

EVALUASI ESTIMASI KOEFISIEN KEKASARAN PADA EKSPERIMEN MODEL FISIK

THE EVALUATION OF ROUGHNESS COEFFICIENT ESTIMATION ON EXPERIMENTS OF PHYSICAL MODEL

¹Miskar Maini, ²Djoko Legono, ³Agatha Padma Laksitaningtyas

^{1,3}Program Studi Doktor Teknik Sipil, Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada

²Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada

¹miskar.maini@mail.ugm.ac.id, ²djokolegono@ugm.ac.id, ³agathapadma@mail.ugm.ac.id

Abstrak

Pengaliran air pada saluran terbuka sangat dipengaruhi pada bentuk permukaan saluran. Bentuk permukaan yang kasar akan memberikan kehilangan energi yang besar karena mempunyai nilai tahanan yang besar dan sebaliknya dengan bentuk permukaan yang halus kehilangan energi cukup kecil. Banyak peneliti yang telah melakukan eksperimen dengan model fisik terkait pengaruh koefisien kekasaran terhadap aliran. Semuanya menjelaskan resistensi dengan koefisien kekasaran tunggal, dan masalah utama adalah perbedaan koefisien kekasaran yang diprediksi dengan hasil pengukuran eksperimen pada model fisik tentu akan memberikan nilai koefisien kekasaran yang berbeda antara pengukuran dan estimasi, sehingga diperlukan analisa persentase tingkat kesalahan antara data pengukuran pada uji model fisik dengan data hasil estimasi khusus koefisien kekasaran. Studi ini dilakukan dengan metode uji statistik besarnya tingkat error pada data koefisien kekasaran terukur di model fisik dengan analisa data koefisien kekasaran dari hasil pendekatan estimasi koefisien kekasaran dari literatur-literatur yang melakukan eksperimen dalam penggunaan elemen kekasaran dasar saluran di model fisik. Hasil analisis dari eksperimen koefisien kekasaran pada model fisik dengan hasil estimasi terjadi error rata-rata dari *running 4* literatur mencapai 22,1%, secara garis besar semua analisis menunjukkan error di *range* $\pm 20\%$ sampai $\pm 30\%$, selain itu *Fr* dan U/U^* juga memiliki pengaruh terhadap penurunan koefisien kekasaran pada saluran terbuka.

Kata kunci: Koefisien kekasaran, Manning, model fisik, saluran terbuka

Abstract

*The flow of water in an open channel is greatly influenced by the surface shape of the channel. A rough surface will give a large energy loss because it has a large resistance value and with a smooth surface shape, the energy loss is quite small. Many researchers have conducted experiments with physical models regarding the effect of the roughness coefficient on flow. All of them explain resistance with a single roughness coefficient, and the main problem is that the difference between the predicted roughness coefficient and the experimental measurement results on the physical model will certainly give a different roughness coefficient value between measurement and estimate, so an analysis of the percentage error rate between the measurement data on the physical model test is required. with data resulting from a special estimate of the roughness coefficient. This study was conducted using a statistical test method of the magnitude of the error rate in the measured roughness coefficient in the physical model with the coefficient analysis of the roughness coefficient estimation approach from the literature that conducted experiments in the use of the channel bed roughness elements in the physical model. The results of the analysis of the roughness coefficient experiment on the physical model with the estimation results that the average error of running 4 literature reaches 22.1%, in general all analyzes show errors in the range $\pm 20\%$ to $\pm 30\%$, besides *Fr* and U / U^* also has the effect of decreasing the roughness coefficient in the open channel.*

Keywords: *Roughness coefficient, Manning, physical model, open channel*

PENDAHULUAN

Manajemen pengelolaan sumber daya air baik itu di saluran terbuka ataupun sungai membutuhkan pemahaman tentang proses dan fenomena yang mendasari perilakunya, termasuk hubungan antara debit dan karakteristik hidrolis.

