipasi energi seperti balok muka (*chute blocks*), blok halang (*baffle piers*), dan ambang (*sills*) pada lantai kolam berfungsi krusial untuk menstabilkan aliran. Stabilisasi ini memungkinkan reduksi panjang kolam olak serta meningkatkan faktor keamanan terhadap risiko hanyutnya loncatan (*sweep-out*) akibat kedalaman air hilir yang kurang memadai.

Kolam tipe III dapat digunakan jika kecepatan masuk tidak melebihi 18 m/s. Kolam ini menggunakan blok saluran, blok penyekat dampak, dan

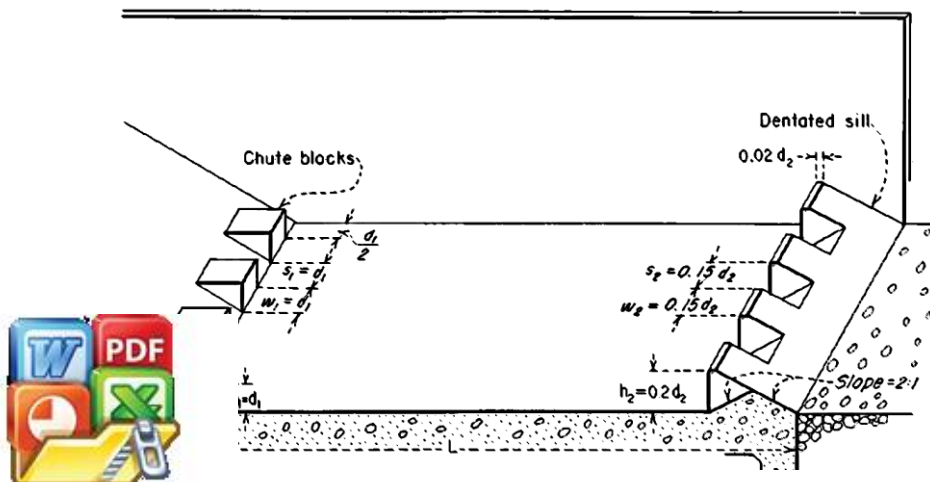




Gambar 8. Kolam olak USBR tipe III

Sumber. U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation, 1987

Jika kecepatan masuk melebihi 18 m/s, atau jika balok penyekat dampak tidak digunakan, kolam tipe II dapat diadopsi. Karena disipasi terutama dicapai oleh aksi loncat hidraulis, panjang kolam akan lebih besar dari yang ditunjukkan untuk kolam tipe III. Namun, balok saluran dan ambang akhir bergerigi akan tetap secara efektif mengurangi panjangnya. Karena berkurangnya margin keamanan terhadap penyapuan (*sweepout*), kedalaman air di kolam harus sekitar lima persen lebih besar dari kedalaman konjugat yang dihitung.



Gambar 9. Kolam olak USBR tipe II

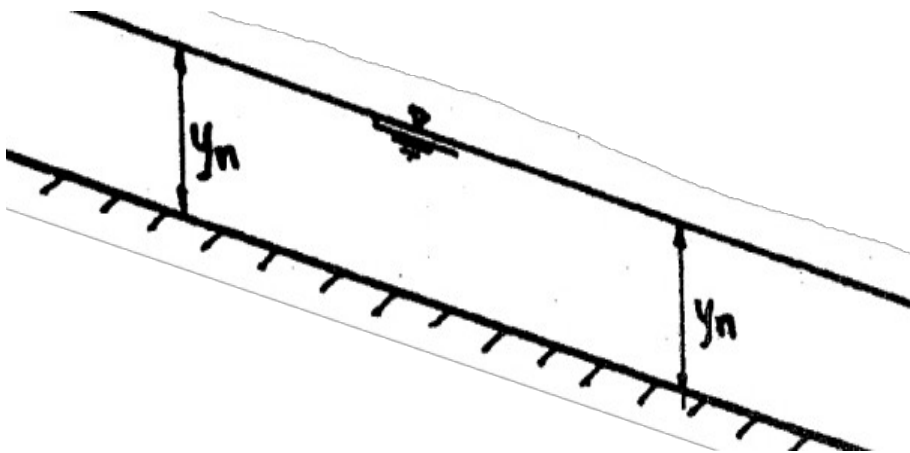
Sumber. U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation, 1987



1.2.4 Klasifikasi aliran

Menurut Triatmodjo 1993, pada umumnya tipe aliran melalui saluran terbuka adalah turbulen, karena kecepatan aliran dan kekarasan dinding relatif besar. Aliran melalui saluran terbuka akan turbulen apabila angka Reynolds $Re > 1.000$, dan laminar apabila $Re < 500$. Dalam hal ini panjang karakteristik yang ada pada angka Reynolds adalah jari-jari hidraulik, yang didefinisikan sebagai perbandingan antara luas tampang basah dan keliling basah.

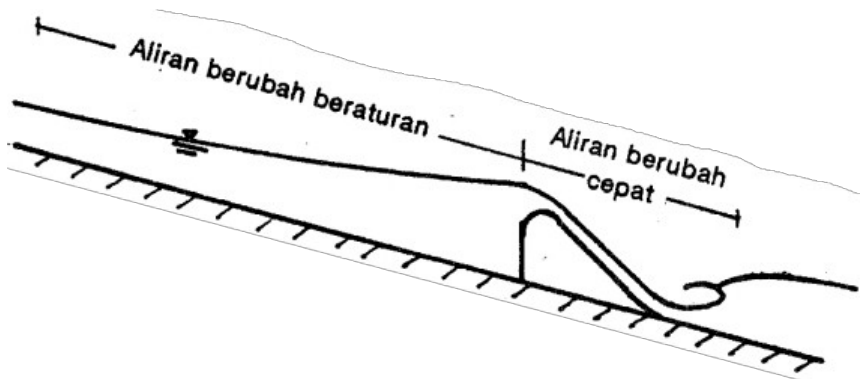
Aliran seragam pada saluran terbuka didefinisikan sebagai kondisi di mana variabel aliran utama, seperti kedalaman, luas tampang basah, kecepatan, dan debit, tidak mengalami perubahan terhadap jarak di setiap penampang saluran. Pada kondisi ini, garis kemiringan energi, elevasi muka air, dan kemiringan dasar saluran memiliki gradien yang sama dan saling sejajar. Kedalaman air yang berkorespondensi dengan aliran seragam diistilahkan sebagai kedalaman normal (y_n), yang nilainya bersifat tetap (konstan) di seluruh panjang saluran untuk debit dan dimensi penampang yang spesifik



Gambar 10. Aliran seragam
Sumber. Triatmodjo, 2008

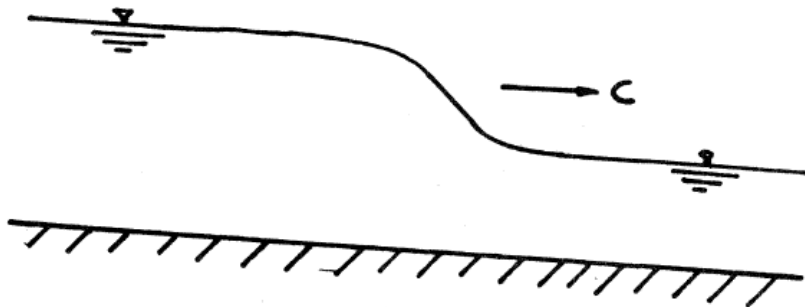


Suatu aliran diklasifikasikan sebagai aliran tidak seragam (*non-uniform flow* / *varied flow*) apabila parameter-parameter hidrauliknya seperti luas tampang basah, dan kecepatan mengalami fluktuasi atau tidak konstan sepanjang saluran. Berdasarkan gradien perubahannya, aliran ini terbagi ke dalam dua kategori utama: aliran berubah cepat (*rapidly varied flow*), di mana parameter terjadi secara signifikan pada rentang jarak yang relatif pendek, dan aliran berubah beraturan (*gradually varied flow*) di mana perubahan terjadi secara gradual pada rentang jarak yang relatif panjang.



Gambar 11. Aliran tak seragam
Sumber. Triatmodjo, 2008

Aliran disebut mantap apabila variabel aliran di suatu titik seperti kedalaman dan kecepatan tidak berubah terhadap waktu, dan apabila berubah terhadap waktu disebut aliran tidak mantap.



Gambar 12. Gelombang banjir melalui saluran terbuka (aliran tidak mantap)
Sumber. Triatmodjo, 2008

Selain itu aliran melalui saluran terbuka juga dapat dibedakan menjadi aliran subkritis (mengalir) dan super kritis (meluncur). Di antara kedua tipe tersebut aliran adalah kritis. Aliran disebut subkritis apabila suatu gangguan (misal batu dilemparkan) menimbulkan gelombang yang terjadi di suatu titik pada arah ke arah hulu. Aliran subkritis dipengaruhi oleh kondisi hilir, gangguan di hilir akan mempengaruhi aliran di sebelah hulu. Apabila gangguan besar sehingga gangguan yang terjadi tidak menjalar ke hulu super kritis. Dalam hal ini kondisi di hulu akan mempengaruhi aliran. Penentuan tipe aliran dapat didasarkan pada nilai angka



froude. Aliran adalah subkritis apabila $F_r < 1$, kritis apabila $F_r = 1$, dan super kritis apabila $F_r > 1$.

