



Studi Eksperimental Koefisien Kekasaran Menggunakan Variasi Kekasaran Dasar Saluran

Nabila^{1*}, Totoh Andayono², Fahmi Rizal³, Syaiful Haq⁴

¹ Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Padang, Padang, Sumatera Barat, Indonesia

² Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Padang, Padang, Sumatera Barat, Indonesia

³ Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Padang, Padang, Sumatera Barat, Indonesia

⁴ Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Padang, Padang, Sumatera Barat, Indonesia

*Corresponding Author: usernabila27@gmail.com

Abstrak: Kecepatan aliran pada saluran terbuka merupakan salah satu parameter penting dalam analisis hidrolika karena berpengaruh terhadap kapasitas aliran, kehilangan energi, serta proses transportasi sedimen. Salah satu faktor yang memengaruhi studi ekperimental koefisien kekasaran permukaan dasar saluran. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi kekasaran dasar saluran terhadap profil studi ekperimental koefisien variasi kekasaran dasar saluran aliran melalui pengujian laboratorium. Penelitian menggunakan metode eksperimen dengan pendekatan kuantitatif yang dilaksanakan di Laboratorium Hidro Fakultas Teknik Universitas Negeri Padang menggunakan model saluran terbuka. Variasi kekasaran dibuat pada dasar saluran, kemudian dilakukan pengukuran kecepatan aliran pada beberapa titik kedalaman menggunakan alat ukur kecepatan aliran. Data dianalisis secara deskriptif dan komparatif untuk mengetahui perubahan kecepatan akibat variasi kekasaran. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan kekasaran dasar menyebabkan penurunan kecepatan aliran pada daerah dekat dasar saluran, sedangkan kecepatan maksimum bergeser menuju permukaan air. Variasi kekasaran juga memengaruhi bentuk ekperimental terhadap kekasaran akibat meningkatnya gaya gesek antara aliran dan permukaan dasar saluran. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi referensi dalam analisis hidrolika saluran terbuka serta perencanaan bangunan air yang mempertimbangkan kondisi kekasaran permukaan saluran.

Kata Kunci: Saluran Terbuka, Kekasaran Dasar, Kecepatan, Hidrolika.

Abstract: The flow velocity distribution in open channels is an important parameter in hydraulic analysis because it affects flow capacity, energy loss, and sediment transport processes. One factor that influences the velocity distribution is the roughness of the channel bed surface. This study aims to analyze the effect of variations in channel bed roughness on the vertical flow velocity distribution profile in open channels through laboratory testing. The study used an experimental method with a quantitative approach carried out at the Hydro Laboratory, Faculty of Engineering, Padang State University using an open channel model. Roughness variations were made on the channel bed, then flow velocity measurements were taken at several depth points using a flow velocity meter. Data were analyzed descriptively and comparatively to determine changes in velocity distribution due to roughness variations. The results showed that increasing bed roughness caused a decrease in flow velocity in the

area near the channel bed, while the maximum velocity shifted towards the water surface. Roughness variations also affected the shape of the vertical velocity distribution profile due to increased friction between the flow and the channel bed surface. The results of this study are expected to be a reference in open channel hydraulic analysis and water structure planning that considers the condition of the channel surface roughness.

Keywords: *Open Channel, Bed Roughness, Velocity, Hydraulics.*

PENDAHULUAN

Saluran terbuka merupakan salah satu bangunan hidraulik yang banyak digunakan dalam sistem irigasi, drainase, pengendalian banjir, maupun sistem distribusi air lainnya. Pada saluran terbuka, aliran air bergerak karena adanya pengaruh gaya gravitasi dengan permukaan aliran yang berhubungan langsung dengan atmosfer. Karakteristik aliran dalam saluran terbuka dipengaruhi oleh berbagai parameter hidraulik, seperti kemiringan dasar saluran, bentuk penampang, debit aliran, kedalaman air, serta kondisi kekasaran permukaan saluran (Chow, 1973). Faktor-faktor tersebut menentukan distribusi kecepatan aliran yang selanjutnya memengaruhi kapasitas saluran, kehilangan energi, stabilitas aliran, hingga proses transportasi sedimen.