Prediksi kecepatan aliran di saluran maupun di sungai menjadi perhatian banyak ilmuwan dan insinyur. Kedalaman dan kecepatan aliran ditentukan oleh hambatan aliran ataupun nilai koefisien kekasaran, yang secara konvensional dijelaskan dengan persamaan empiris, dalam hal sifat saluran dan karakteristik aliran yang menginduksi gaya hambatan aliran atau kehilangan energi pada aliran pada saluran terbuka. Namun, persamaan-persamaan empiris ini belum tentu akurat dalam memperkirakan koefisien kekasaran untuk beberapa kondisi khususnya kekasaran skala model fisik di laboratorium. Banyak penelitian telah dilakukan untuk mengkaraktisasi skala hambatan aliran dalam kaitannya dengan kedalaman aliran relatif (rasio kedalaman aliran terhadap tinggi elemen kekasaran), y/D_s (y = kedalaman aliran rata-rata, D_s = ukuran karakteristik material dasar saluran) . kedalaman relatif sungai diklasifikasikan ke dalam skala kecil, skala menengah dan skala besar tergantung pada ukuran material dasar D_s dan kondisi aliran (Bathurst, 1978; Thorne dan Zevenbergen, 1985; French, 1985). Kekasaran skala kecil adalah jika rasio kedalaman aliran relatif tenggelam terhadap tinggi elemen kekasaran melebihi rasio 4 (Jordanova dkk, 2004). Kekasaran skala menengah adalah jika rasio kedalaman aliran relatif tenggelam terhadap tinggi elemen kekasaran, terletak antara rasio 1 dan 4 (Jordanova, dkk, 2004). Rezim aliran ini mewakili keadaan aliran di mana pengaruh elemen kekasaran pada hambatan aliran dimanifestasikan sebagai kombinasi dari

kedua elemen gaya gesek. Kekasaran skala besar adalah jika rasio kedalaman aliran dan tinggi elemen kekasaran kurang dari rasio 1 (Jordanova, dkk, 2004). Ketinggian elemen kekasaran berskala besar dikaitkan dengan interaksi yang sangat kompleks antara elemen hambatan kekasaran, pusaran dan loncat hidraulik lokal (Jordanova, dkk, 2004). Dasar sungai alami terdiri dari unsur-unsur kekasaran dengan berbagai ukuran, dan dasar kekasaran harus diwakili oleh ukuran karakteristik tunggal, seperti D_{50} atau D_{84} , dan masalah utama adalah perbedaan koefisien kekasaran yang diprediksi dengan hasil pengukuran eksperimen pada model fisik tentu akan memberikan nilai koefisien kekasaran yang berbeda antara pengukuran dan perhitungan, sehingga diperlukan analisa persentase tingkat kesalahan antara data pengukuran pada uji model fisik dengan data hasil perhitungan khusus koefisien kekasaran.

Studi ini dilakukan dengan metode uji statistik besarnya tingkat eror pada data koefisien kekasaran terukur di model fisik dengan analisa data koefisien kekasaran dari hasil pendekatan estimasi koefisien kekasaran dari literatur-literatur yang melakukan eksperimen dalam penggunaan elemen kekasaran dasar saluran di model fisik yang berbeda-beda yang digunakan dari literatur yaitu antara koefisien kekasaran observasi (*no*) dengan koefisien kekasaran perhitungan (*nc*) dan parameter-parameter yang diuji pada model fisik yang tidak memerlukan efek penskalaan dalam mempengaruhi koefisien kekasaran serta pengaruh rasio kecepatan rata-rata dengan kecepatan gesek juga ditinjau terkait tren korelasinya.

Besarnya hambatan aliran pada saluran dari rumus-rumus aliran seragam. Bentuk persamaan yang mendasari rumus tahanan pada aliran seragam banyak dikembangkan dalam perhitungan koefisien kekasaran,

kecepatan aliran dan debit aliran. Untuk menghitung koefisien kekasaran Manning yang diamati dari persamaan empiris yang paling umum pada saluran terbuka disajikan pada Persamaan (1).

$$Q = \frac{1}{n_c} AR^{2/3} S^{1/2} \quad (1)$$

Dalam hubungan ini, Q adalah debit (m^3/s), n_c adalah koefisien kekasaran Manning, R adalah jari-jari hidrolis (m) dan A adalah luas penampang basah (m^2). Nilai yang diamati dari n_{co} dengan menggunakan debit yang sesuai dan kemiringan saluran (S), estimasi nilai Manning dapat di analisis dari parameter hidrolis pada Persamaan (2), sedangkan untuk estimasi koefisien kekasaran Manning berdasarkan parameter ketinggian kekasaran (k_s) diberikan pada Persamaan (3) dan estimasi koefisien kekasaran Manning berdasarkan elemen kerapatan vegetasi dapat di hitung dengan Persamaan (4).