1.2.4.1 Aliran Tidak Seragam

Dalam rezim aliran tidak seragam, garis energi tidaklah sejajar dengan garis muka air maupun dasar saluran. Oleh karena itu, kedalaman dan kecepatan aliran di sepanjang lintasan menjadi tidak konstan. Kondisi pengaliran ini terjadi apabila geometri penampang lintang sepanjang saluran tidak tetap, seperti pada sungai, atau pada saluran irigasi di dekat bangunan air dan ujung saluran. Analisis aliran tidak seragam umumnya bertujuan untuk mengetahui bentuk profil aliran di sepanjang saluran tersebut. Analisis ini lazim dilakukan dalam perencanaan perbaikan sungai atau penanggulangan banjir, terutama guna menentukan elevasi puncak tanggul, batas daerah genangan, serta elevasi jembatan. Meskipun banjir di sungai secara fisik merupakan aliran tidak mantap, analisis profil muka air sering kali dilakukan dengan pendekatan aliran mantap menggunakan debit puncak hidrograf. Dengan metode ini, analisis aliran menjadi lebih sederhana dan hasilnya lebih aman, karena debit puncak sesaat diasumsikan terjadi dalam durasi lama. Aliran tidak seragam diklasifikasikan ke dalam dua kelompok berikut.

- a. Aliran berubah beraturan (*gradually varied flow*), parameter hidraulik seperti kecepatan dan luas tampang basah mengalami perubahan secara gradual dari satu penampang ke penampang berikutnya. Kecepatan aliran di sepanjang lintasan dapat mengalami akselerasi atau deselerasi bergantung pada kondisi fisik saluran. Jika terdapat bendung di bagian hilir, akan terbentuk profil pembendungan (*backwater*) yang menyebabkan reduksi kecepatan aliran. Sebaliknya, keberadaan struktur terjunan akan menghasilkan profil muka air menurun (*drawdown*) di mana kecepatan aliran meningkat. Umumnya, aliran di sungai dikategorikan ke dalam tipe ini.
- b. Aliran berubah cepat (*rapidly varied flow*), ditandai oleh perubahan parameter hidraulik yang terjadi secara drastis dan terkadang bersifat diskontinu. Fenomena ini dapat dijumpai pada perubahan penampang mendadak (transisi), loncatan hidraulik, terjunan, serta aliran yang melintasi pelimpah maupun pintu air. Pada kondisi ini, kehilangan energi akibat gesekan dinding relatif minor karena jarak tinjauan yang pendek, sedangkan kehilangan energi akibat turbulensi menjadi faktor yang jauh lebih dominan

1.2.4.2 Debit Aliran



parameter hidraulik yang merepresentasikan volume air yang sumber per satuan waktu, yang umumnya diukur dalam liter per detik. Untuk memenuhi kebutuhan irigasi, ketersediaan debit air harus memadai untuk memenuhi kebutuhan melalui jaringan saluran yang tersedia. Definisi lain debit adalah volume air total yang keluar dari suatu Daerah

Aliran Sungai (DAS). Dalam Sistem Satuan Internasional (SI), unit standar yang digunakan untuk menyatakan debit adalah meter kubik per detik (m^3/s).

Istilah debit biasanya berkaitan dengan air, aliran dan sungai. Debit air adalah ukuran banyaknya volume air yang dapat lewat dalam suatu tempat atau yang dapat ditampung dalam suatu tempat tiap satu satuan waktu. Debit aliran adalah jumlah air yang mengalir dalam satuan volume per waktu. Debit air sungai adalah tinggi permukaan air sungai yang terukur oleh alat ukur permukaan air sungai. Dari beberapa pengertian diatas sebenarnya membahas satu hal yang sama yaitu jumlah air yang ditampung.

Selain istilah debit air, debit aliran, dan debit sungai, dikenal pula konsep debit andalan. Debit andalan didefinisikan sebagai besaran debit maksimum yang dapat diandalkan ketersediaannya untuk keperluan irigasi. Analisis dan perhitungan debit andalan ini bertujuan untuk mengoptimalkan pemanfaatan potensi sumber daya air yang dialokasikan bagi sistem irigasi.

Debit air dapat dihitung dengan menggunakan rumus sebagai berikut:

$$Q = V \times A \quad (7)$$

Keterangan:

Q = Debit aliran

V = Kecepatan rata-rata

A = Luas penampang melintang tegak lurus arah aliran

Dalam aliran tetap, berdasarkan suatu pertimbangan, maka debit dianggap tetap di sepanjang bagian saluran yang lurus, dengan kata lain aliran bersifat kontinyu. Oleh sebab itu, persamaan (7) dapat diubah menjadi:

$$Q = V1 \times A1 = V2 \times A2 \quad (8)$$

dimana indeks menunjukkan penampang saluran yang berlainan. Ini merupakan persamaan kontinuitas untuk aliran tetap-kontinyu (continuous steady flow).

1.2.4.3 Bilangan Froude

Bilangan Froude merupakan parameter tak berdimensi yang merepresentasikan rasio gaya inersia terhadap gaya gravitasi, yang esensial dalam analisis kesebangunan hidraulik antarbenda berbeda ukuran. Parameter ini mengklasifikasikan karakteristik aliran ke dalam tiga kategori utama, yaitu aliran kritis, subkritis, dan superkritis. Penjelasan ketiga rezim aliran tersebut adalah:



1. Aliran kritis - jika bilangan froude sama dengan 1 ($Fr = 1$) dan gangguan contoh: riak yang terjadi jika sebuah batu dilempar ke dalam akan bergerak / menyebar melawan arah arus.
2. Aliran subkritis, is, jika bilangan froude lebih kecil dari 1 ($Fr < 1$). Untuk aliran talaman biasanya lebih besar dan kecepatan aliran rendah yang timbul dapat bergerak melawan arus). Kecepatan air < gelombang hulu aliran dipengaruhi pengendali hilir.

3. Aliran superkritis, jika bilangan froude lebih besar dari 1 ($Fr > 1$). Untuk aliran superkritis kedalaman relatif lebih kecil dan kecepatan relatif tinggi (segala riak yang ditimbulkan dari suatu gangguan mengikuti arah arus. Kecepatan air $>$ kecepatan gelombang hulu aliran tidak dipengaruhi pengendali hilir.

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 (Chow, 1992) :

$$F_r = \frac{V}{\sqrt{gh}} \quad (9)$$

Keterangan:

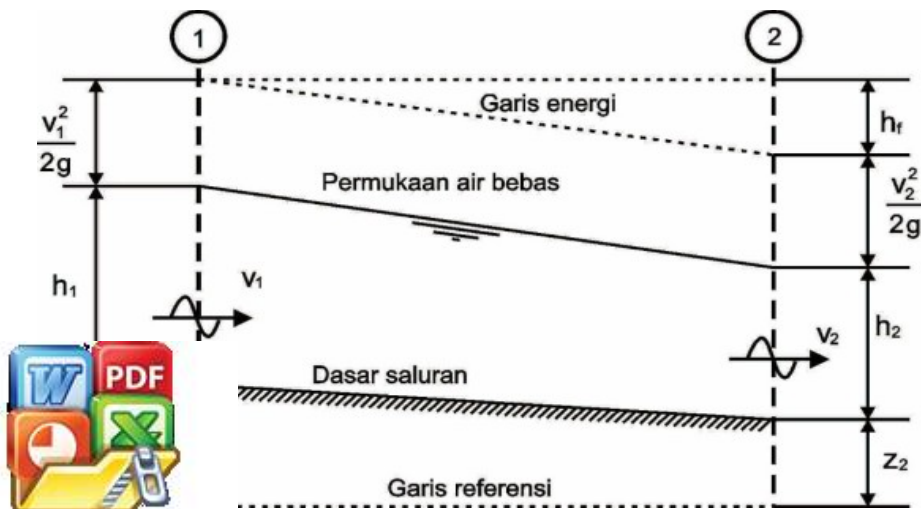
- F_r = Bilangan Froude
 V = Kecepatan aliran
 g = Gravitasi
 h = kedalaman

1.2.4.4 Persamaan Energi

Hukum Bernoulli mempostulasikan bahwa total energi hidraulik pada sembarang penampang aliran merupakan akumulasi dari tiga komponen utama, yaitu tinggi elevasi, tinggi tekanan, serta tinggi kecepatan.

$$H = z + d \cos\theta + \frac{V^2}{2g} \quad (10)$$

Mengacu pada prinsip konservasi energi, total tinggi energi pada penampang hulu adalah sama dengan jumlah tinggi energi di penampang hilir ditambah dengan kehilangan energi di antara kedua penampang tersebut.



$$z_1 + d_1 \cos \theta + a_1 \frac{V_1^2}{2g} = z_2 + d_2 \cos \theta + a_2 \frac{V_2^2}{2g} + h_f \quad (11)$$

Untuk saluran yang kemiringan kecil ($\theta \approx 0$), maka persamaan diatas menjadi:

$$z_1 + h_1 + \frac{V_1^2}{2g} = z_2 + h_2 + \frac{V_2^2}{2g} + h_f \quad (12)$$

Keterangan:

- z = Fungsi titik diatas garis referensi
- h = fungsi tekanan di suatu titik
- V = kecepatan aliran
- g = gaya gravitasi bumi
- h_f = kehilangan energi akibat gesekan
- d = kedalaman air normal

1.2.4.5 Energi Spesifik

Menurut Triatmodjo 1993, prinsip energi yang diturunkan untuk aliran melalui pipa dapat juga digunakan untuk aliran melalui saluran terbuka. Energi yang terkandung di dalam satu satuan berat air yang mengalir di dalam saluran terbuka terdiri dari tiga bentuk yaitu energi kinetik, energi tekanan, dan energi elevasi di atas garis referensi.