Kecepatan aliran pada saluran terbuka tidak bersifat seragam terhadap kedalaman. Kecepatan maksimum umumnya tidak berada tepat di permukaan maupun di dasar saluran, tetapi berada sedikit di bawah permukaan air akibat pengaruh tegangan geser pada dasar dan hambatan udara di permukaan. Perubahan karakteristik permukaan dasar saluran menyebabkan perubahan distribusi tegangan geser sehingga memengaruhi bentuk kecepatan vertikal. Oleh karena itu, analisis studi ekperimental kecepatan menjadi aspek penting dalam memahami perilaku aliran pada saluran terbuka.

Salah satu parameter utama yang memengaruhi kecepatan adalah kekasaran dasar saluran. Kekasaran merupakan bentuk hambatan yang ditimbulkan oleh kondisi fisik permukaan saluran terhadap aliran air. Semakin kasar permukaan saluran, semakin besar tahanan aliran yang terjadi sehingga kecepatan aliran menurun dan kehilangan energi meningkat. Dalam analisis hidrolika, tingkat kekasaran umumnya direpresentasikan menggunakan koefisien Manning (n), yang menjadi parameter penting dalam perhitungan kecepatan dan debit aliran (Chow, 1973). Selain dipengaruhi oleh material penyusun saluran, kekasaran juga dipengaruhi oleh sedimentasi, pertumbuhan vegetasi, kerusakan permukaan, maupun perubahan kondisi akibat proses operasi dan pemeliharaan saluran (Houghtalen, Akan, & Hwang, 2017).

Berbagai penelitian menunjukkan bahwa perubahan tingkat kekasaran mampu mengubah karakteristik distribusi kecepatan aliran. penggunaan variasi kekasaran berpola grid pada dasar saluran menyebabkan penurunan kecepatan pada lapisan dekat dasar akibat meningkatnya gaya gesek. peningkatan kekasaran berpengaruh terhadap kehilangan energi, meskipun hubungan tersebut tidak selalu bersifat linier. Sementara itu, Cassan, Roux, dan Dartus menunjukkan bahwa distribusi kekasaran secara spasial menghasilkan perubahan signifikan terhadap kecepatan vertikal pada saluran terbuka.

Meskipun penelitian mengenai kekasaran saluran telah banyak dilakukan, kajian eksperimental mengenai pengaruh variasi kekasaran dasar terhadap kecepatan arah vertikal pada kondisi laboratorium masih perlu dikembangkan sebagai dasar validasi karakteristik aliran pada berbagai kondisi permukaan saluran. Penelitian ini dilakukan menggunakan model saluran terbuka di Laboratorium Hidro Fakultas Teknik Universitas Negeri Padang dengan memberikan variasi kekasaran pada dasar saluran, kemudian mengamati perubahan distribusi kecepatan pada beberapa titik kedalaman.

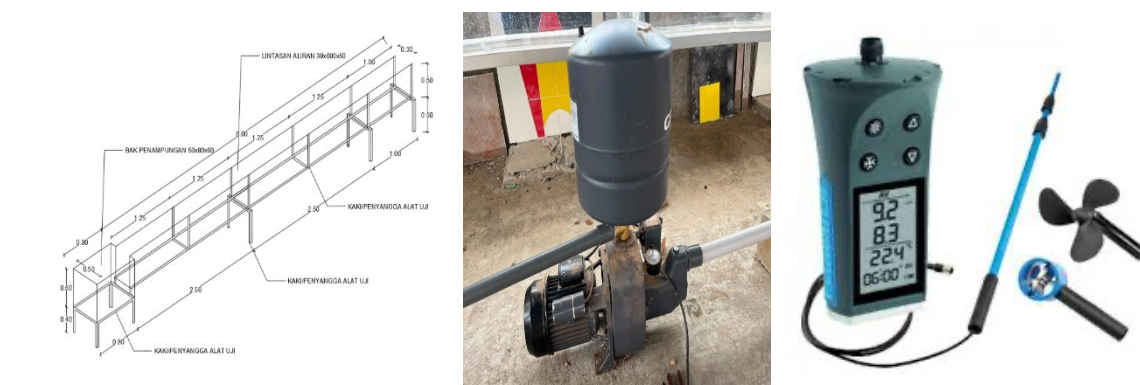
Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi kekasaran dasar saluran