$$n_c = \frac{A^{5/3} S^{1/2}}{QP^{2/3}} \quad (2)$$

$$n_c = \frac{k_s^{1/6}}{7,7g^{1/2}} \quad (3)$$

$$n_c = 0,006Fr^{-0,234} \left(\frac{U}{U^*}\right) S^{-0,717} D^{0,035} \quad (4)$$

Dimana P adalah keliling basah (m), Fr adalah *Froude Number*, $Fr = \frac{U}{\sqrt{gh}}$, U adalah kecepatan rata-rata aliran (m/s), $U^* = \sqrt{gRS}$ adalah kecepatan gesek (m/s) dan D adalah persentase kerapatan vegetasi. Selanjutnya estimasi koefisien Manning yang dihitung berdasarkan pada persamaan (2) sampai Persamaan (4) dianalisis dari *software excel* atau dan juga untuk analisis statistik serta manajemen data. Dalam perhitungan ini koefisien kekasaran Manning sebagai fungsi dari parameter yang efektif dalam setiap percobaan ditetapkan. Proses perhitungan tingkat eror pada koefisien kekasaran yang diamati dan yang diperkirakan pada model

fisik dapat di evaluasi akurasi pada model fisik dan menghitung nilai eror digunakan uji statistik *Mean Error Relative* (MER) dan *Root Mean Square Error* (RMSE) masing-masing menggunakan Persamaan. (5) dan (6),

$$MER = \frac{\sum_i^n \frac{|O-C|}{O}}{n} \quad (5)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_i^n (C_i^2 - O_i^2)^2}{n}} \quad (6)$$

dimana C dan O mewakili data yang dihitung dan diamati masing-masing, $i = 1, 2, 3, \dots$ dan n adalah jumlah data.

METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini melakukan evaluasi estimasi nilai koefisien kekasaran Manning dengan menggunakan Persamaan (2) sampai Persamaan (4) sesuai dengan karakteristik parameter pada eksperimen model fisik dari literatur, kemudian dilakukan evaluasi tingkat penyimpangan data (eror) hasil estimasi koefisien kekasaran dengan data hasil pengukuran koefisien kekasaran pada model fisik dilaboratorium dengan menggunakan Persamaan (5) dan Persamaan (6). Data literatur model fisik menggunakan *flume* dari data penelitian Mashau (2006) Percobaan dilakukan di laboratorium hidrolika di Universitas Witwatersrand. Sebuah *flume* ber dinding kaca persegi panjang dengan panjang 10 m dan lebar 0,38 m digunakan untuk membuat model saluran dengan Kemiringan *flume* adalah 0,0047. Variabel lain dipertahankan secara konstan dalam percobaan laboratorium untuk menentukan pengaruh satu variabel. Kekasaran dari *flume* (kekasaran lapisan), bentuk penampang, dan kemiringan dari *flume* dijaga konstan untuk serangkaian percobaan tertentu. Elemen kekasaran (*hemispherical*) dengan bentuk yang sama dengan ukuran berbeda dipilih untuk mewakili batuan di sungai (prototip).

Elemen kekasaran ini terbuat dari beton dengan diameter 112 mm, 72 mm dan 46 mm.

Data penelitian Recking, dkk (2008) pengaturan eksperimental terdiri dari *flume* miring sepanjang 10 m, lebar 0,05 hingga 0,25 m dengan kemiringan bervariasi dari 0 hingga 10% . Laju aliran di saluran masuk diukur dengan dua pengukur aliran elektromagnetik: yang pertama memberikan pengukuran aliran antara 0,3 dan 2,5 liter/s dengan akurasi 0,5% dan yang kedua memberikan pengukuran aliran antara 2 dan 80 liter/s dengan akurasi 0,5%. Sistem pengumpulan sedimen dikembangkan secara khusus dengan menggunakan tangki pengumpulan dan ban berjalan yang kecepatannya memungkinkan untuk mengontrol debit masukan sedimen perangkat takometer, khusus memastikan kecepatan yang konstan. Perangkat ini telah diuji dan memberikan debit sedimen yang stabil bahkan untuk nilai yang sangat rendah Recking, dkk (2004)

