

BAB 1. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Gerusan lokal di hilir bangunan hidraulik bertekanan rendah merupakan permasalahan yang terus berulang dalam praktik rekayasa sumber daya air karena berpotensi mengurangi stabilitas struktur, mempercepat degradasi dasar saluran, serta meningkatkan kebutuhan perkuatan dan pemeliharaan. Pada struktur seperti weir rendah, *spillway* kecil, dan outlet bangunan pengendali aliran, *hydraulic jump* digunakan sebagai mekanisme utama untuk disipasi energi. Namun, proses transisi dari aliran superkritis ke subkritis membentuk struktur turbulensi yang intens (*roller vortices*) serta fluktuasi tekanan yang dapat bertahan hingga melewati batas kolam olak. Ketika sisa energi turbulen ini mencapai zona dasar yang erodibel, terbentuk lubang gerusan dengan kedalaman dan panjang yang signifikan, yang pada skala prototipe dapat memicu kerusakan beruntun pada proteksi hilir dan elemen struktur terkait. Hal ini terungkap dalam penelitian Emiroglu dan Tuna (2011), Termini dan Sammartano (2012), Abdelhaleem (2013), Espa dan Sibilla, (2014), Mohamed dkk (2014), Shayan dkk (2015), Padulano dkk (2017), Champagne dkk (2017), Palermo dan Pagliara (2018), Chaudhary dkk (2019), Zhao dkk (2019), Wang dkk (2019), Guan dkk (2020) serta Saleh dan Khassaf (2023).

Studi tentang gerusan lokal di bagian hilir struktur hidrolik akibat aliran melalui bangunan air bertekanan rendah (*low-head structures*) dan bangunan air bertekanan tinggi (*high-head structures*) yang menimbulkan lompatan hidrolik pada lantai olak telah ditinjau secara kritis oleh banyak peneliti seperti Dargahi (2003), Abdelhaleem (2013), Champagne dan Barkdoll (2015) dan Champagne dkk (2017). Untuk aliran melalui *spillway* pada struktur bertekanan tinggi, umumnya para peneliti melakukan modifikasi pada geometri *spillway*, seperti yang dilakukan oleh Tuna dan

Emiroglu (2013), Ljubičić dkk (2018), dan Stojnic (2020), dengan meneliti pengaruh bentuk *stepped spillway* terhadap gerusan lokal di hilir bangunan.

Sementara itu, untuk aliran melalui *spillway* pada bangunan air bertekanan rendah, para peneliti lebih cenderung melakukan modifikasi pada geometri lantai olak (*apron*) untuk mereduksi gerusan lokal di hilir, seperti yang dilakukan oleh Abdelhaleem (2013), Alwan dkk (2016), Elnikhely (2016) dan Chaudhary dkk (2019).

Perkembangan riset hidrolika dalam satu dekade terakhir menunjukkan pergeseran fokus dari sekadar “menstabilkan” *hydraulic jump* menuju pengendalian mekanisme disipasi energi dan transmisi turbulensi ke hilir. Berbagai pendekatan pengendali *hydraulic jump* telah dikaji untuk memodifikasi struktur aliran, mempercepat pemecahan *vorteks* koheren, dan mengurangi jangkauan pengaruh erosif, antara lain sistem dissipator berbasis *cross-beam* (Hajialigol dkk, 2021; Hajialigol dkk, 2024), pendekatan berbasis *jet* (Sharoonizadeh dkk, 2021; Dehkordi dkk, 2023; Mahjoubi dkk, 2024), serta rekayasa batas (*boundary modification*) melalui elemen *roughness* terstruktur dan perangkat pasif lainnya (Adeli dkk, 2021; Tahmasbipour dkk, 2024). Sintesis literatur terbaru juga menegaskan bahwa orientasi dan konfigurasi kekasaran dasar berpengaruh terhadap karakteristik *hydraulic jump* dan pola disipasi energi (Agrawal dan Padhi, 2025).

Di antara berbagai alternatif modifikasi pasif, kolam olak bergelombang (*corrugated apron*) dan kolam olak berkemiringan terbalik (*reverse-inclined/adverse apron*) memiliki keunggulan karena dapat diterapkan tanpa meningkatkan kompleksitas operasional. *Corrugated apron* memicu siklus *separation-reattachment* yang memperkaya frekuensi *eddy* dan mempercepat peluruhan struktur *vorteks*, sedangkan *reverse-inclined apron* berpotensi mengubah arah momentum *jet* sehingga mengurangi *impingement* langsung pada dasar hilir (Ead dan Rajaratnam, 2002; Ali dkk, 2014; Farhoudi dan Shayan, 2014). Meski demikian, efektivitas kedua

konfigurasi tersebut sering dilaporkan secara terpisah atau dinilai dengan indikator hidraulik internal (misalnya panjang loncatan dan y_2 / y_1), sementara hubungan mekanistik antara geometri lantai olak, disipasi energi, dan respons morfodinamika hilir (kedalaman dan panjang gerusan) belum terkuantifikasi secara sistematis, khususnya pada struktur bertekanan rendah.