terhadap studi ekprimental kecepatan aliran arah pada dasar saluran. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan informasi empiris mengenai perubahan karakteristik aliran akibat variasi kekasaran serta menjadi referensi dalam perencanaan, evaluasi, dan pengelolaan bangunan hidraulik.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode eksperimental laboratorium dengan pendekatan kuantitatif yang dirancang secara terkontrol. Pendekatan ini dipilih untuk mengisolasi dan menganalisis pengaruh variasi fisik material dasar saluran terhadap karakteristik hidraulika aliran, khususnya koefisien kekasaran dan profil kecepatan. Pengondisian lingkungan laboratorium diterapkan secara ketat agar hubungan kausalitas antara tingkat kekasaran permukaan dasar dengan fluktuasi parameter hidraulik dapat diamati secara langsung tanpa gangguan dari variabel eksternal. Seluruh rangkaian pengujian dilaksanakan di Laboratorium Hidro, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Padang, pada rentang waktu 10 Mei hingga 15 Juni 2026. Tahapan penelitian mencakup persiapan material, kalibrasi instrumen, pengambilan data *running* laboratorium, hingga analisis data hidraulika secara sistematis.

Media pengujian utama yang digunakan adalah model saluran terbuka (*rectangular flume*) berpenampang persegi panjang berbahan transparan (akrilik) yang memungkinkan pengamatan visual terhadap kondisi aliran. Model saluran ini memiliki dimensi panjang 6,11 m, lebar 0,2797 m, dan tinggi 0,50 m. Sistem aliran menerapkan mekanisme sirkulasi tertutup yang didukung oleh pompa air sentrifugal untuk mengalirkan air dari bak penampung (*reservoir*) ke dalam saluran uji, sehingga kontinuitas ketersediaan air tetap terjaga. Pengukuran parameter hidraulik dilakukan menggunakan instrumen yang terkalibrasi, meliputi *current meter* untuk mengukur kecepatan aliran secara presisi, meteran dan jangka sorong untuk mengukur dimensi geometri saluran dan elemen kekasaran, serta *waterpass* untuk memastikan akurasi pengaturan kemiringan dasar saluran.



Gambar 1. Setup Alat Eksperimen

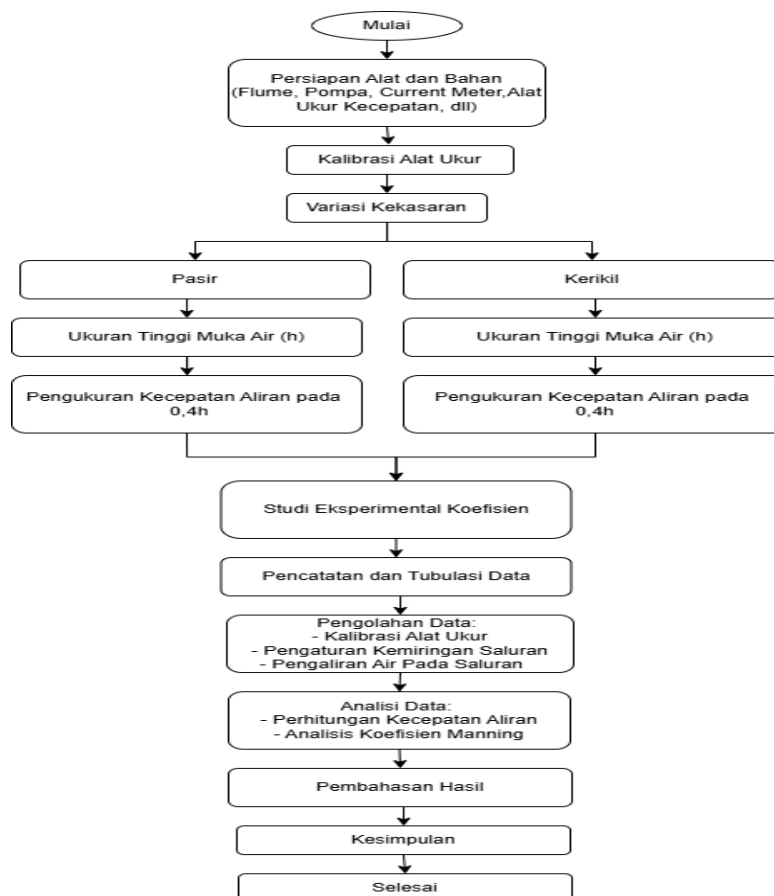
Untuk mengidentifikasi pengaruh berbagai faktor secara terstruktur, pengujian ini menetapkan tiga klasifikasi variabel. Variabel bebas (*independent variable*) meliputi debit aliran (Q), kemiringan dasar saluran (S), dan jenis kekasaran dasar saluran. Variasi kekasaran dasar yang diaplikasikan dalam eksperimen ini terdiri atas tiga kondisi, yaitu dasar polos (akrilik/normal), dasar pasir, dan dasar kerikil. Variabel terikat (*dependent variable*) merupakan respons aliran yang diamati, yang terdiri dari kecepatan aliran (V) dan tinggi muka air atau kedalaman aliran (h). Sementara itu, untuk menghindari bias eksternal pada hasil pembacaan hidraulik, variabel kontrol yang meliputi suhu air dan jenis fluida (air bersih) ditetapkan konstan sepanjang eksperimen berlangsung, mengingat perubahan parameter ini dapat memengaruhi viskositas kinematik fluida secara langsung.