Data penelitian Webb, dkk (2010) menggunakan dua model dasar saluran tetap, dibuat di laboratorium dengan ukuran yang berbeda untuk mengevaluasi penskalaan kekasaran hidrolis. Sebuah *flume* selebar

1,219 m digunakan untuk *prototipe* dan *flume* 0,305 m digunakan untuk model. Kesamaan geometri dipertahankan dari *prototipe* ke model. Ini termasuk dimensi elemen kekasaran serta jarak antar elemen. Jarak dimasukkan karena menunjukkan bagaimana koefisien kekasaran hidrolis berubah jika jarak antar strip kekasaran buatan divariasikan (Knight,1979). Hasil percobaan tersebut menunjukkan validitas dan ketidakpastian. Eksperimen ini juga menyediakan metode untuk menentukan koefisien kekasaran versus bilangan Reynolds untuk bahan laboratorium yang akan digunakan dalam model .

Data penelitian Shafaei, dkk (2019) pembuatan model fisik dalam *flume* dengan panjang 7 m, lebar 0,25 m dan tinggi 0,25 m. Dasar *flume* diisi menggunakan sedimen seragam dengan median butiran diameter 1,9 mm, koefisien variasi 1,4 mm dan tebal 0,4 m, koefisien kekasaran variasi kemiringan 0,2% , 0,4% & 0,6% Running debit 4 Ltr/s, 6 Ltr/s dan 8 Ltr/s persentase kerapatan vegetasi yang diteliti 0%, 12%, 25% dan 50% dan simulasi penutup streambed menggunakan vegetasi semak belukar buatan. Data-data dari literatur di sajikan pada Tabel 1.

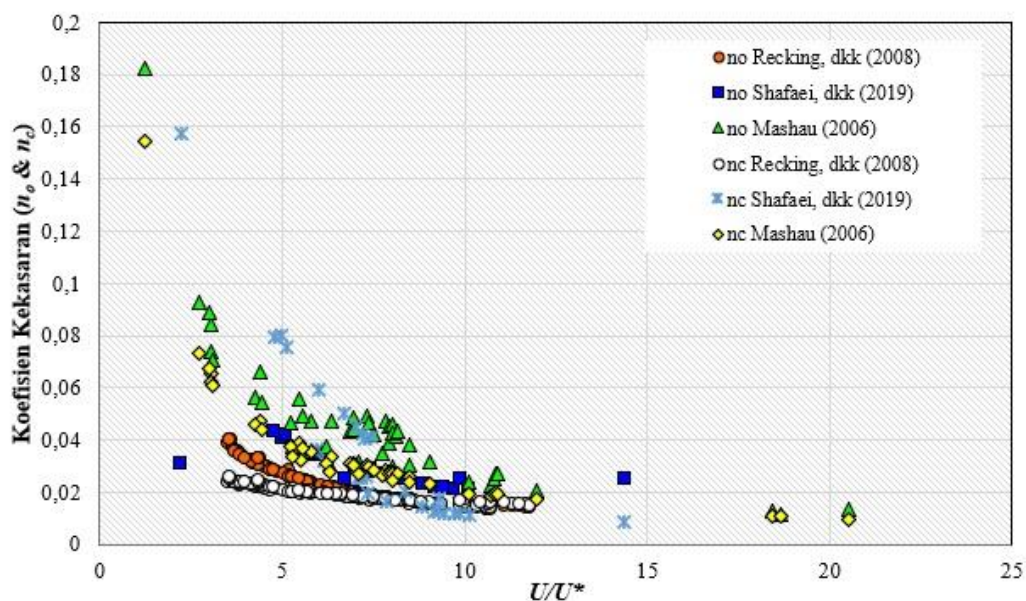
Tabel 1. Data Eksperimen dari Literatur dalam Analisis Penelitian Ini.

