

BAB 5. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Penelitian ini menghasilkan kerangka pemahaman baru mengenai mekanisme gerusan lokal di hilir kolam olak bergelombang–*adverse apron*, yang tidak hanya dipandang sebagai respons langsung terhadap energi aliran, tetapi juga sebagai hasil interaksi kompleks antara distribusi energi, geometri dasar, dan struktur aliran yang terbentuk.

Berdasarkan hasil analisis eksperimental, pengolahan data, serta pemodelan empiris yang telah dilakukan, diperoleh beberapa kesimpulan utama sebagai berikut:

Pertama, fenomena gerusan lokal terbukti tidak sepenuhnya dikendalikan oleh besarnya energi aliran yang direpresentasikan oleh bilangan Froude, melainkan oleh mekanisme distribusi energi yang dimodifikasi oleh geometri kolam olak. Dalam hal ini, konfigurasi *corrugated–adverse* berfungsi sebagai sistem pengendali energi (*energy modulator*) yang mampu mengubah struktur aliran dari dominasi momentum horizontal menjadi distribusi energi yang lebih terdispersi dan terkendali.

Kedua, rasio *pitch* (S/t) dan sudut kemiringan terbalik (θ) memiliki peran yang berbeda namun saling melengkapi dalam mengendalikan proses gerusan. Rasio *pitch* mengontrol frekuensi interaksi aliran dengan permukaan dasar, yang berpengaruh terhadap pembentukan struktur turbulensi, sedangkan sudut kemiringan terbalik berperan dalam mengubah arah dan intensitas lintasan aliran melalui mekanisme redistribusi tekanan dan energi. Interaksi kedua parameter ini menentukan pola dan intensitas gerusan yang terjadi di hilir kolam olak.

Ketiga, hasil pemodelan empiris menunjukkan bahwa kedalaman gerusan relatif (D_{max}/y_1) dan panjang zona gerusan (L_s/y_1) dapat direpresentasikan secara akurat sebagai fungsi dari parameter tak

berdimensi utama, yaitu bilangan Froude (Fr_1), rasio pitch (S/t), dan sudut kemiringan (θ). Model yang dikembangkan memiliki tingkat keandalan yang tinggi, dengan nilai koefisien determinasi mencapai $R^2 > 0.95$ untuk kedalaman gerusan dan $R^2 \approx 0.77$ untuk panjang gerusan pada domain *adverse*, yang menunjukkan bahwa model mampu menangkap karakteristik utama fenomena gerusan secara representatif.

Keempat, penelitian ini memperkenalkan kerangka analisis hidraulik-netral melalui parameter debit tak berdimensi ($Q_n = Q_{act}/Q_{cr.}$), yang berfungsi sebagai referensi energi intrinsik sistem. Dengan menggunakan kondisi kritis pada flat apron (Fr_1) sebagai baseline, pendekatan ini memungkinkan pemisahan yang jelas antara pengaruh energi aliran dan pengaruh geometri. Hal ini merupakan kontribusi metodologis yang signifikan, karena memungkinkan analisis multivariat dilakukan secara independen dan tidak bias terhadap variasi debit.

Kelima, dari sisi rekayasa, konfigurasi kolam olak bergelombang dengan *pitch* yang relatif rapat dan kemiringan *adverse* moderat terbukti memberikan kinerja terbaik dalam mereduksi kedalaman gerusan maksimum sekaligus mengontrol distribusi zona gerusan. Temuan ini menunjukkan bahwa desain kolam olak yang efektif tidak hanya berfokus pada disipasi energi maksimum, tetapi juga pada pengendalian distribusi energi secara spasial untuk meminimalkan konsentrasi gaya erosif.

Berdasarkan keseluruhan temuan tersebut, dapat ditegaskan bahwa kontribusi ilmiah utama dari penelitian ini adalah:

1. Perumusan konsep mekanistik baru yang menjelaskan bahwa gerusan lokal merupakan fungsi dari distribusi energi, bukan semata-mata besarnya energi aliran.
2. Pengembangan kerangka hidraulik-netral (Q_n) sebagai pendekatan analitis untuk mengisolasi pengaruh energi dan geometri dalam sistem aliran kompleks.

3. Formulasi model empiris tak berdimensi yang robust dan dapat digunakan sebagai alat prediksi dalam perancangan kolam olak bergelombang.
4. Integrasi parameter geometri (S/t dan θ) dalam satu kerangka desain terpadu, yang sebelumnya dianalisis secara terpisah dalam studi-studi terdahulu.

Secara khusus, penelitian ini menegaskan bahwa respon gerusan tidak semata-mata dikontrol oleh besaran energi aliran, tetapi oleh bagaimana energi tersebut didistribusikan ulang melalui interaksi antara struktur aliran dan konfigurasi geometri dasar.

Berbeda dengan pendekatan konvensional yang masih terkopel dengan debit aktual, pendekatan ini memberikan dasar yang lebih konsisten dalam membandingkan berbagai konfigurasi kolam olak pada kondisi multivariabel.

Selain itu, penelitian ini menunjukkan bahwa mekanisme disipasi energi dan reduksi gerusan merupakan hasil dari interaksi terintegrasi antara pitch ratio (S/t) dan sudut kemiringan terbalik (θ), yang secara simultan memodifikasi struktur aliran melalui proses *flow separation*, *flow reattachment*, serta redistribusi tegangan geser pada dasar. Temuan ini mengindikasikan bahwa pendekatan desain berbasis parameter tunggal tidak cukup untuk merepresentasikan kompleksitas fenomena hidraulik yang terjadi.