Energi kinetik pada suatu tampang di saluran terbuka diberikan oleh bentuk $V^2/2g$, dengan V adalah kecepatan rerata aliran di tampang tersebut. Apabila koefisien koreksi energi a diperhitungkan maka energi kinetik mempunyai bentuk $aV^2/2g$. Nilai a adalah antara 1,05 dan 1,2 yang tergantung pada bentuk distribusi kecepatan.

Energi spesifik, atau tinggi spesifik, didefinisikan sebagai energi pada penampang saluran yang ditinjau relatif terhadap dasar saluran. Dengan demikian, energi spesifik merupakan akumulasi dari tinggi tekanan dan tinggi kecepatan pada suatu titik, sesuai persamaan berikut:

$$E_s = y + \frac{V^2}{2g} \quad (13)$$

Dimana:

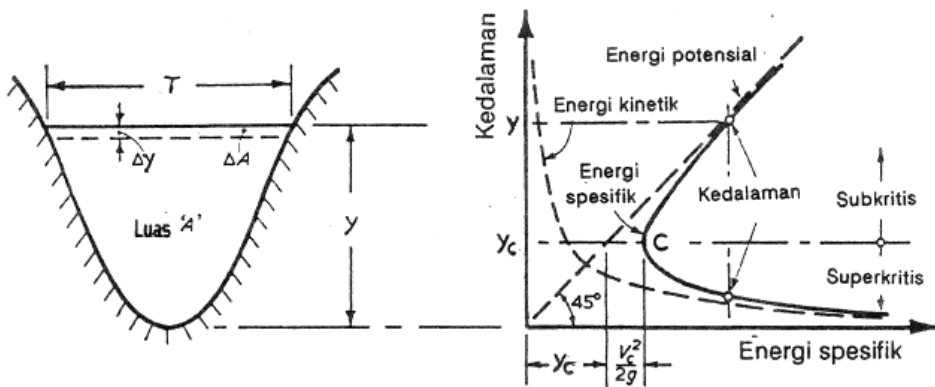
- E_s = energi spesifik
- y = kedalaman



asi

tersebut mengindikasikan bahwa energi spesifik adalah enjumlahan kedalaman air dan tinggi kecepatan. Apabila antara kedalaman dan energi spesifik dipetakan, maka akan gi spesifik. Pada kondisi debit konstan, variasi kedalaman air

disebabkan oleh perubahan kekasaran, bentuk penampang saluran, kemiringan dasar, ataupun kondisi hulu dan hilir. Setiap kedalaman aliran memiliki korelasi unik dengan energi spesifik. Kurva ini terdiri dari garis energi potensial yang melintasi pusat sumbu dengan kemiringan 45° , sedang kurva energi kinetik asimtotis dengan kedua sumbu.



Gambar 14. Hubungan energi spesifik dan kedalaman
Sumber. Triatmodjo, 2008

Ketika kedalaman aliran melampaui kedalaman kritis, kecepatan aliran menjadi lebih rendah dibandingkan kecepatan kritis untuk debit tertentu, sehingga disebut aliran subkritis atau mengalir. Sebaliknya, apabila kedalaman aliran lebih rendah daripada kedalaman kritis, maka dikategorikan sebagai aliran superkritis atau meluncur. Adanya perubahan nilai debit akan menghasilkan kurva energi spesifik yang baru.

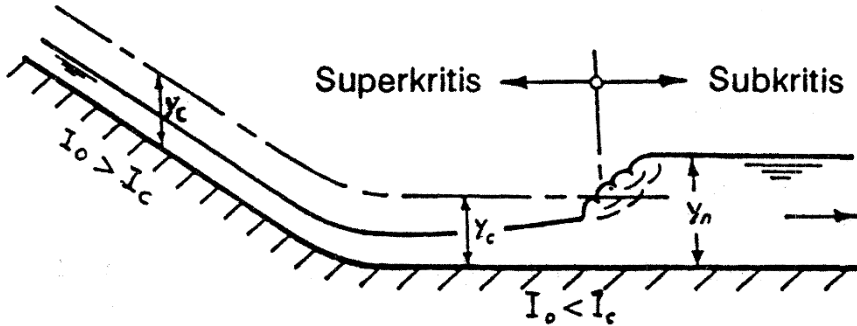
1.2.4.6 Loncat Air

Menurut Suripin 2019, loncat hidraulis atau loncat air merupakan fenomena alam yang terjadi ketika aliran superkritis berubah menjadi aliran subkritis. Ketika aliran air yang kecepatannya tinggi dan kedalamannya kecil (aliran super-kritis) bertemu aliran dengan kecepatan rendah dan kedalaman tinggi (aliran sub-kritis), terjadi perubahan muka air secara tiba-tiba. Fenomena ini disebut loncat hidraulis atau loncat air, dan pada umumnya disertai dengan turbulensi yang cukup besar dan kehilangan sebagian besar energi kinetik aliran superkritis. Peristiwa ini dapat terjadi di hilir pintu geser, di hilir pelimpah (*spillway*), atau di lokasi di mana terjadi perubahan kemiringan dasar saluran secara mendadak dari kemiringan terjal ke kemiringan landai.



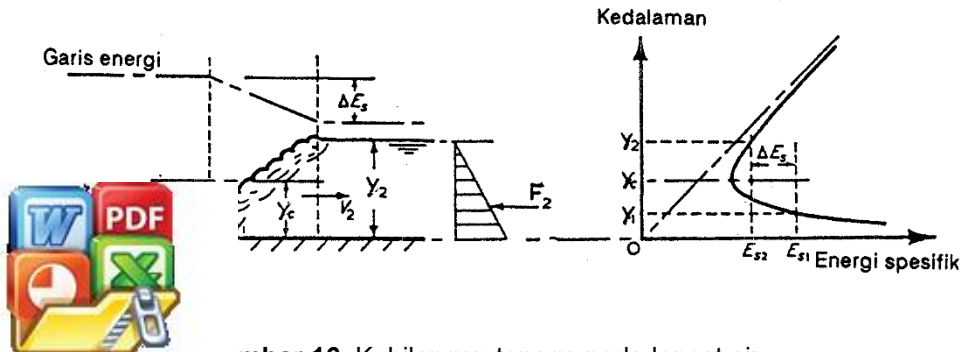
r meluncur di hilir *spillway* atau dinding vertikal, aliran tersebut momentum serta kecepatan yang tinggi. Kecepatan tinggi ini erosi dan penggerusan tanah di hilir struktur, sehingga diperlukan. Dalam kondisi ini, fenomena loncatan air dapat mendisipasi energi kinetik secara efektif.

Pada tipe loncatan rendah, di mana fluktuasi kedalaman air relatif kecil, permukaan air tidak berubah drastis namun membentuk serangkaian gelombang, yang dikenal sebagai loncatan air berombak (*undular jump*). Sebaliknya, pada loncatan tinggi terjadi perubahan kedalaman yang signifikan secara mendadak, fenomena ini diklasifikasikan sebagai loncatan air kuat (*strong jump*).



Gambar 15. Loncat air
 Sumber. Triatmodjo, 2008

Dalam tinjauan fenomena hidraulik, karakteristik fisik aliran menunjukkan bahwa dimensi vertikal kedalaman air pada posisi sebelum terjadinya loncatan air akan senantiasa memiliki nilai magnitudo yang lebih kecil apabila dikomparasikan dengan dimensi kedalaman air yang terbentuk pada bagian hilir setelah peristiwa loncatan air tersebut berlangsung. Berdasarkan nomenklatur teknis yang berlaku, parameter kedalaman aliran yang berada pada fase aliran superkritis sebelum loncatan air secara spesifik didefinisikan sebagai kedalaman awal (*initial depth*), sedangkan untuk parameter kedalaman yang tercatat pada kondisi subkritis setelah loncatan air diistilahkan sebagai kedalaman sekuen (*sequent depth*).