No	Sumber	Konsep	S	D ₅₀ (m)	Q (m ³ /s)	n _o	n _c	Jumlah Data
1	Penelitian ini Running data Recking, dkk (2008)	No bedload & bedload	0,01- 0,09	0,0023 - 0,0125	0,0003 - 0,08	0,013 - 0,040	0,014 - 0,026	143
2	Penelitian ini Running data Mashau (2006)	No bedload & drag of hemispheres	0,0012 - 0,0050	0,046 - 0,112	> 0,0243	0,012 - 0,183	0,010 - 0,155	46
3	Shafaei, dkk (2019)	Kerapatan Vegetasi	0,002	0,0019	0,004 - 0,008	0,019 - 0,043	0,009 - 0,157	27
4	Webb, dkk (2010)	No bedload	0,0358 - 0,0515	tak teridentifikasi	0,0142 - 0,637	0,010 - 0,074	0,025 - 0,066	17

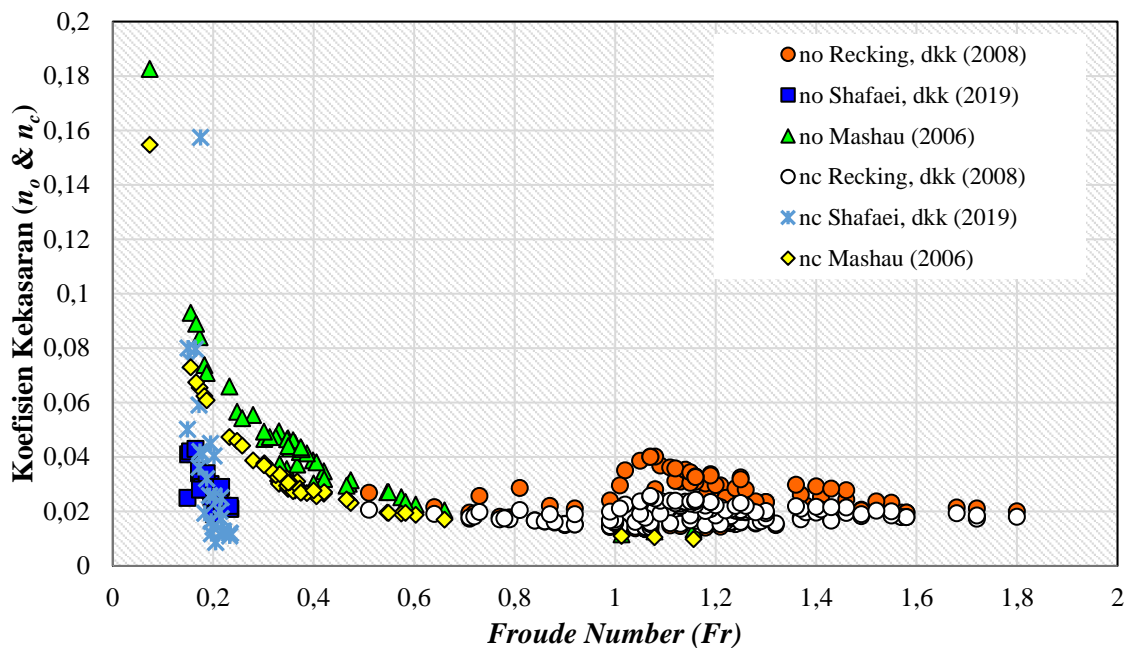
HASIL DAN PEMBAHASAN

Parameter hidrolis sangat berpengaruh terhadap sensitivitas nilai koefisien kekasaran, tinjauan untuk mengetahui tren ketergantungan koefisien kekasaran terhadap variabel yang berbeda, tinjauan dalam analisis sensitivitas dilakukan dengan menggunakan data hasil eksperimen model fisik yang dilakukan oleh Recking, dkk (2008), Masahau (2006) dan Shafaei, dkk (2019). Contoh hasil analisis disajikan pada Gambar 1 dan Gambar 2. Gambar 1 menunjukkan koefisien kekasaran Manning versus kecepatan rata-rata terhadap kecepatan geser dalam kondisi yang berbeda dan variasi koefisien kekasaran dengan nilai Fr ditampilkan di Gambar 2. Gambar 1 menunjukkan bahwa dengan meningkatnya rasio U/U^* maka nilai koefisien kekasaran memiliki tren menurun. Penurunan ini menurun dengan meningkatnya nilai kekasaran dasar saluran dari eksperimen Recking, dkk (2008) baik dengan adanya *bedload* dan tanpa *bedload*, sedangkan eksperimen Masahau (2006) dengan dasar saluran tetap (tidak bergerak) menunjukkan