Tabel 1. Identifikasi Variabel Penelitian

Jenis Variabel	Parameter	Keterangan / Satuan
Variabel Bebas	Debit (Q), Kemiringan (S), Kekasaran Dasar (n)	M^3/s , m/m, Variasi Material
Variabel Terikat	Kecepatan (V), Tinggi Muka Air (h)	m/s, m
Variabel Kontrol	Suhu Air, Jenis Fluida	Konstan (Air Bersih)

Proses akuisisi data di laboratorium dilakukan melalui serangkaian tahapan sistematis yang diawali dengan persiapan dan kalibrasi. Seluruh alat ukur, khususnya current meter, dikalibrasi terlebih dahulu untuk memastikan keakuratan data. Selanjutnya, kemiringan dasar saluran (slope) diatur menggunakan waterpass hingga mencapai angka kemiringan yang telah direncanakan ($S=0,016$). Setelah pengaturan geometri selesai, air dialirkan ke dalam saluran uji menggunakan pompa dari bak penampung. Debit diatur sedemikian rupa dan dibiarkan mengalir hingga mencapai kondisi aliran tunak (steady uniform flow).

Pada kondisi aliran yang telah stabil, pengukuran kedalaman aliran dilakukan untuk mendapatkan nilai tinggi muka air (h) pada titik penampang pengamatan. Kecepatan aliran kemudian diukur menggunakan current meter yang diposisikan tepat pada kedalaman 0,4h dari dasar saluran, yang secara teoritis merepresentasikan kecepatan rata-rata pada penampang terbuka. Seluruh data parameter hidraulik dicatat, dan pengujian diulang secara bertahap untuk setiap penggantian variasi kekasaran dasar saluran (normal, pasir, dan kerikil) guna mendapatkan sekumpulan data yang komprehensif dan representatif. Rangkaian tahapan penelitian ini secara skematis disajikan dalam diagram alir penelitian.

**Gambar 2.** Diagram Alir Penelitian

Data mentah yang diperoleh dari pengukuran fisik di laboratorium selanjutnya diolah menggunakan pendekatan matematis hidraulika saluran terbuka. Perhitungan geometri

penampang saluran persegi panjang meliputi penentuan luas penampang basah ($A=b \times h$), keliling basah ($P=b+2h$), dan jari-jari hidraulik ($R=A/P$). Validasi debit aliran dan kecepatan rata-rata dilakukan menggunakan hukum kontinuitas ($Q=A \times V$).

Untuk mengetahui besaran hambatan pada setiap variasi dasar saluran, koefisien kekasaran Manning (n) dievaluasi menggunakan turunan dari Persamaan Manning, dengan rumusan:

$$n = \frac{R^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}}}{V}$$

di mana RR adalah jari-jari hidraulik (m), SS adalah kemiringan energi atau dasar saluran (m/m), dan VV adalah kecepatan aliran (m/s).

