

SENSITIVITAS HASIL UJI MODEL FISIK TERHADAP PERBEDAAN PENGUNAAN ANGKA KEKASARAN n -MANNING

Miskar MAINI^{1,2*}, Djoko LEGONO³

¹Program Studi Doktor Teknik Sipil, Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Fakultas Teknik,
Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, Indonesia

²Program Studi Teknik Sipil, Jurusan Teknologi Infrastruktur dan Kewilayahan Institut Teknologi
Sumatera, Lampung Selatan, Indonesia

³Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta,
Indonesia

*Email korespondensi: miskar.maini@mail.ugm.ac.id

[diterima: 2 April 2021, disetujui: 29 Mei 2021]

ABSTRACT

The design of a hydraulic waterwork requires a comprehensive analysis so that a standard means of hydraulic modeling for the design of a hydraulic structure type consisting of a scales hydraulic physical model is fundamental. The main boundry of experimental techniques on physical models is the scale effect due to the impossibility of equating all force ratios in prototypes and models, especially in n -Manning roughness modeling in open channels. For simulate the physical model of n -Manning roughness modeling in the hydraulic model scale, of course, validation must be carried out regarding various aspects of the flow carried out in the physical model test, the prototype scale is simulated, and the scale effect is checked. The aim of this study is to represent the n -Manning roughness accurately from prototype to model scale. The purpose of this study was to analyze the sensitivity obtained from the scaling effect of the n -Manning roughness value on the physical model. The average value of using the n -Manning roughness scale model obtained from the model test is 27.27%, this result is very different from the expected value of using the model scale planned with a scale of 25%, so there is a deviation of the average sensitivity with a percentage of up to 2.27%. While the results of the expected n -Manning value obtained an average percentage value of 20.75%. The results of the n -Manning correlation analysis showed that the value of $R_2 = 0.648$, $MER = -31.5$, and $RMSE = 0.0006$. All use of n -Manning roughness elements made on a 25% scale of the prototype gave an average error rate of $\pm 31\%$.

Keywords: Sensitivity, n -Manning, Roughness Model, Physical Model

INTISARI

Perencanaan bangunan hidraulik membutuhkan analisis yang komprehensif sehingga sarana standar pemodelan hidraulik untuk desain jenis struktur hidraulik terdiri dari model fisik hidraulik berskala sangat diperlukan. Batasan utama dari teknik eksperimental pada model fisik adalah efek skala yang terkait disebabkan oleh ketidakmungkinan untuk menyamakan semua rasio gaya dalam prototip dan model, terutama dalam pemodelan kekasaran n -Manning di saluran terbuka. Untuk mensimulasikan model fisik dari pemodelan kekasaran n -Manning di skala model hidraulik tentu harus dilakukan validasi terkait berbagai aspek aliran yang dilakukan dalam uji model fisik, skala prototip disimulasikan, dan efek skala diperiksa. Tujuan penelitian ini untuk menganalisa sensitivitas yang didapat dari efek penskalaan nilai kekasaran n -Manning pada model fisik. Nilai rata-rata penggunaan skala model kekasaran n -Manning yang didapatkan dari tes model sebesar 27,27%, hasil ini sangat berbeda dari nilai ekpektasi penggunaan skala model yang direncanakan dengan skala 25%, sehingga terjadi deviasi sensitivitas rata-rata dengan persentase mencapai 2,27%. Sedangkan hasil nilai n -Manning ekspektasi didapatkan nilai rata-rata persentase sebesar 20,75%. Hasil analisis korelasi nilai n -Manning didapatkan nilai $R_2 = 0,648$, $MER = -31,5$, dan $RMSE = 0,0006$. Semua penggunaan elemen kekasaran n -Manning yang dibuat dengan skala 25% dari Prototip memberikan tingkat kesalahan rata-rata mencapai $\pm 31\%$.

Kata Kunci: Sensitivitas, n -Manning, Model Kekasaran, Model Fisik

PENDAHULUAN

Perencanaan bangunan hidraulik membutuhkan analisis yang komprehensif sehingga sarana standar pemodelan hidraulik untuk desain jenis struktur hidraulik terdiri dari model fisik hidraulik berskala sangat diperlukan. Batasan utama dari teknik eksperimental pada model fisik ini adalah efek skala yang terkait yang disebabkan oleh ketidakmungkinan untuk menyamakan semua rasio gaya dalam prototip dan model, terutama dalam pemodelan kekasaran di saluran terbuka yang tentu akan banyak dipengaruhi oleh banyak parameter, baik itu kekasaran dasar saluran maupun kekasaran dinding saluran serta bentuk penampang saluran juga akan memberikan efek dalam uji model fisik. Tujuan dari pemodelan fisik ditujukan untuk mengetahui suatu kondisi hidraulik suatu infrastruktur alami ataupun buatan, secara makro (garis besar) ataupun detail. Skala model fisik hidraulik dilakukan dengan menirukan (geometri dan perilaku aliran) kondisi riil lapangan yang dianalisis melalui pemodelan dengan menggunakan kaidah-kaidah pengetahuan pemodelan hidraulik seperti kesebangunan model fisik.