Gambar 16. Kehilangan tenaga pada loncat air
 Sumber. Triatmodjo, 2008



Transisi dari aliran superkritis ke subkritis ditandai oleh beberapa fitur, yaitu:

- Aliran yang sangat turbulen dengan komponen kecepatan dan tekanan dinamis yang signifikan.
- Pulsasi tekanan dan kecepatan, serta pengembangan gelombang di hilir loncat.
- Aliran dua fase karena masuknya udara (*air entrainment*).
- Pola erosi karena peningkatan pengembangan pusaran (*vortex*) skala makro.
- Pembentukan suara dan disipasi energi sebagai hasil produksi turbulensi.

Dengan demikian, loncatan hidraulik berperan sebagai mekanisme alami untuk mengubah kelebihan energi mekanis menjadi energi panas. Fungsi disipasi energi ini dapat ditingkatkan dengan menambahkan struktur peredam energi.

1.2.4.7 Loncatan Klasik

Permulaan fenomena loncatan hidraulik ditandai oleh kaki loncatan (*toe*), yakni titik di mana air dari aliran superkritis mulai terganggu. Pada segmen ini, air dasar terus bergerak maju, sedangkan air di permukaan bercampur udara dan bergerak mundur, membentuk zona gulungan (*roller*) yang sangat turbulen. Setelah zona gulungan ini berakhir, kondisi aliran menjadi lebih tenang. Gelembung udara yang terperangkap akan segera terlepas, dan turbulensi permukaan berkurang drastis. Para ahli menerapkan beragam kriteria teknis untuk menetapkan ujung loncatan (panjang loncatan) dari loncatan klasik, di mana:

- Permukaan air kembali menjadi relatif rata.
- Turbulensi di permukaan air sudah sangat berkurang.
- Gelembung udara besar telah hilang sepenuhnya dari aliran.
- Aliran air mulai kembali ke kondisi yang lebih seragam dan bervariasi secara bertahap.

Seluruh definisi tersebut memiliki tujuan identik: menandai batas akhir area turbulensi ekstrem, di mana dasar saluran tidak lagi membutuhkan perlindungan khusus. Dengan demikian, panjang loncatan didefinisikan sebagai jarak antara ujung akhir dan awal loncatan. Terjadi kehilangan energi mekanik yang signifikan di dalam loncatan hidraulik, besaran energi yang hilang ini dapat diukur dengan membandingkan tinggi energi relatif terhadap dasar saluran sebelum dan sesudah terjadinya loncatan.

Berdasarkan besarnya bilangan Froude aliran yang datang, Biro Reklamasi (USBR, 1987) telah mengklasifikasi loncat air dan karakteristik aliran pada dasar horizontal menjadi lima tipe, yaitu:

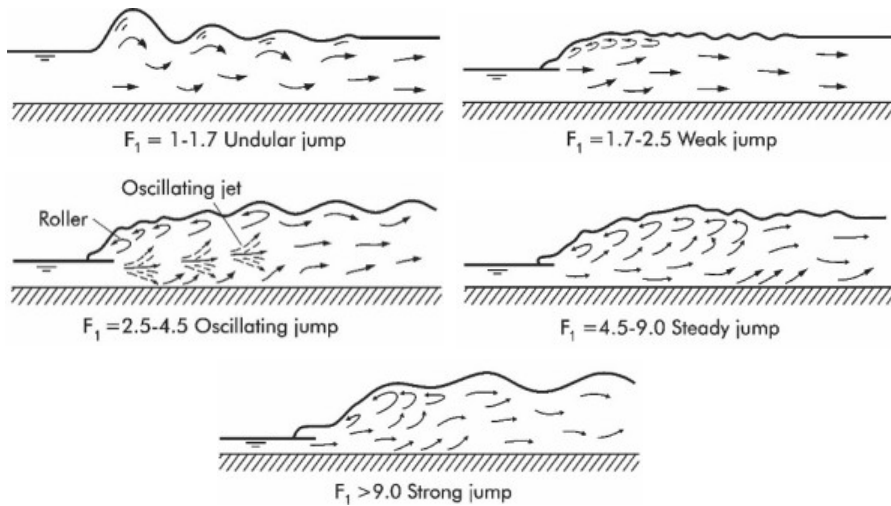


1 : loncatan berombak (*undular jump*).

2 : loncatan lemah (*weak jump*), kecepatan relatif seragam dan energi kecil. Terjadi gelombang kecil pada permukaan loncat air, dan permukaan air tetap halus.

3 : loncatan berosilasi (*oscillating jump*), pancaran air yang bolak-balik dari dasar ke permukaan dan sebaliknya.

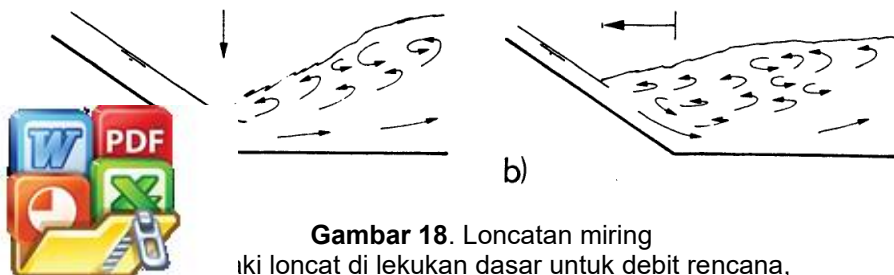
4. $F_r = 4,5 - 9,0$: loncatan mantap (*steady jump*), loncat air yang terbentuk dalam kondisi stabil. Kehilangan energi berkisar antara 45 s/d 70%.
5. $F_r > 9,0$: loncatan kuat (*strong jump*), timbul permukaan air yang kasar dan menerus sampai jarak yang cukup panjang ke hilir. Kehilangan energi dapat mencapai 85%.



Gambar 17. Jenis loncat air
Sumber. Chow, 1992

1.2.4.8 Loncatan Miring

Loncatan miring (*sloping jump*) merupakan fenomena hidraulik yang terbentuk pada saluran dengan kemiringan positif di hulu, yang kemudian berlanjut ke bagian hilir horizontal. Mengingat adanya variasi posisi loncatan hidraulik seiring dengan perubahan debit, bagian muka loncatan kerap bergeser keluar dari kolam olak dan kembali ke arah pelimpah. Situasi teknis ini umumnya terjadi apabila desain kolam olak menempatkan kaki loncatan (*toe of jump*) tepat berada di pintu masuk kolam.

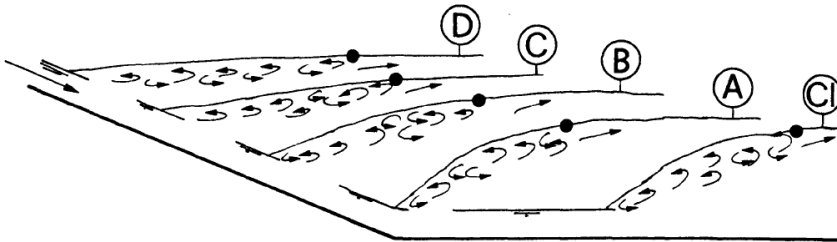


Gambar 18. Loncatan miring
a) loncat di lekukan dasar untuk debit rencana,
b) Debit selain debit rencana

Sumber. Hager, 1992

Menurut Kindsvater, 1944 (dalam Hager,1992) klasifikasi loncat hidraulis berdasarkan posisi kakinya relatif terhadap lekukan dasar :

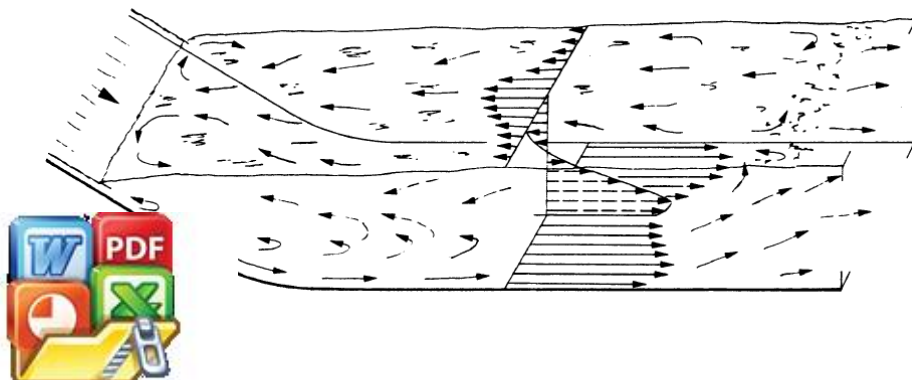
- Loncat-A : Kaki loncat berada tepat di lekukan.
- Loncat-B : Berada di antara loncat-A dan loncat-C.
- Loncat-C : Ujung *roller* berada di atas lekukan.
- Loncat-D : Seluruh *roller* berada di bagian saluran yang miring.