tren yang sama antara koefisien kekasaran observasi dengan koefisien kekasaran perhitungan, sedangkan seiring meningkatnya kerapatan vegetasi dalam eksperimen Shafaei, dkk (2019) juga akan meningkatkan kekasaran dasar saluran. Variasi terbesar ada di kondisi non-vegetasi dan seperti yang diharapkan, koefisien Manning meningkat dengan meningkatnya kerapatan vegetasi. Faktanya, Variasi koefisien Manning dengan keberadaan vegetasi lebih rapat dari kondisi non-vegetasi memberikan hasil yang berbeda terkait peningkatan kekasaran Hasil eksperimen model fisik koefisien kekasaran dengan rasio pada kecepatan rata-rata dengan kecepatan gesek memiliki tren yang sama bahwa pengaruh rasio U/U^* semakin besar maka nilai koefisien kekasaran semakin menurun dan sebaliknya, rasio U/U^* atau kecepatan bilangan tak berdimensi cukup memberikan tren hasil yang respentatif tidak adanya pengaruh data secara acak akibat dari efek eksperimen model fisik maupun lapangan yang telah banyak dipublikasikan dalam literatur-literatur jurnal dan buku.



Gambar 1. Variasi Koefisien Kekasaran dengan Rasio Kecepatan Rata-Rata terhadap Kecepatan Geser.



Gambar 2. Variasi Koefisien Kekasaran dengan *Froude Number*

Gambar 2 mendeskripsikan hasil *running* dari 4 penelitian model fisik baik data dari nilai koefisien kekasaran hasil eksperimen maupun hasil estimasi menunjukkan jika nilai $Fr > 1$ pada kondisi aliran superkritis peningkatan nilai koefisien kekasaran tidak begitu signifikan, sedangkan jika nilai $Fr < 1$ pada kondisi aliran subkritis nilai koefisien kekasaran meningkat tajam, hasil analisis tersebut pengaruh nilai *Froude Number* (Fr) memiliki pengaruh terhadap nilai koefisien kekasaran dan pada Gambar 2 juga menunjukkan bahwa dengan bertambahnya Fr maka koefisien kekasaran berkurang, pada data eksperimen Shafaei, dkk (2019) menunjukkan penurunan ini merupakan penurunan karena pada eksperimen Shafaei, (2019) memiliki tren yang sama antara pengujian pada model fisik (n_o) dan perhitungan koefisien kekasaran (n_c) dengan meninjau kerapatan vegetasi yang meningkat sehingga variasi koefisien kekasaran juga meningkat sebaliknya mencapai nilai minimumnya di kondisi tanpa vegetasi, hasil percobaan model fisik dengan perhitungan memiliki tren yang sama dalam mereseptasikan koefisien kekasaran dengan

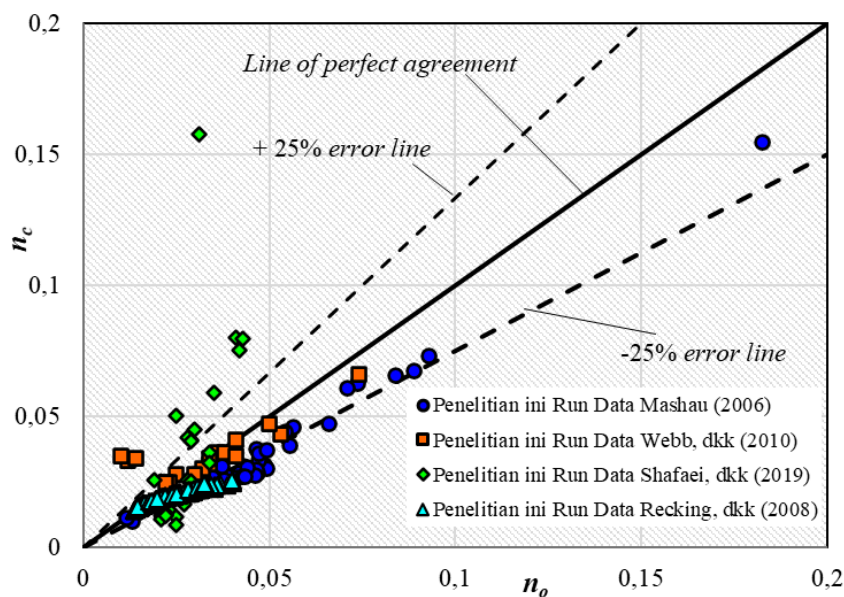
Fr , sehingga parameter Fr tidak berpengaruh pada model fisik. Sedangkan eksperimen model fisik Recking, dkk (2008) memberikan hasil yang berbeda yaitu nilai koefisien kekasaran pada hasil perhitungan (n_c) ada data tidak signifikan mengikuti tren semakin besar nilai koefisien kekasaran maka nilai Fr semakin kecil, sedangkan pada model fisik nilai n_o sebagian data mereseptasikan tren nilai manning semakin menurun seiring adanya peningkatan nilai Fr , hasil eksperimen model fisik pada *flume* yang dilakukan Recking, dkk (2008) bahwa model fisik dengan parameter Fr memiliki pengaruh terhadap hasil yang cukup baik pada koefisien kekasaran n_o dibandingkan dengan hasil perhitungan pada koefisien kekasaran n_c .