Selanjutnya, untuk mengidentifikasi rezim aliran yang terjadi selama pengujian, digunakan parameter tak berdimensi Bilangan Reynolds ($ReRe$) dengan formulasi:

$$Re = \frac{VR}{\nu}$$

di mana ν merupakan viskositas kinematik fluida. Klasifikasi aliran ditetapkan berdasarkan kriteria: $Re < 500$ (laminar), $500 < Re < 2000$ (transisi), dan $Re > 2000$ (turbulen). Terakhir, untuk mengevaluasi seberapa besar disipasi energi akibat gesekan dasar pada masing-masing variasi kekasaran, perhitungan kehilangan energi (head loss) dilakukan menggunakan persamaan Darcy-Weisbach. Seluruh analisis data dilakukan secara komparatif untuk melihat pengaruh signifikan antara kondisi dasar normal, pasir, dan kerikil terhadap koefisien kekasaran dan karakteristik aliran.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik Saluran dan Kondisi Pengujian

Pengujian dilakukan pada model saluran terbuka berbentuk persegi panjang (rectangular flume) yang berada di Laboratorium Hidro Fakultas Teknik Universitas Negeri Padang. Flume memiliki panjang 6,11 m, lebar 0,2797 m, dan tinggi 0,50 m.

Tabel 2. Karakteristik Saluran

Tinggi Bukaan Pintu	Lebar Dasar Saluran (b)	Tinggi Muka Air (h)	Panjang Saluran	Luas Penampang Basah (A)	Elevasi Hulu	Elevasi Hilir	Beda Tinggi	Kemiringan Saluran
cm	m	cm	cm	cm	cm	cm	cm	%
-	0,2797	0,0108333	6,11	0,003030083	0,6	0,502	0,098	0,01603928

Sistem pengujian menggunakan sirkulasi tertutup yang terdiri atas pompa, bak penampung (reservoir), dan current meter sebagai alat utama pengukuran kecepatan aliran. Variabel penelitian meliputi debit aliran, kemiringan saluran, dan variasi kekasaran dasar, sedangkan parameter yang diamati adalah kecepatan aliran, kedalaman aliran, koefisien kekasaran Manning, bilangan Reynolds, serta karakteristik aliran yang terbentuk.

Sebelum dilakukan pengujian pada setiap variasi kekasaran, kondisi aliran dibuat stabil agar pengukuran yang diperoleh mewakili kondisi aliran seragam (*uniform flow*). Luas penampang basah dihitung berdasarkan hasil pengukuran lebar saluran dan tinggi muka air, sedangkan kemiringan dasar saluran diperoleh dari selisih elevasi antara hulu dan hilir. Berdasarkan hasil pengukuran diperoleh luas penampang basah sebesar 0,00303 m² dan kemiringan saluran sebesar 0,016. Nilai tersebut selanjutnya digunakan dalam analisis hidraulika menggunakan Persamaan Manning.

Analisis Koefisien Kekasaran Manning

Analisis koefisien kekasaran dilakukan pada tiga titik pengamatan, yaitu hulu (h1), tengah (h2), dan hilir (h3). Perhitungan dilakukan menggunakan Persamaan Manning dengan memanfaatkan data luas penampang basah, keliling basah, jari-jari hidraulik, kecepatan aliran, serta kemiringan dasar saluran, adapun perhitungan Koefisien kekasaran manning dengan rumus sebagai berikut:

$$V = \frac{1}{n} R^{2/3} S^{1/2}$$

Sehingga,

$$n = \frac{R^{2/3} S^{1/2}}{V}$$

Untuk menentukan jenis aliran (bilangan Reynols) dengan rumus sebagai berikut:

$$Re = \frac{V \cdot 4R}{\nu}$$

Untuk menentukan seberapa besar kehilangan energi dapat menggunakan rumus darcy-weisbach, adapun rumus yang digunakan adalah sebagai berikut:

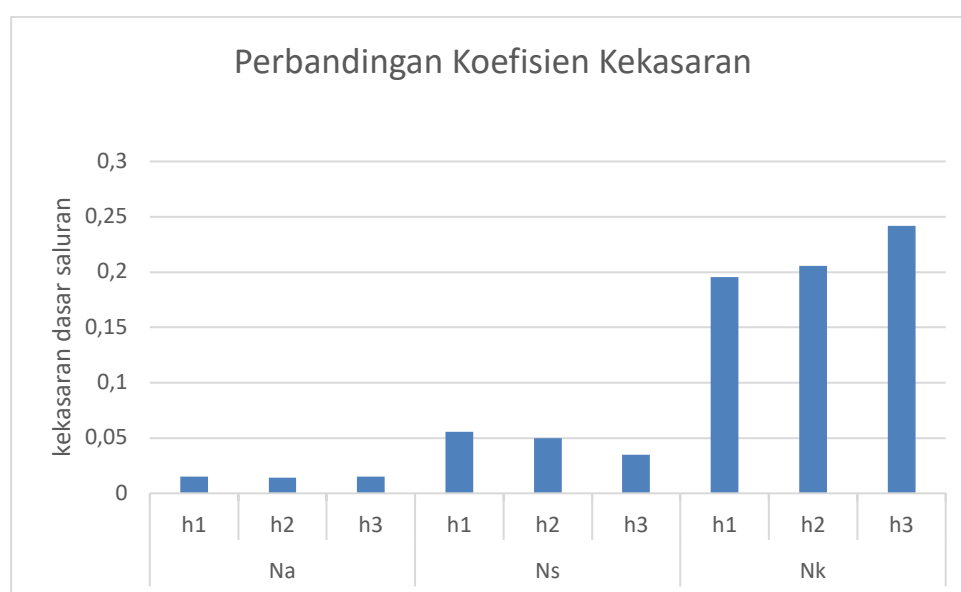
$$hf = f \cdot \frac{L}{4R} \cdot \frac{V^2}{2g}$$

Maka didapatkan hasil perhitungan pada tabel berikut:

Tabel 3. Analisa Pengaruh Koefisien kekerasan

Kondisi	Nilai Koefisien Kekasaran			n-rata rata	Jenis Aliran	Kehilangan energi(hf)(m)
	h1	h2	h3			
Normal	0,015	0,014	0,015	0,014	Turbulen	0,0488
Dasar Pasir	0,0555	0,496	0,0348	0,195	Turbulen	0,004
Dasar Kerikil	0,1954	0,2051	0,2415	0,214	Turbulen	0,060

Dan analisa pengaruh dapat dilihat pada grafik berikut:



Grafik 1. Perbandingan Koefisien Kekasaran

Hasil pengujian menunjukkan bahwa kondisi dasar saluran memberikan pengaruh yang nyata terhadap nilai koefisien kekasaran. Pada kondisi dasar normal, nilai kekasaran relatif lebih kecil karena permukaan saluran masih halus sehingga tahanan aliran yang terjadi juga rendah. Sebaliknya, ketika dasar saluran diberi material pasir, terjadi peningkatan tahanan aliran akibat bertambahnya kekasaran permukaan. Kondisi ini menyebabkan nilai koefisien Manning meningkat dibandingkan kondisi dasar normal.

Peningkatan nilai koefisien Manning menunjukkan bahwa gaya gesek antara aliran dan permukaan dasar saluran semakin besar. Secara teoritis, hubungan tersebut sesuai dengan Persamaan Manning yang menyatakan bahwa semakin besar nilai koefisien kekasaran, maka kecepatan rata-rata aliran akan semakin kecil pada kondisi debit dan kemiringan saluran yang sama (Chow, 1973). Fenomena tersebut juga didukung oleh Houghtalen dkk. (2021) yang menyatakan bahwa perubahan kecil pada nilai kekasaran mampu memberikan perubahan signifikan terhadap karakteristik hidraulika saluran terbuka.

Pengaruh Variasi Kekasaran terhadap Kecepatan Aliran

Kecepatan aliran merupakan parameter utama yang diamati dalam penelitian ini karena secara langsung dipengaruhi oleh perubahan tingkat kekasaran dasar saluran. Berdasarkan hasil pengujian laboratorium, kondisi dasar normal menghasilkan kecepatan aliran yang lebih tinggi dibandingkan kondisi dasar pasir seperti yang terlihat pada Tabel 2. Analisa Pengaruh Koefisien Kekasaran.

Penurunan kecepatan tersebut disebabkan oleh meningkatnya gaya gesek yang bekerja antara fluida dan permukaan dasar saluran. Semakin kasar permukaan saluran, semakin besar energi yang hilang akibat gesekan sehingga energi kinetik aliran berkurang. Akibatnya, distribusi kecepatan pada arah vertikal mengalami perubahan.