Gambar 19. Jenis-Jenis Loncat di Saluran Miring
Sumber. Hager, 1992

Dalam tahapan perancangan desain, menentukan kemiringan lantai adalah langkah awal yang sangat krusial. Tujuannya adalah untuk meminimalisasi total volume galian tanah dan material konstruksi beton yang diperlukan, khususnya saat menghadapi debit puncak dan elevasi air hilir tertinggi. Setelah desain dasar selesai, evaluasi dilakukan mengenai bagaimana kolam berfungsi pada debit-debit lain di luar debit rencana. Menariknya, pada debit yang tidak terlalu tinggi, kondisi air hilir sering kali memadai hingga merendam kolam, yang justru menunjukkan performa hidraulik sangat baik.

Hager berpendapat, loncatan miring memiliki pola kecepatan yang khas. Kecepatan tertinggi di bagian dasar air berada di dekat dinding samping. Namun, di permukaan, kecepatan tertinggi justru berada di bagian tengah.



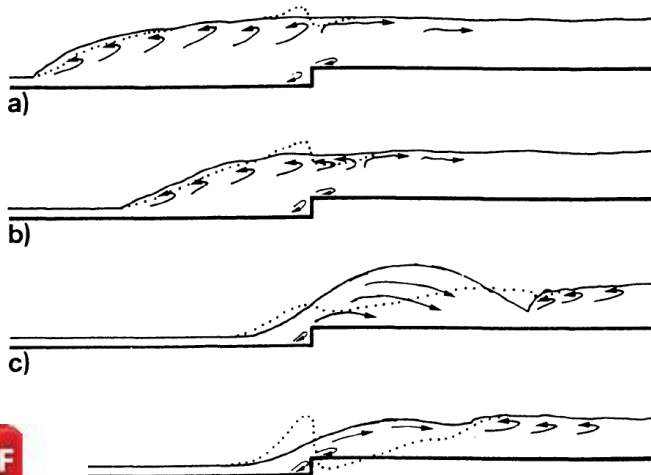
20. Tampilan samping skematik dari tipe loncat-B
Sumber. Hager, 1992

1.2.4.9 Loncat Hidraulis Pada Langkah Positif

Berbeda dengan loncatan hidraulik klasik yang profilnya hanya bergantung pada bilangan Froude aliran masuk, suatu langkah positif (*positive step*) dapat memberikan efek tambahan melalui posisi kaki loncatannya. Namun, dalam praktiknya, posisi ini tidak dapat dianggap sebagai parameter kontinu.

Menurut Hager (1992), Bila dibandingkan dengan kolam olak loncatan klasik, panjang kolam olaknya hampir sama dengan panjang loncatan air, kolam olak dengan langkah positif memerlukan panjang 50 persen lebih besar. Hal ini dianggap tidak efisien, dan karena manfaatnya terhadap variasi kondisi air hilir (*tailwater*) juga kecil maka kolam jenis ini jarang digunakan. Ada empat jenis aliran yang dapat di pertimbangkan pada langkah positif (*positive step*), yaitu:

- Loncat-A : Loncat sepenuhnya terletak di hulu langkah dengan ujung *roller* tepat di atas penampang langkah.
- Loncat-B : *Roller* loncatan terletak baik di hulu maupun hilir *step*. Untuk loncat-B, ketinggian air hilir lebih rendah dari loncat-A, tetapi tepat di batas untuk menghambat pembentukan gelombang berdiri.
- Aliran tipe gelombang : Diikuti oleh loncat hidraulis, baik yang mengandung udara (*aerated*) atau tidak mengandung udara (*non-aerated*), tergantung pada ketinggian langkah relatif
- Aliran yang sepenuhnya superkritis.



ambar 21. Jenis aliran pada langkah positif

a) Loncat-A, b) Loncat-B

c) gelombang dengan gelembung udara (*Aerated*)

d) gelombang tanpa gelembung udara (*Non-Aerated*)

Sumber. Hager, 1992



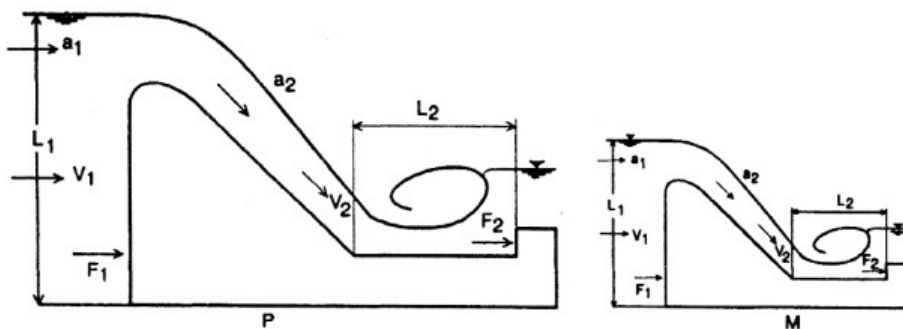
Karena memiliki kondisi air hilir superkritik, aliran tipe gelombang hanya mampu meredam sebagian energi. Oleh karena itu, jenis aliran ini harus dihindari jika tujuan utamanya adalah menciptakan kolam olak yang efektif dalam meredam energi.

1.2.5 Uji Model Hidraulik

Model bertindak sebagai instrumen prediktif guna mengevaluasi perilaku serta kinerja suatu struktur atau mesin. Eksistensi model memungkinkan identifikasi defisiensi potensial yang belum terantisipasi, agar tindakan korektif dapat segera diambil sebelum konstruksi prototipe. Selain itu, model memfasilitasi komparasi sejumlah alternatif perencanaan, yang bermuara pada pemilihan desain yang paling optimal. Prototipe merupakan istilah bagi bentuk asli bangunan, sedangkan model dapat dibuat dalam skala lebih kecil, sama, ataupun lebih besar daripada prototipe.

1.2.5.1 Sifat Sebangun

Hubungan antara model dan prototip dipengaruhi oleh hukum-hukum sifat sebangun hidrolis. Sifat sebangun ini memperhatikan beberapa aspek yaitu sebangun geometrik, sebangun kinematik dan sebangun dinamik. Perbandingan antara prototip dan model disebut skala model. (Triatmodjo, 2008)



Gambar 22. Hubungan prototip dan model pada pengaliran melalui bangunan pelimpah
Sumber. Triatmodjo, 2008



ometrik

ip kesebangunan geometris terpenuhi jika model dan prototipe imaan bentuk fisik namun berbeda dimensi ukurannya. Kondisi casikan bahwa rasio antara seluruh dimensi panjang yang termasuk parameter kekasaran permukaan pada model dan

prototipe, adalah konstan. Nilai perbandingan ini secara teknis disebut sebagai skala geometrik model n_L :

$$n_L = \frac{\text{ukuran di prototipe}}{\text{ukuran di model}} = \frac{L_p}{L_m} \quad (14)$$

2. Sebangun kinematik

Kesebangunan kinematik antara prototipe dan model dapat terwujud apabila persyaratan kesebangunan geometris telah terpenuhi, serta rasio antara kecepatan dan percepatan pada titik-titik yang bersesuaian di dalam kedua sistem tersebut memiliki nilai yang konstan untuk seluruh domain pengaliran.

3. Sebangun dinamik

Suatu sistem dinyatakan memenuhi kesebangunan dinamis apabila prototipe dan modelnya telah sebangun secara geometris dan kinematis, serta gaya-gaya yang bersangkutan pada model dan prototipe untuk seluruh domain pengaliran terbukti memiliki rasio perbandingan yang konstan dan bekerja pada arah vektor yang sama.

1.2.5.2 Studi Model

Dalam proses perencanaan infrastruktur bangunan keairan, pelaksanaan studi model memiliki peranan yang sangat krusial dan strategis. Secara garis besar, terdapat dua klasifikasi model utama yang lazim diaplikasikan, yaitu model matematis dan model fisik. Model matematis diterapkan pada fenomena yang mampu diformulasikan ke dalam persamaan matematis dan diselesaikan menggunakan metode numerik berbantuan komputer. Sementara itu, model fisik berfungsi mereplikasi fenomena aktual di lapangan ke dalam skala yang lebih kecil dengan mempertahankan derajat kesebangunan yang memadai.

Model fisik dibagi menjadi dua jenis, bergantung pada skala perbandingannya. Skala ini didefinisikan sebagai rasio dimensi antara ukuran prototipe di lapangan terhadap ukuran pada model. Berdasarkan skala tersebut, model fisik diklasifikasikan menjadi dua kategori, yaitu:

1. Model distorsi

Model distorsi didefinisikan sebagai jenis model fisik yang memiliki konfigurasi geometri yang tidak sebangun atau menyimpang dari bentuk asli



Penggunaan model jenis ini sangat lazim diterapkan untuk asikan objek studi yang memiliki karakteristik dimensi horizontal ih dominan dan luas dibandingkan dengan dimensi vertikalnya, i sering dijumpai pada kasus pemodelan sungai yang panjang labuhan yang luas. Apabila rasio skala horizontal dan vertikal untuk seragam, maka konsekuensinya adalah kedalaman air akan menjadi terlampaui dangkal. Kondisi ini tidak hanya

menyulitkan instrumen dalam melakukan pengukuran akurat, tetapi juga berisiko tinggi mengubah rezim aliran secara fundamental, yakni dari aliran turbulen menjadi laminar akibat dominasi gaya viskositas. Guna memitigasi kendala teknis ini, skala horizontal didesain dengan rasio yang lebih kecil dibandingkan skala vertikal. Kendati demikian, pelaksanaan studi menggunakan model distorsi ini memiliki kompleksitas yang jauh lebih tinggi dan data yang dihasilkan tidak dapat dengan mudah ditranslasikan secara langsung pada kondisi lapangan yang sebenarnya.