Sementara itu, seperti yang diharapkan pada eksperimen model fisik Mashau (2006) dengan meningkatnya nilai Fr maka nilai koefisien kekasaran semakin menurun baik pada uji model fisik maupun hasil perhitungan memberikan tren yang sama, sehingga efek dari model fisik dengan parameter Fr tidak memiliki pengaruh.

Dari ketiga hasil penelitian model fisik yang dilakukan oleh tiga peneliti menun-

jukkan bahwa dalam uji model fisik tidak memiliki efek signifikan terkait tren Fr dengan koefisien kekasaran dalam uji model fisik, sehingga penskalaan nilai Fr dalam uji model fisik tidak diperlukan jika range nilai Fr tidak begitu ekstrim dengan nilai $Fr > 1$ pada kondisi aliran superkritis peningkatan nilai koefisien kekasaran tidak begitu signifikan, sedangkan jika range nilai Fr dalam kondisi ekstrim nilai $Fr < 1$ pada kondisi aliran subkritis nilai koefisien kekasaran meningkat tajam perlu dilakukan analisa lebih teliti terkait efek penskalaan dalam pada uji model fisik. Gambar 3 menunjukkan perbandingan antara koefisien kekasaran yang dievaluasi dengan uji statistik untuk kondisi data eksperimen yang berbeda dengan hasil perhitungan. Koefisien korelasi dari Mashau (2006) didapatkan nilai $R^2 = 0,968$, $MER = 0,245$, dan $RMSE = 0,0018$, untuk koefisien korelasi dari Webb, dkk (2010) didapatkan nilai $R^2 = 0,648$, $MER = -0,310$, dan $RMSE = 0,0006$, untuk koefisien korelasi dari Shafaei, dkk (2019) didapatkan nilai $R^2 = 0,417$, $MER = -0,202$, dan $RMSE = 0,0049$ dan untuk koefisien korelasi dari Recking, dkk (2008) didapatkan nilai $R^2 =$

0,959, $MER = 0,126$, dan $RMSE = 0,0003$. Nilai-nilai rata-rata semua dari hasil running sebesar 22,1% dan semua hasil perbandingan paling sesuai pada garis eror $\pm 25\%$. Hasil pengukuran koefisien kekasaran pada model fisik dengan hasil perhitungan koefisien kekasaran pada penelitian ini memberikan tingkat kesalahan mencapai $\pm 20\%$ sampai $\pm 30\%$, khusus untuk eksperimen model kekasaran pada skala model dari penelitian Webb, dkk (2019) dengan membandingkan eksperimen menggunakan lebar *flume* 1,219 m untuk prototip dan 0,305 lebar *flume* untuk penggunaan model dengan *running* debit diukur hingga $\pm 0,25\%$ tingkat akurasi dan semua elemen kekasaran dengan skala 1 : 4 memberikan hasil tingkat kesalahan rata-rata mencapai $\pm 31\%$. Jika model tidak dapat dioperasikan dalam rezim aliran kasar sepenuhnya, maka skala model baru harus dipilih atau kemiringan model harus terdistorsi. Selain itu, jika prototip tidak beroperasi dalam kondisi aliran kasar sepenuhnya, metode penskalaan kekasaran tidak berlaku.