Secara hidraulik, fenomena tersebut sesuai dengan teori lapisan batas (boundary layer). Pada permukaan yang kasar, ketebalan lapisan batas meningkat sehingga gradien kecepatan di dekat dasar saluran menjadi lebih besar. Kondisi ini menyebabkan kecepatan maksimum bergeser menjauhi dasar menuju bagian atas aliran. Hasil penelitian ini sejalan dengan penelitian Wulandari (2023) yang menyatakan bahwa variasi kekasaran berpola grid menyebabkan penurunan kecepatan secara signifikan pada daerah dekat dasar saluran. Demikian pula Cassan dkk. (2020) menjelaskan bahwa distribusi kekasaran secara spasial mampu mengubah bentuk kecepatan vertikal sehingga tidak lagi mengikuti profil logaritmik ideal.

Identifikasi Jenis Aliran Berdasarkan Bilangan Reynolds

Bilangan Reynolds digunakan untuk mengidentifikasi rezim aliran yang terjadi selama proses pengujian. Berdasarkan perhitungan yang dilakukan pada setiap kondisi pengujian, nilai Reynolds menunjukkan bahwa karakteristik aliran berada pada rezim yang dianalisis sesuai kriteria Reynolds dalam saluran terbuka.

Menurut Chaudhry (2008), aliran dengan nilai Reynolds di atas 2000 termasuk dalam kategori turbulen. Pada kondisi turbulen, gaya inersia lebih dominan dibandingkan gaya viskositas sehingga terbentuk fluktuasi kecepatan dan pusaran (eddy) dalam aliran. Kondisi tersebut menyebabkan distribusi kecepatan tidak lagi mengikuti bentuk parabola seperti pada aliran laminar, melainkan mengikuti distribusi logaritmik yang dipengaruhi oleh kondisi kekasaran permukaan.

Seperti yang terlihat pada Tabel 2. Analisa Pengaruh Koefisien Kekasaran. Hasil penelitian menunjukkan bahwa perubahan kekasaran dasar saluran tidak hanya memengaruhi besarnya kecepatan aliran, tetapi juga meningkatkan intensitas turbulensi di sekitar dasar saluran. Hal ini mengakibatkan bertambahnya tegangan geser dasar (bed shear stress) sehingga tahanan aliran meningkat.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian mengenai Studi Eksprimental Koefisien Kekasaran Menggunakan Variasi Kekasaran Dasar Saluran yang telah dilakukan, diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Jenis aliran berdasarkan bilangan Reynolds
Jenis aliran ditentukan menggunakan krasifikasi: $Re < 500$ laminar, $500 < Re < 2000$ transisi, $Re > 2000$ turbulen, pada dasar polos $16320 > 2000$ memiliki jenis aliran turbulen, pasir $2080 > 2000$ turbulen, dan kerikil $4280 > 2000$ memiliki jenis aliran turbulen.
2. Pengaruh kekasaran dasar terhadap kehilangan energi
Nilai Koefisien Manning (n) meningkat seiring bertambahnya kekasaran dasar saluran. Urut nilai n dari yang terkecil hingga terbesar yaitu pada dasar polos nilai n berkisar 0,0012-0,015, pada dasar pasir 0,035-0,055, dan pada dasar kerikil mencapai 0,195-0,240.
3. Pengaruh kekasaran terhadap dasar terhadap kehilangan energi
Semakin besar nilai n, hambatan aliran semakin besar sehingga kecepatan aliran menurun. Hal ini menyebabkan kehilangan energi hf yang dihitung dengan rumus dracy-weisbach menjadi lebih besar pada dasar kasar. Dengan demikian, dasar saluran kerikil memberikan hambatan aliran pada besar, sedangkan dasar polos memberikan hambatan yang paling kecil.