1.2. Masalah Penelitian

Secara umum, studi-studi kolam olak termodifikasi telah menunjukkan potensi reduksi gerusan lokal di hilir *hydraulic jump*, dimana kolam olak bergelombang mampu memendekkan *hydraulic jump* dan meningkatkan intensitas turbulensi lokal, sedangkan kolam olak berkemiringan terbalik dapat membelokkan jet superkritis dan mengurangi *impingement* langsung ke dasar hilir. Akan tetapi, terdapat tiga kelemahan metodologis dan konseptual yang sering muncul dan menyebabkan hasil antarkonfigurasi sulit dibandingkan secara objektif. Pertama, fokus evaluasi masih dominan pada parameter hidraulik di dalam kolam olak (seperti: Fr_1 , y_2/y_1 , L_j , ΔE), sehingga respons morfodinamika hilir kerap diperlakukan sebagai keluaran sekunder. Kedua, parameter geometrik utama *corrugated apron*, yaitu *pitch ratio* (S/t), sering diposisikan sebagai variasi geometrik biasa; perannya sebagai pengendali skala vorteks, jarak peluruhan turbulensi, dan jangkauan pengaruh erosi belum diisolasi sebagai variabel utama dalam kerangka analisis tak berdimensi. Ketiga, perbandingan kinerja sering dilakukan berdasarkan debit aktual atau bilangan *Froude* tanpa jangkar (anchor) yang hidraulik-netral; padahal debit, kedalaman, dan kondisi sekuen saling terkopel, sehingga efek geometri dan efek hidraulik dapat tercampur dan menimbulkan *circular scaling*.

Untuk menghindari bias akibat kopling parameter hidraulik dan memastikan perbandingan antargeometri yang setara, penelitian ini menempatkan “netralitas hidraulik” sebagai prinsip analitis utama. Normalisasi debit

dengan acuan kondisi kritis pada konfigurasi referensi flat apron ($Fr = 1$) digunakan untuk mempertahankan independensi antara (i) eksitasi hidraulik ($Fr_1, Q_n, y_2/y_1$), (ii) modulasi geometri (S/t dan sudut kemiringan terbalik θ), dan (iii) respons morfodinamika (D_{max}/y_1 dan Ls/y_1). Kerangka ini memungkinkan interpretasi bahwa perubahan gerusan berasal dari mekanisme disipasi energi dan transmisi *vorteks* yang dimodifikasi oleh geometri, bukan artefak skala akibat perubahan debit-kedalaman.

Berdasarkan uraian tersebut, permasalahan penelitian ini ditegaskan sebagai berikut: belum tersedianya kajian eksperimental yang secara sistematis dan hidraulik-netral mengungkap pengaruh *pitch ratio* dan sudut kemiringan terbalik pada kolam olak bergelombang terhadap mekanisme disipasi energi serta reduksi gerusan lokal di hilir *hydraulic jump* pada struktur bertekanan rendah.

1.3. Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk mengisi celah ilmiah tersebut melalui eksperimen laboratorium pada kolam olak bergelombang berkemiringan terbalik (*corrugated–reverse-inclined apron*) dengan pendekatan analisis tak berdimensi dan debit ternormalisasi. Tujuan umum penelitian ini adalah mengkaji pengaruh *pitch ratio* dan sudut kemiringan terbalik terhadap mekanisme disipasi energi serta respons morfodinamika hilir (kedalaman dan panjang gerusan) pada *hydraulic jump* bertekanan rendah.

Secara khusus, penelitian ini diarahkan untuk:

- a. mengkuantifikasi pengaruh *pitch ratio* (S/t) terhadap perubahan pola disipasi energi di dalam *roller* dan terhadap D_{max}/y_1 serta Ls/y_1 pada berbagai tingkat debit ternormalisasi;
- b. menganalisis sensitivitas sudut kemiringan terbalik kecil (θ) dalam mengendalikan *impingement jet* dan memperpendek jangkauan pengaruh turbulensi ke dasar hilir;

- c. menjelaskan interaksi gabungan parameter $S/t - \theta$ dalam memodifikasi struktur aliran (*separation-reattachment*, koherensi vorteks) dan konsekuensi morfodinamika hilir;
- d. mengembangkan model empiris nondimensi untuk memprediksi D_{max}/y_1 dan L_s/y_1 yang aplikatif untuk perancangan bangunan bertekanan rendah.