Gambar 3. Perbandingan antara Koefisien Kekasaran Observasi (N_o) pada Model Fisik dan Koefisien Kekasaran Perhitungan (N_c).

SIMPULAN

Rasio U/U^* memiliki pengaruh terhadap koefisien kekasaran baik hasil eksperimen model fisik dari parameter hidraulik maupun hasil estimasi koefisien kekasaran dengan persamaan empiris, yaitu semakin besar nilai Rasio U/U^* maka semakin kecil nilai koefisien kekasaran dan sebaliknya.

Froude Number (Fr) memiliki efek dalam mengurangi koefisien kekasaran baik penggunaan data pengukuran model fisik dan hasil estimasi, secara spesifik hasil *running* dari penelitian model fisik baik data dari nilai koefisien kekasaran hasil eksperimen maupun hasil estimasi menunjukkan jika nilai $Fr > 1$ pada kondisi aliran superkritis peningkatan nilai koefisien kekasaran tidak begitu signifikan, sedangkan jika nilai $Fr < 1$ pada kondisi aliran subkritis nilai koefisien kekasaran meningkat tajam.

Hasil evaluasi eksperimen koefisien kekasaran pada model fisik dengan hasil estimasi koefisien kekasaran terjadi tingkat kesalahan rata-rata dari *running* 4 literatur mencapai 22,1%, secara garis besar semua analisis menunjukkan eror di *range* $\pm 20\%$ sampai $\pm 30\%$.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih disampaikan kepada peneliti-peneliti yang telah melaksanakan eksperimen model fisik seperti Mashau (2006) dalam percobaan yang dilakukan di Laboratorium Hidrolika di Witwatersrand University, Recking, dkk (2008) dalam melaksanakan eksperimen model fisik di Laboratorium Mekanika Fluida dan Akustik Lyon, Webb, dkk (2010) melaksanakan eksperimen model fisik di Laboratorium Hidraulika Utah State University dan Shafaei, dkk (2019) dengan eksperimen model fisik di *Soil Conservation and Watershed Management Research Institute (SCWMRI)*, University of Zanjan yang telah memberikan inspirasi di dalam tulisan jurnal-jurnal yang dipublikasikan yang penulis review

sehingga dapat melaksanakan penelitian dari hasil mereview jurnal-jurnal tersebut dan sekaligus melakukan pengembangan analisis terkait evaluasi nilai kekasaran pada eksperimen model fisik yang berjalan dengan baik dan lancar.

DAFTAR PUSTAKA

- Bathurst, J.C., 1978. Flow Resistance of Large-Scale Roughness, *Journal of the Hydraulic Division, ASCE*, Vol. 104(12):1587 – 1603.
- French, R.H., 1985. Open Channel Hydraulics, McGraw-Hill.
- Joranova, A.A., Birkhead, A.L., James, C.S., Kleynhans, C.J., 2004. *Hydraulics for Determination of the Ecological Reserve for Rivers*, WRC Report No. 1174, Pretoria, South Africa.
- Mashau, M.S., 2006. *Flow Resistance In Open Channels With Intermediate Scale Roughness: A research report submitted to the Faculty of Engineering and the Built Environment, University of Witwatersrand, in fulfillment of the degree of Master of Science in Engineering*, Johannesburg.
- Recking, A., Boucinha, V., and Frey, P., 2004. “Experimental study of bed-load grain size sorting near incipient motion on steep slopes.” *River flow*, Napple, 253–258.
- Recking, A., Frey, P., Paquier, A., Belleudy, P., Champagne, J.Y., 2008. Bed-load transport flume experiments on steep slopes. *Journal of Hydraulic Engineering*, 134(9):1302–1310
- Shafaei, H., Amini, A., Shirdeli, A., 2019. Assessing Submerged Vegetation Roughness in Streambed under Clear Water Condition using Physical Modeling. *Water Resources*, Vol 46(3): 377-383
- Thorne, C.R., Zevenbergen, L.W., 1985. Estimating Mean Velocity in Mountain

Rivers, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 111(4): 612 – 624.

Webb, C.B., Barfuss, S.L., Johnson, M.C., 2010. Modelling roughness in scale models. *Journal of Hydraulic Research*, Vol 48(2): 260-264.