REFERENSI

- Anzani, H. S., Kantoush, S. A., & Kobayashi, S. (2025). Impact of bed roughness configurations on flow dynamics and hydraulic resistance in open-channel flows. *Scientific Reports*, 15. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-33650-y>
- Cassan, L., Roux, H., & Dartus, D. (2020). Velocity distribution in open channel flow with spatially distributed roughness. *Environmental Fluid Mechanics*, 20, 129–149. <https://doi.org/10.1007/s10652-019-09720-x>
- Chaudhry, M. H. (2008). *Open-Channel Flow* (2nd ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-68648-6>
- Chow, V. T. (1973). *Open-Channel Hydraulics*. McGraw-Hill.
- Creswell, J. W. (2014). *Research Design: Qualitative, Quantitative, and Mixed Methods Approaches* (4th ed.). Sage Publications.
- Fatwa, A. (2023). Analisis karakteristik aliran dengan model pilar pada saluran terbuka. Universitas Hasanuddin.
- Flack, K. A., & Schultz, M. P. (2014). Roughness effects on wall-bounded turbulent flows. *Physics of Fluids*, 26(10), 101305. <https://doi.org/10.1063/1.4896280>
- Fox, R. W., & McDonald, A. T. (1994). *Introduction to fluid mechanics* (4th ed.). John Wiley & Sons.
- Fox, R. W., McDonald, A. T., & Pritchard, P. J. (2015). *Introduction to Fluid Mechanics* (8th ed.). Wiley.
- Hasyim, S., Salam, N., & Pallu, M. S. (2023a). Studi kecepatan aliran pada saluran terbuka dengan dinding Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP). *Prosiding Seminar Nasional Teknik Sipil UMS*.
- Hasyim, S., Salam, N., & Pallu, M. S. (2023b). Studi kecepatan aliran pada saluran terbuka dengan dinding Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP) BT - *Prosiding Seminar Nasional Teknik Sipil UMS*.
- Hazanah, M. (2023). Studi eksperimental terhadap distribusi kecepatan aliran pada ambang berpori dan tertutup pada flume. Universitas Hasanuddin.
- Houghtalen, R. J., Akan, A. O., & Hwang, N. H. C. (2017). *Fundamentals of Hydraulic Engineering Systems* (5th ed.). Pearson.
- Houghtalen, R. J., Akan, A. O., & Hwang, N. H. C. (2021). *Fundamentals of Hydraulic*

- Engineering Systems (6th ed.). Pearson.
- Li, J., & Li, S. S. (2020). Near-bed velocity and shear stress of open-channel flow over surface roughness. *Environmental Fluid Mechanics*, 20, 1085–1102. <https://doi.org/10.1007/s10652-019-09728-3>
- Marusic, I., Monty, J. P., Hultmark, M., & Smits, A. J. (2013). On the logarithmic region in wall turbulence. *Journal of Fluid Mechanics*, 716, R3. <https://doi.org/10.1017/jfm.2012.511>
- Munson, B. R., Okiishi, T. H., Huebsch, W. W., & Rothmayer, A. P. (2017). *Fundamentals of Fluid Mechanics* (7th ed.). Wiley.
- Nezu, I., & Nakagawa, H. (1993). *Turbulence in Open-Channel Flows*. IAHR Monograph.
- Rombbunga, Y. (2021). Pengaruh kemiringan struktur plat segitiga terhadap kecepatan gesek dasar pada saluran terbuka. Universitas Hasanuddin.
- Sahril, Y. (2023). Distribusi kecepatan dan pola aliran pada variasi hambatan terendam di saluran terbuka. Universitas Hasanuddin.
- Schlichting, H., & Gersten, K. (2017). *Boundary-Layer Theory* (9th ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-52919-5>
- Sugiyono. (2019). *Metode Penelitian Kuantitatif, Kualitatif, dan R&D*. Alfabeta.
- Tang, X., He, Y., & Liu, C. (2021). Velocity distribution and turbulence characteristics in rough open-channel flows. *Journal of Hydraulic Research*.
- Triatmodjo, B. (2018). *Hidraulika II*. Beta Offset.
- White, F. M. (2016). *Fluid Mechanics* (8th ed.). McGraw-Hill Education.
- Young, D. F., Munson, B. R., & Okiishi, T. H. (1997). *A brief introduction to fluid mechanics*. John Wiley & Sons.
- Chow, V. T. (1959). *Open-Channel Hydraulics*. McGraw-Hill.
- Houghtalen, R. J., Akan, A. O., & Hwang, N. H. C. (2017). *Fundamentals of Hydraulic Engineering Systems* (5th ed.). Pearson.
- Mardizal, J., Arbi, Y., & Akmal, I. (2023). Penelitian mengenai karakteristik aliran pada saluran terbuka dan pengaruh kekasaran terhadap kehilangan energi (sesuaikan dengan data publikasi yang Anda gunakan).
- Chaudhry, M. H. (2014). *Open-Channel Flow* (2nd ed.). Springer