1.4. Kontribusi Bagi Ilmu Pengetahuan

Kontribusi ilmiah disertasi ini tidak hanya berupa penambahan data eksperimen, melainkan juga berupa sintesis mekanistik yang menghubungkan geometri lantai olak dengan disipasi energi dan pembentukan gerusan. Kontribusi utama penelitian ini dapat diringkas sebagai berikut:

- penetapan *pitch ratio* (S/t) sebagai *first-order morphodynamic control* yang mengatur jarak peluruhan koherensi vorteks dan jangkauan pengaruh erosif di hilir;
- pembuktian peran sudut kemiringan terbalik kecil ($\leq 5^\circ$) sebagai pengendali redireksi *momentum jet* dengan indikasi *diminishing returns* pada sudut yang lebih besar;
- penerapan kerangka debit ternormalisasi berbasis kondisi kritis ($Fr = 1$) sebagai pembanding hidraulik-netral yang menghindari *circular scaling* dan memperkuat generalisasi antargeometri;
- pengembangan model empiris non-dimensi D_{max}/y_1 dan L_s/y_1 sebagai basis prediksi desain untuk saluran/bangunan bertekanan rendah yang sensitif terhadap sedimen.

1.5. Manfaat Penelitian

Secara akademik, penelitian ini memperkaya pemahaman mengenai keterkaitan antara struktur turbulensi *hydraulic jump*, disipasi energi di dalam kolam olak, serta respons morfodinamika dasar di hilir. Secara

praktis, hasil penelitian ini memberikan dasar ilmiah untuk merancang kolam olak yang lebih efisien dan ekonomis melalui pemilihan *pitch ratio* dan sudut kemiringan terbalik yang tepat, sehingga risiko gerusan lokal di hilir bangunan bertekanan rendah dapat ditekan tanpa bergantung pada perkuatan hilir yang berlebihan.

Meskipun penelitian ini dilakukan pada skala laboratorium, hasil yang diperoleh memiliki implikasi praktis bagi pengembangan desain kolam olak pada bangunan air bertekanan rendah. Melalui pendekatan parameter tak berdimensi, hasil penelitian dapat digunakan sebagai dasar awal untuk mengevaluasi kecenderungan perilaku aliran dan gerusan pada skala yang lebih besar dengan tetap memperhatikan prinsip kesebangunan hidraulik (*hydraulic similarity*) dan keterbatasan efek skala (*scale effect*).

Secara praktis, temuan penelitian ini dapat menjadi acuan dalam memilih konfigurasi apron yang lebih efisien untuk meningkatkan disipasi energi, mengurangi konsentrasi gaya erosif di hilir, serta menekan kebutuhan perlindungan tambahan seperti riprap atau perkuatan dasar saluran. Dengan demikian, hasil penelitian ini berpotensi mendukung perancangan kolam olak yang lebih ekonomis, adaptif, dan berorientasi pada pengendalian gerusan lokal secara berkelanjutan.

1.6. Hipotesis Penelitian

Berdasarkan latar belakang, rumusan masalah, tujuan penelitian, serta sintesis penelitian terdahulu, penelitian ini dibangun berdasarkan beberapa hipotesis konseptual sebagai berikut.

Pertama, variasi *pitch ratio* (S/t) pada kolam olak bergelombang berpengaruh terhadap struktur aliran di dalam zona hydraulic jump. Pitch ratio yang berbeda diduga menghasilkan perbedaan skala gangguan aliran, pola separation–reattachment, serta distribusi energi di dekat dasar, sehingga memengaruhi kedalaman dan panjang gerusan lokal di hilir kolam olak.

Kedua, sudut kemiringan terbalik (θ) pada kolam olak bergelombang diduga berperan dalam mengubah arah momentum aliran dan mengurangi intensitas impingement jet pada dasar saluran. Dengan demikian, peningkatan sudut kemiringan dalam batas tertentu diharapkan mampu mereduksi konsentrasi energi lokal dan mendistribusikan tegangan geser dasar secara lebih merata.

Ketiga, kombinasi antara pitch ratio (S/t) dan sudut kemiringan terbalik (θ) diduga tidak bekerja secara terpisah, melainkan berinteraksi dalam mengendalikan mekanisme disipasi energi dan pembentukan gerusan. Interaksi kedua parameter tersebut diperkirakan menghasilkan konfigurasi kolam olak yang lebih efektif dalam menurunkan kedalaman gerusan maksimum serta mengendalikan panjang zona gerusan.