2. Model tak distorsi

Konsep model tak distorsi merujuk pada suatu sistem simulasi yang secara ketat mempertahankan prinsip kesebangunan geometris secara sempurna antara model uji di laboratorium dan struktur prototipe di lapangan. Hal ini mengimplikasikan bahwa seluruh konfigurasi bentuk, elemen spasial, serta proporsi dimensi pada model direplikasi agar identik dan sama persis dengan kondisi aslinya, tanpa adanya deviasi bentuk sedikit pun. Dengan demikian, satu-satunya aspek fundamental yang membedakan keberadaan kedua entitas fisik tersebut hanyalah terletak pada rasio perbandingan skala ukurannya yang diperkecil secara linear dan proporsional. Sebagai konsekuensi logis dan keuntungan utama dari adanya konsistensi kesebangunan geometris yang terjaga utuh ini, proses fabrikasi maupun konstruksi model tak distorsi dinilai relatif lebih sederhana dan mudah untuk dieksekusi secara teknis. Lebih jauh lagi, data empiris yang dihasilkan dari serangkaian pengujian model memiliki tingkat validitas yang tinggi, sehingga dapat dengan sangat mudah ditranslasikan, diinterpretasikan, serta diaplikasikan secara langsung untuk memprediksi perilaku prototipe tanpa memerlukan analisis faktor koreksi yang rumit.

Tabel 1. Skala besaran model tak distorsi

Parameter	Notasi	Skala besaran
Panjang/Tinggi	L/h	$n_L = n_h$
Luas	A	$n_A = n_L^2$
Volume	V	$n_V = n_L^3$
	v	$n_v = n_L^{\frac{1}{2}}$
	Q	$n_Q = n_L^{\frac{5}{2}}$
	t	$n_t = \sqrt{n_L}$



BAB II METODE PENELITIAN

2.1 Pendekatan Penelitian dan Ruang Lingkup Studi

Penelitian ini mengadopsi pendekatan kuantitatif dengan metode eksperimental di laboratorium hidraulika. Pendekatan ini dipilih karena fenomena hidraulik pada bendung, seperti pembentukan terjunan air dan loncatan hidraulik, melibatkan interaksi kompleks antara gaya inersia dan gaya gravitasi yang sulit dimodelkan secara akurat hanya dengan pendekatan analitis. Melalui model fisik, dimungkinkan untuk secara langsung mengamati dan mengukur perilaku aliran permukaan bebas serta efektivitas struktur peredam energi, yaitu kolam olak. Keberadaan terjunan air di hilir bendung dapat menyebabkan gangguan pada struktur yang berpotensi menurunkan kestabilan bendung, sehingga analisis empiris dengan model fisik menjadi krusial untuk mengidentifikasi perilaku aliran dan mengukur besarnya energi yang teredam.

Ruang lingkup studi ini berfokus pada analisis perilaku hidraulik bendung dengan mercu tipe bulat dan efisiensi peredaman energi pada kolam olak. Persiapan, prosedur, dan variabel-variabel yang diinvestigasi dalam penelitian ini dijelaskan secara rinci pada sub-bab berikut.

2.2 Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Hidraulika, Program Studi Teknik Sipil, Universitas Hasanuddin. Pelaksanaan penelitian dilakukan selama rentang waktu selama 9 bulan mulai dari Januari hingga September 2025, yang mencakup serangkaian tahapan mulai dari studi literatur, pembuatan dan pemasangan model fisik, persiapan dan kalibrasi alat, pengambilan data eksperimental, hingga analisis data.



Gambar 23. Peta lokasi penelitian

2.3 Perencanaan Model Fisik

Penelitian ini didasarkan pada hukum kesamaan froude sebagai kriteria utama. Hukum froude diterapkan karena gaya gravitasi merupakan gaya dominan yang mengendalikan fenomena aliran permukaan bebas pada bendung dan kolam olak.

2.3.1 Kriteria Kesamaan Model-Prototipe

Penelitian ini menggunakan model fisik tak distorsi, di mana rasio skala panjang, lebar, dan tinggi adalah sama. Pendekatan ini didasarkan pada prinsip sifat sebangun kesetaraan dinamis, yang menyatakan bahwa model dan prototipe harus memiliki kesamaan perilaku hidraulik, khususnya saat gaya gravitasi merupakan gaya dominan. Untuk penelitian ini, rasio skala panjang (n_L) ditetapkan sebesar 100, yang berarti setiap dimensi linier prototipe adalah 100 kali lebih besar dari modelnya ($L_p = 100 \times L_m$). Berdasarkan rasio skala panjang (n_L), konversi parameter hidraulik dari prototipe ke model dihitung dengan rumus berikut:

- Rasio skala panjang (n_L): rasio skala untuk panjang, tinggi, dan Lebar.

$$n = \frac{L_p}{L_m} = 100 \quad (15)$$

- Rasio skala debit (QR): rasio skala untuk debit, yang didasarkan pada hukum froude.

$$n_Q = n_L n_h n_V = n_L^2 n_L^{\frac{1}{2}} = n_L^{\frac{5}{2}} = (100)^{\frac{5}{2}} \quad (16)$$

Pada penelitian ini, karena hasil konversi lebar prototipe bendung lebih besar dari ketersediaan lebar alat flume pada laboratorium, maka nilai hasil konversi debit prototipe ke nilai model akan dikalikan dengan persentase perbandingan lebar flume dan hasil konversi lebar bendung prototipe (38%). Dengan menggunakan hubungan penskalaan ini, parameter prototipe dari skripsi terdahulu dikonversi menjadi parameter model yang digunakan dalam eksperimen.

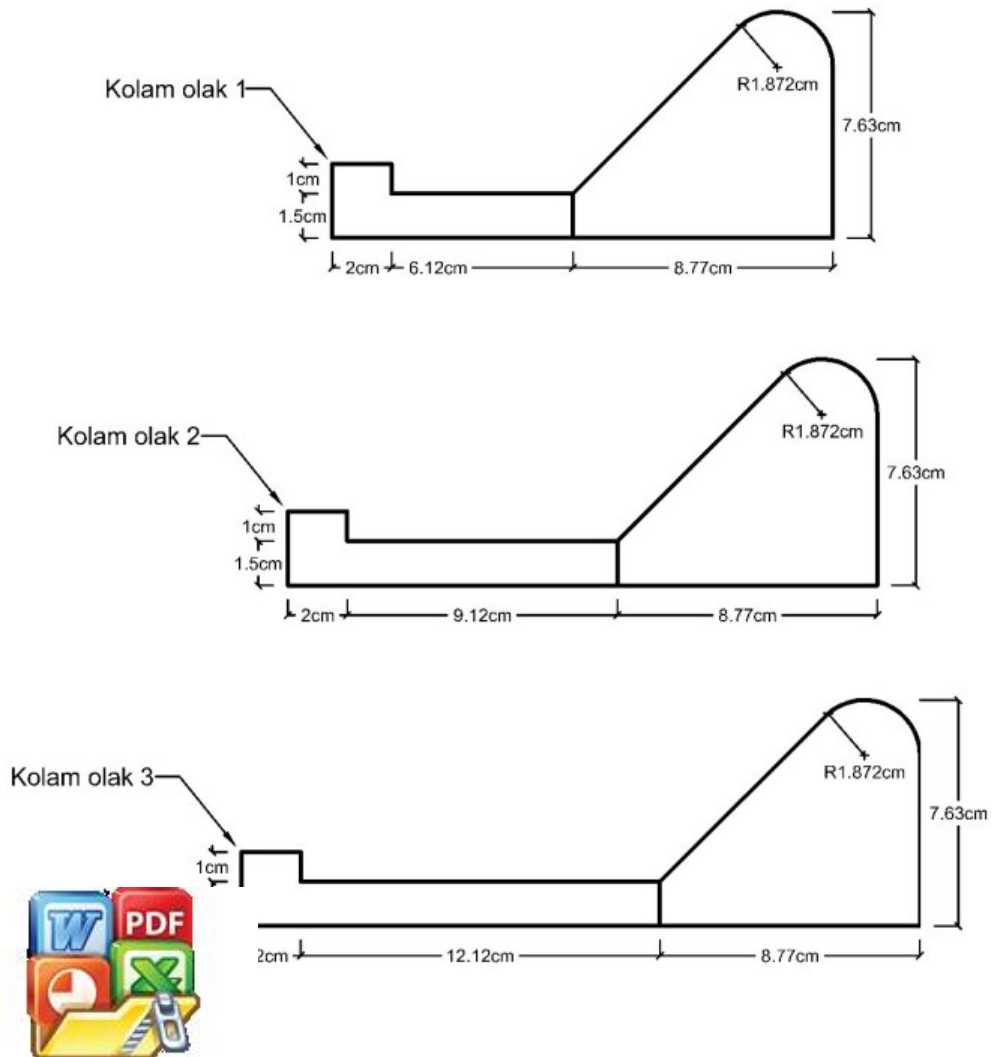
Tabel 2. Tabel nilai parameter prototipe dan model