Meskipun model empiris yang dihasilkan memiliki tingkat akurasi yang tinggi dalam domain eksperimen, validitasnya secara kuantitatif tetap dibatasi oleh rentang parameter yang diuji. Namun demikian, karena model dan interpretasi yang dikembangkan berbasis pada parameter tak berdimensi dan didukung oleh mekanisme fisik yang konsisten, hasil penelitian ini berpotensi dikembangkan lebih lanjut melalui validasi pada kondisi dan skala yang lebih luas.

Model empiris dan kerangka hidraulik-netral yang dikembangkan dalam penelitian ini berlaku dalam domain eksperimen yang diuji, yaitu pada rentang debit laboratorium, konfigurasi pitch ratio, sudut kemiringan terbalik, serta karakteristik sedimen yang digunakan. Oleh karena itu, hasil penelitian ini tidak dimaksudkan sebagai rumusan universal untuk seluruh tipe kolam olak atau seluruh kondisi lapangan, melainkan sebagai kerangka empiris-mekanistik yang valid pada domain pengujian dan berpotensi dikembangkan lebih lanjut melalui validasi eksternal.

Dengan demikian, kontribusi Q_n dalam penelitian ini perlu dipahami sebagai *promising hydraulic-neutral framework* yang memberikan dasar perbandingan yang lebih konsisten antarkonfigurasi, namun masih memerlukan pengujian pada geometri lain, tipe basin lain, variasi sedimen yang lebih luas, serta kondisi prototipe untuk memperkuat universalitasnya.

Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya memberikan kontribusi pada aspek empiris, tetapi juga memperkuat dasar teoretis dalam bidang hidraulika, khususnya terkait mekanisme disipasi energi dan gerusan lokal pada struktur bertekanan rendah.

5.2. Saran

Sebagai tindak lanjut dari penelitian ini, beberapa saran diajukan untuk pengembangan ilmu pengetahuan maupun penerapan praktis di bidang rekayasa hidraulika, diantaranya yaitu:

- Dari sisi pengembangan ilmiah, penelitian lanjutan perlu diarahkan pada eksplorasi mekanisme aliran secara lebih detail melalui pendekatan eksperimental lanjutan maupun simulasi numerik tiga dimensi. Penggunaan teknik pengukuran kecepatan aliran seperti *Particle Image Velocimetry (PIV)* atau *Acoustic Doppler Velocimeter (ADV)* dapat memberikan pemahaman yang lebih mendalam tentang struktur turbulensi dan distribusi energi di sekitar kolam olak bergelombang. Selain itu, integrasi model empiris yang dikembangkan dengan

pendekatan numerik berbasis *Computational Fluid Dynamics* (CFD) akan membuka peluang untuk validasi yang lebih luas pada berbagai kondisi aliran dan skala.

- Penelitian lanjutan juga disarankan untuk memasukkan analisis ketidakpastian (*uncertainty analysis*) terhadap parameter pengukuran utama, terutama kedalaman aliran, kedalaman gerusan maksimum, panjang gerusan, dan debit aliran. Analisis ini penting karena pengukuran pada skala laboratorium sangat sensitif terhadap kesalahan kecil, sementara kesalahan tersebut dapat memengaruhi nilai parameter turunan seperti $Fr_{1,y_2/y_1}$, D_{max}/y_1 , L_s/y_1 , dan Q_n . Dengan adanya analisis ketidakpastian, tingkat keandalan data eksperimen dan model empiris dapat dinilai secara lebih kuantitatif.
- Selain itu, validasi eksternal perlu dilakukan menggunakan dataset independen, baik dari laboratorium lain, konfigurasi kolam olak yang berbeda, maupun data lapangan yang relevan. Validasi eksternal diperlukan untuk menguji ketahanan model (*model robustness*) di luar data pembentuk model serta untuk menilai sejauh mana kerangka hidraulik-netral berbasis Q_n dapat diterapkan pada sistem hidraulik yang lebih luas.
- Dari sisi metodologi, konsep hidraulik-netral yang diperkenalkan melalui parameter Q_n masih memiliki ruang untuk dikembangkan lebih lanjut, khususnya dalam penerapannya pada sistem hidraulik yang lebih kompleks, seperti spillway bertingkat, struktur dengan aliran tidak seragam, maupun kondisi sedimen yang heterogen. Pengujian terhadap variasi karakteristik sedimen, seperti distribusi ukuran butiran dan kohesi material dasar, juga perlu dilakukan untuk memperluas validitas model.
- Dari sisi praktis, hasil penelitian ini dapat dijadikan dasar dalam perancangan kolam olak yang lebih efisien dan adaptif terhadap kondisi lapangan. Namun demikian, penerapan langsung pada skala prototipe

memerlukan kajian lanjutan terkait efek skala (*scale effect*) dan kondisi batas yang berbeda dari model laboratorium. Oleh karena itu, diperlukan studi lanjutan pada skala yang lebih besar atau melalui pendekatan model fisik skala menengah untuk memastikan keandalan desain dalam kondisi nyata.

- Lebih lanjut, penelitian ini membuka peluang untuk pengembangan konsep desain kolam olak yang tidak hanya berorientasi pada disipasi energi, tetapi juga pada pengendalian morfodinamika dasar sungai secara berkelanjutan. Integrasi antara desain struktur hidraulik dan manajemen sedimen menjadi arah penting yang perlu dikembangkan dalam penelitian selanjutnya.

Dengan demikian, penelitian ini diharapkan tidak hanya menjadi kontribusi akademik, tetapi juga menjadi landasan bagi inovasi dalam perancangan dan pengelolaan struktur hidraulik yang lebih efektif, efisien, dan berkelanjutan di masa mendatang.