Keempat, penggunaan parameter debit ternormalisasi ($Q_n = Q_{act}/Q_{cr}$) diduga mampu memberikan kerangka pembanding yang lebih konsisten untuk mengevaluasi pengaruh geometri terhadap respons gerusan. Dalam hal ini, Q_n tidak dimaksudkan untuk menggantikan bilangan Froude, tetapi digunakan sebagai parameter normalisasi untuk menyetarakan skala energi antarpercobaan.

1.7. Ruang Lingkup dan Batasan Penelitian

Penelitian ini dibatasi pada kajian eksperimental laboratorium mengenai pengaruh *pitch ratio* dan kemiringan terbalik pada kolam olak bergelombang terhadap mekanisme disipasi energi dan gerusan lokal di hilir *hydraulic jump*. Ruang lingkup dan batasan penelitian ditetapkan agar interpretasi hasil, model empiris, serta implikasi desain yang dihasilkan tetap berada dalam domain parameter yang diuji.

Pertama, kondisi aliran yang dikaji dibatasi pada aliran berubah cepat (*rapidly varied flow*) berupa *hydraulic jump* yang terbentuk pada sistem bangunan air bertekanan rendah (*low-head hydraulic structures*). Penelitian ini tidak membahas *hydraulic jump* pada struktur bertekanan tinggi, aliran

dengan tekanan tertutup, maupun kondisi aliran lapangan yang dipengaruhi oleh perubahan muka air hilir secara ekstrem.

Kedua, variasi debit aktual dibatasi pada empat debit pengujian laboratorium, yaitu $Q_1 = 6,8 \text{ l/s}$, $Q_2 = 5,5 \text{ l/s}$, $Q_3 = 4,3 \text{ l/s}$, dan $Q_4 = 3,6 \text{ l/s}$. Rentang debit ini digunakan untuk mengevaluasi perubahan respons hidraulik dan morfologi dasar pada kondisi energi aliran yang berbeda, tetapi tidak dimaksudkan untuk mewakili seluruh rentang debit yang mungkin terjadi pada bangunan air skala prototipe.

Ketiga, konfigurasi geometri kolam olak dibatasi pada apron datar sebagai *baseline* dan *apron* bergelombang dengan tinggi gelombang tetap sebesar $t = 5 \text{ cm}$. Variasi panjang gelombang yang digunakan adalah $S = 15 \text{ cm}$, 20 cm , dan 30 cm , sehingga menghasilkan pitch ratio $S/t = 3$, 4 , dan 6 . Sudut kemiringan terbalik yang diuji dibatasi pada $\theta = 0^\circ$, $1,5^\circ$, 3° , dan 5° . Dengan demikian, penelitian ini tidak mengevaluasi variasi bentuk gelombang lain, tinggi gelombang lain, maupun sudut kemiringan di luar rentang tersebut.

Keempat, media gerusan bergerak (*movable bed*) dibatasi pada sedimen pasir alami Sungai Batang Kuranji, Padang, dengan karakteristik sedimen yang tetap dijaga selama pengujian. Parameter sedimen yang digunakan meliputi diameter median butiran (d_{50}) sebesar **1,837 mm**. Penelitian ini tidak membahas pengaruh variasi gradasi sedimen, sedimen kohesif, maupun kondisi dasar saluran terhadap material campuran.

Kelima, parameter yang diukur secara langsung meliputi debit (Q_1, Q_2, Q_3 dan Q_4), kedalaman aliran hulu (y_1), kedalaman aliran hilir (y_2), kedalaman gerusan maksimum (D_{max}), panjang gerusan (L_s), serta profil gerusan yang terbentuk setelah pengujian. Mekanisme seperti struktur turbulensi, *flow separation*, *flow reattachment*, redistribusi tegangan geser dasar, dan intensitas *impingement jet* tidak diukur secara langsung menggunakan instrumen seperti *Particle Image Velocimetry (PIV)*, *Acoustic Doppler Velocimeter (ADV)*, atau simulasi numerik beresolusi tinggi. Oleh karena itu, interpretasi mekanisme fisik dalam penelitian ini

bersifat inferensial, yaitu diturunkan dari pola respons hidraulik dan morfologi yang terukur berdasarkan beberapa penelitian sejenis terdahulu, serta didukung oleh teori hidraulika yang relevan.

Keenam, model empiris yang dikembangkan berlaku pada domain eksperimen penelitian ini, yaitu rentang debit, geometri apron, sudut kemiringan, dan karakteristik sedimen yang telah ditetapkan. Penerapan model di luar rentang tersebut memerlukan validasi tambahan, baik melalui eksperimen lanjutan, simulasi numerik, maupun verifikasi pada skala prototipe.