Parameter	Nilai Prototipe	Rasio Skala	Nilai Model
Panjang bendung	16,86 m	100	0,1686 m
Tinggi bendung	7,63 m	100	0,0763 m
Lebar benduna	20 m	100	0,2 m
	1,872 m	100	0,01872 m
	6,12 m	100	0,0612 m
	9,12 m	100	0,0912 m
	12,12 m	100	0,1212 m
	93,739 m ³ /s	100 ^{5/2}	0,000356208 m ³ /s
	148,931 m ³ /s	100 ^{5/2}	0,000565938 m ³ /s
	191,461 m ³ /s	100 ^{5/2}	0,000727552 m ³ /s



2.3.2 Desain Model Fisik

Berikut adalah desain model fisik bendung mercu bulat dan kolam olak yang digunakan dalam penelitian ini, berdasarkan hasil penskalaan tabel nilai parameter prototipe dan model.



Gambar 24. Desain rencana model

2.4 Peralatan dan Bahan Penelitian

Eksperimen hidraulik ini dilakukan dengan menggunakan model fisik yang ditempatkan di dalam saluran flume hidraulika. Perencanaan dan pembuatan model didasarkan pada data teknis dari skripsi terdahulu mengenai prototipe bendung.

2.4.1 Peralatan Utama

- Flume saluran terbuka: saluran flume hidraulika dengan penampang persegi panjang dengan dimensi panjang 900 cm, lebar 7,6 cm, dan tinggi 26 cm. Flume ini dilengkapi dengan sistem sirkulasi air tertutup yang terdiri dari pompa air dan katup pengatur debit.
- Model bendung mercu bulat: Model skala dari bendung mercu bulat yang dibuat dari bahan akrilik dengan dimensi yang disesuaikan berdasarkan rasio skala yang telah ditentukan.
- Model kolam olak: bagian di hilir bendung yang berfungsi sebagai bangunan peredam energi. Kolam olak dibuat dengan 3 variasi panjang: 6,12 cm, 9,12 cm, dan 12,12 cm.
- Ambang kontrol hilir (sill): Ambang yang ditempatkan di hilir sejauh 1,4 meter dari mercu bendung untuk mengatur tinggi muka air hilir. Ambang ini memiliki 3 variasi ketinggian yang berbeda.
- Dasar saluran: bagian ini yang terbuat dari triplek yang dicat kedap air ditempatkan dengan tinggi 4,88 cm di hulu bendung dan 2,5 cm di hilir kolam olak.

2.4.2 Pembuatan Model

Model fisik bendung dan kolam olak dibuat secara mandiri (fabrikasi) di laboratorium.

- Bahan utama model: lembaran akrilik (*acrylic sheet*).
- Bahan dasar saluran: triplek
- Alat fabrikasi: gergaji listrik, gergaji tangan, bor listrik, kikir, kertas amplas dan sekrup (sebagai pengikat sambungan).
- Bahan finishing: dempul (untuk menutup celah dan memastikan presisi bentuk) dan cat kedap air (untuk finishing dan memastikan model kedap air).



n Pengumpulan Data

Debit aliran dikontrol dan diukur melalui katup pompa. Untuk memvalidasi akurasi debit, dilakukan kalibrasi dengan alat ukur debit yang melibatkan penampungan air pada wadah tertentu dan pencatatan waktu menggunakan *stopwatch*. Metode

ini memastikan bahwa debit yang mengalir pada flume sesuai dengan debit rencana model, yang menjadi dasar dari semua perhitungan selanjutnya.

- Alat pengukur profil muka air: metode utama yang digunakan untuk mencatat profil muka air adalah dengan menggambar profil aliran secara visual di atas lembaran grid yang ditempelkan pada dinding saluran flume. Data profil yang digambar kemudian diolah lebih lanjut dengan memplotnya ke perangkat lunak sebagai rekaman data mentah yang berisi koordinat profil muka air dan kedalam aliran untuk memudahkan dalam proses analisis data.

2.5 Variabel Penelitian

Penelitian ini menganalisis hubungan sebab-akibat antara variabel-variabel yang dimanipulasi dengan parameter hidraulik yang diukur. Berikut adalah klasifikasi variabel yang digunakan dalam studi ini:

2.5.1 Variabel Independen

Variabel independen adalah variabel yang diubah atau dimanipulasi secara sistematis oleh peneliti untuk mengamati dampaknya terhadap variabel dependen. Variabel independen dalam penelitian ini meliputi:

- Debit aliran model (Q_m): terdiri dari tiga variasi, yaitu replikasi dari debit rencana prototipe periode ulang 2 tahun, 5 tahun, dan 10 tahun.
- Panjang kolam olak model (L_{basin}): terdiri dari tiga variasi, yang mencakup satu panjang sesuai perencanaan prototipe dan dua panjang percobaan lainnya.
- Ketinggian ambang kontrol hilir (h_{sill}): terdiri dari empat variasi ketinggian yang berbeda, yaitu tanpa ambang kontrol, serta ambang dengan ketinggian 1 cm, 2 cm, dan 3 cm.

2.5.2 Variabel Dependen

Variabel dependen adalah variabel yang diukur dan diamati perubahannya sebagai respons terhadap manipulasi variabel independen. Variabel dependen dalam penelitian ini adalah:

- Kedalaman aliran (y): kedalaman air diukur di berbagai titik di sepanjang saluran, termasuk di hulu bendung, di atas mercu, di awal dan akhir loncatan hidraulik dan di hulu ambang kontrol. Kedalaman ini menjadi data untuk menghitung parameter lainnya.



• Energi spesifik (E_s): energi total per satuan berat aliran relatif terhadap dasar saluran. Energi spesifik diukur untuk mengidentifikasi kehilangan energi.

• Bilangan Froude (Fr): bilangan tak berdimensi yang digunakan untuk mengklasifikasi rezim aliran.

- Kehilangan energi (ΔE): selisih energi spesifik sebelum dan sesudah loncatan hidraulik, yang menunjukkan besarnya energi yang berhasil diredam.
- Efisiensi peredaman energi (η): rasio antara energi yang hilang dengan energi total di atas mercu, dinyatakan dalam persen, untuk mengukur efektivitas kolam olak.

2.5.3 Variabel Terkontrol

Variabel terkontrol adalah faktor-faktor yang dipertahankan konstan di sepanjang eksperimen untuk memastikan bahwa perubahan yang diamati pada variabel dependen hanya disebabkan oleh manipulasi variabel independen. Variabel terkontrol dalam penelitian ini adalah:

- Geometri dan dimensi flume: dimensi saluran flume (lebar dan tinggi) dijaga konstan sepanjang eksperimen.
- Geometri dan dimensi model bendung: model bendung dan mercunya memiliki dimensi dan bentuk yang tetap untuk semua kombinasi eksperimen.
- Lokasi ambang kontrol hilir: jarak ambang kontrol dari mercu bendung dipertahankan konstan pada 1,4 meter.

2.6 Prosedur Pelaksanaan Eksperimen

2.6.1 Persiapan dan Kalibrasi Alat

Sebelum eksperimen utama dimulai, serangkaian prosedur persiapan dan kalibrasi dilakukan untuk memastikan data yang akurat.

1. Persiapan flume: saluran flume dan bak penampungan air dibersihkan dari kotoran atau endapan sisa percobaan sebelumnya.
2. Kalibrasi debit: prosedur kalibrasi dilakukan untuk memverifikasi kesesuaian debit yang diatur melalui katup pompa dengan debit aktual yang mengalir di flume. Caranya adalah dengan mengatur katup pompa untuk mencapai perkiraan debit rencana model, kemudian memvalidasi debit tersebut menggunakan metode volumetrik. Proses ini melibatkan penampungan air yang keluar dari flume ke dalam wadah bervolume terukur sambil mencatat waktu yang diperlukan.



ngambilan Data

Adopsi matriks eksperimen yang sistematis dengan total 36 yang merupakan hasil dari perkalian 3 variasi debit, 3 variasi dan 4 variasi ketinggian ambang kontrol yang meliputi kondisi dengan ambang 1 cm, 2 cm, dan 3 cm.

Tabel 3. Tabel matriks variasi eksperimen

No. Eksperimen	Variasi Panjang Kolam Olak	Variasi Debit (Qm ³ /s)	Variasi Ketinggian Ambang Kontrol
1-4	Basin1	Q1	Tanpa ambang, 1 cm, 2 cm, 3 cm
5-8	Basin1	Q2	Tanpa ambang, 1 cm, 2 cm, 3 cm
9-12	Basin1	Q3	Tanpa ambang, 1 cm, 2 cm, 3 cm
13-24	Basin2	Q1, Q2, Q3	Tanpa ambang, 1 cm, 2 cm, 3 cm
25-36	Basin3	Q1, Q2, Q3	Tanpa ambang, 1 cm, 2 cm, 3 cm

Langkah-langkah pengambilan data untuk setiap kombinasi perlakuan adalah sebagai berikut:

1. Atur panjang kolam olah dan ketinggian ambang kontrol hilir sesuai dengan kombinasi eksperimen yang akan diuji.
2. Nyalakan pompa dan atur katup pengatur debit hingga mencapai debit model yang direncanakan. Biarkan aliran air di dalam saluran flume mencapai kondisi stabil.
3. Lakukan pengukuran profil muka air sepanjang saluran flume dengan metode visualisasi grid. Profil muka air digambar pada lembaran grid yang ditempel pada dinding saluran untuk merekam perubahan kedalaman yang terjadi di sepanjang aliran.
4. Dokumentasikan profil yang digambar.
5. Ulangi langkah 1 hingga 4 untuk variasi debit model berikutnya dan seterusnya hingga semua 36 kombinasi perlakuan selesai diuji.

2.7 Metode Analisis Data

Data mentah yang dikumpulkan dari eksperimen diolah dan dianalisis untuk memperoleh parameter hidraulik yang diperlukan dan mengukur energi spesifik dan efisiensi energi.



Energi Spesifik

Definisikan sebagai energi total per satuan berat aliran relatif. Membuat kurva energi spesifik pada dasarnya adalah

membuat semacam "peta" sederhana untuk aliran air di saluran. Tujuannya adalah untuk memahami bagaimana kedalaman air berhubungan dengan energi yang dimilikinya.

Untuk membuat kurva, perlu menghitung tiga hal secara berurutan. Pertama, luas penampang basah aliran, kecepatan aliran air dan energi total untuk berbagai kedalaman yang berbeda kedalaman yang sangat dangkal, lalu secara bertahap menghitungnya untuk kedalaman yang semakin dalam dengan menggunakan rumus di bawah dan memplot setiap pasang data ke dalam grafik.

Analisis energi spesifik akan terfokus pada pembuatan grafik kurva energi spesifik untuk 3 variasi debit, yang menggambarkan hubungan antara kedalaman aliran (y) dan energi spesifik (E_s) pada setiap variasi debit. Kurva ini akan membantu memvisualisasikan bagaimana total energi aliran berubah di sepanjang saluran.

2.7.1.1 Formula Perhitungan Energi Spesifik dan Kedalaman Kritis

1. Konsep dasar energi spesifik.

Energi spesifik (E_s), atau sering disebut tinggi energi spesifik, didefinisikan sebagai tinggi energi total aliran yang diukur relatif terhadap dasar saluran ($Z = 0$). Konsep ini menggabungkan energi potensial yang diwakili oleh kedalaman aliran (y) dan energi kinetik yang diwakili oleh tinggi kecepatan ($V^2/2g$).

Persamaan fundamental untuk energi spesifik pada saluran terbuka adalah:

$$E_s = y + \frac{V^2}{2g} \quad (17)$$

Dalam konteks model fisik di laboratorium, di mana saluran flume memiliki penampang persegi panjang dan aliran cenderung seragam. Dengan mengganti kecepatan aliran (V) menggunakan hubungan debit (Q) dan luas penampang (A), persamaan energi spesifik dapat ditulis sebagai fungsi tunggal dari kedalaman aliran (y) untuk debit konstan (Q):

$$E_s = y + \frac{Q^2}{2gb^2y^2} \quad (18)$$

Hubungan ini menunjukkan bahwa, untuk debit yang tetap, perubahan aliran secara non-linear akan menghasilkan perubahan energi

kritis dan energi minimum.

Kedalaman kritis (y_c) merupakan parameter hidraulika yang sangat penting. Jadi, y_c adalah kedalaman aliran yang menghasilkan nilai energi minimum (E_{min}) untuk debit tertentu. Kondisi aliran yang terjadi saat



kedalaman sama dengan y_c dikenal sebagai aliran kritis, yang berfungsi sebagai batas pemisah antara dua rezim aliran utama:

- Aliran superkritis: terjadi ketika kedalaman aliran (y) lebih kecil daripada kedalaman kritis (y_c), atau bilangan froude (Fr) lebih besar dari 1. Aliran pada kondisi ini cepat dan didominasi oleh energi kinetik
- Aliran subkritis: terjadi ketika kedalaman aliran (y) lebih besar daripada kedalaman kritis (y_c), atau bilangan froude (fr) lebih kecil dari 1. Aliran pada kondisi ini lambat dan didominasi oleh energi potensial.

Untuk saluran persegi panjang (saluran flume), Kedalaman Kritis (y_c) dihitung berdasarkan debit per satuan lebar ($q = Q/b$) dan percepatan gravitasi (g):

$$y_c = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}} \quad (19)$$

atau

$$y_c = \sqrt[3]{\frac{Q^2}{gb^2}} \quad (20)$$

Selanjutnya, energi spesifik minimum (E_{min}) yang sesuai dengan dapat dihitung sebagai:

$$E_{min} = y_c + \frac{V_c^2}{2g} \quad (21)$$

$$E_{min} = y_c + \frac{1}{2}y_c = \frac{3}{2}y_c \quad (22)$$

Penentuan dan untuk setiap variasi debit menjadi dasar untuk membandingkan kondisi aliran aktual yang terukur di sekitar struktur bendung.

2.7.2 Analisis Kehilangan dan Peredaman Energi



n fokus utama penelitian untuk mengevaluasi efektivitas kolam rgi diukur melalui dua parameter utama, yaitu kehilangan energi nan. Kehilangan energi total (ΔE) pada sistem bendung dan erdasarkan prinsip konservasi energi dan persamaan bernoulli, i dua penampang kritis: penampang 1 (di atas mercu bendung) hilir kolam olak, setelah loncatan hidraulik).

Data yang diukur dan dihitung akan disajikan dalam bentuk tabel dan grafik untuk memvisualisasikan hubungan antar parameter. Pengukuran ini memungkinkan untuk menganalisis bagaimana variasi debit, panjang kolam olak, dan ketinggian ambang kontrol secara kolektif memengaruhi efisiensi peredaman. Analisis ini akan memverifikasi hipotesis bahwa konfigurasi geometris kolam olak dan kontrol hilir yang tepat dapat mengoptimalkan peredaman energi.

2.7.2.1 Perhitungan Parameter Energi Total

Untuk menghitung energi total di setiap titik, diperlukan perhitungan kecepatan rata-rata dan tinggi energi total.

A. Kecepatan aliran (V):

Kecepatan rata-rata dihitung berdasarkan kontinuitas aliran pada penampang saluran persegi empat model.

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{Q}{b \times y} \quad (23)$$

Keterangan: Q_m adalah debit model (m^3/s), A adalah luas penampang aliran (m^2), b adalah lebar saluran/flume (m), dan y adalah kedalaman aliran terukur (m).

B. Tinggi energi total (E):

Tinggi energi total (*total head* atau *energy grade line*, EGL) dihitung berdasarkan persamaan bernoulli, mencakup tinggi elevasi (z), tinggi tekanan (y), dan tinggi kecepatan ($V^2/2g$).

$$E = z + y + \frac{V^2}{2g} \quad (24)$$

Keterangan: z adalah tinggi elevasi dasar saluran relatif terhadap datum (m), y adalah kedalaman aliran terukur (m), V adalah kecepatan rata-rata (m/s), dan g adalah percepatan gravitasi (m/s^2)

2.7.2.2 Evaluasi Kehilangan Energi dan Efisiensi Peredaman

Kehilangan energi total (ΔE) adalah perbedaan energi total antara penampang di hulu (E_1) dan penampang di hilir kolam olak (E_2). Kehilangan ini meliputi energi hidraulik yang terjadi di sepanjang pelimpah dan



energi (ΔE):

energi dihitung sebagai selisih energi total antara hulu (mercu) dan hilir (kolam olak).

$$\Delta E = E_1 - E_2 \quad (25)$$

Nilai ΔE menunjukkan kuantitas energi yang berhasil diubah menjadi panas, gesekan, dan turbulensi, menunjukkan kapasitas disipasi seluruh sistem struktur peredam dalam satuan meter energi.

B. Efisiensi peredaman energi (η):

Efisiensi peredaman memberikan metrik kinerja relatif, yaitu perbandingan antara energi yang hilang (ΔE) terhadap energi awal yang masuk (E_1).

$$\eta = \frac{\Delta E}{E_1} \times 100\% \quad (26)$$

Efisiensi ini adalah parameter kunci untuk menilai kombinasi variabel yang paling optimal.