Kesebangunan secara kaidah persamaan, pendekatan ini terdiri dari penggunaan beberapa persamaan yang merepresentasikan gaya-gaya di fenomena fisik baik yang bekerja di model maupun di prototip, misalnya persamaan Navier-Stokes. Persamaan-persamaan ini apabila dinyatakan dalam bentuk tanpa dimensi akan mempunyai kemiripan antara di model dan di prototip. Namun demikian harus diperhatikan kondisi batas pada perlakuan model fisik, sehingga efek skala dapat diminimasi (Heller, 2011).

Kesebangunan secara kaidah kalibrasi, pendekatan model kesebangunan ini hanya akan bagus kalau tersedia informasi proses-proses di prototip diketahui. Pendekatan ini dilakukan dengan memodifikasi model secara *trial and error* sehingga keluaran model mendekati proses di prototip. Pada umumnya akan mempunyai kesesuaian yang tinggi antara parameter di model dan

di prototip, dengan demikian akan mengurangi efek skala (Heller, 2011). Metode pendekatan ini akan sesuai untuk memodelkan fenomena kompleks yang dipengaruhi oleh banyak variabel yang dengan Analisa dimensi sulit dimengerti/dipahami (Hughes, 1993).

Kesebangunan secara kaidah skala model, pendekatan dengan metode pembangunan model dengan berbagai skala model (minimum tiga skala) merupakan langkah ideal untuk memahami sesuatu perilaku hidraulik. Skala model yang terbesar digunakan sebagai referensi (dianggap mempunyai perilaku yang paling benar), dan kemudian hasil pengamatan untuk dua model yang lain dibandingkan dengan nilai parameter di model referensi. Metode ini sangat memudahkan dalam mengevaluasi besarnya efek skala namun memerlukan usaha eksperimen yang tinggi. Prosedur ini sudah barang tentu akan bermanfaat untuk menentukan kriteria batas untuk meminimalisir efek skala. Heller (2007), bekerja dengan 7 model.

Kesebangunan secara kaidah analisis dimensi, terdapat berbagai parameter aliran yang menjadi objek ketertarikan peneliti hidraulik, antara lain kecepatan aliran, rapat massa, gaya yang bekerja, tekanan, dll. Secara fundamental berbagai parameter aliran tersebut dapat di direduksi menjadi parameter yang dependen terhadap ukuran: Panjang (L), waktu (T), dan massa (M), disebut fundamental entities (Yalin, 1989). Sehingga semua nilai parameter fisik dapat dinyatakan sebagai kombinasi dari beberapa satuan dasar (fundamental units).

Selama uji model, *hydraulic jump* tidak terbentuk di *stilling basin* seperti yang diharapkan, dan akan mengakibatkan kecepatan yang sangat tinggi di hilir saluran jika kekasaran di hilir tidak disimulasikan dengan benar (Barfuss, 2008).

Proses untuk mengevaluasi kekasaran dan perancangan model fisik hidraulik tersebar di berbagai sumber dan ada mengesampingkan beberapa detail penting dalam eksperimen model fisik. Webb et al (2010) memberikan skema yang

menguraikan seluruh proses seperti yang didefinisikan oleh berbagai masing-masing praktek pemodelan dan sumber referensi penelitian-penelitian terkait dengan model fisik. Detail yang dikesampingkan termasuk validasi persamaan yang digunakan untuk skala n -Manning dari prototip ke model serta prosedur untuk membuat bagan angka n versus Reynolds dari bahan Manning yang digunakan sebagai model kekasaran pada model dasar tetap (*fixed-bed*).

Leopardi (2004) mengemukakan menggunakan persamaan resistensi dari penelitian yang didapatkan oleh Marchi (1961) yang memperhitungkan bentuk penampang (*cross section*). Chanson (1994) membandingkan disipasi energi dari pusaran di *stepped spillways* ke pusaran yang terbentuk di belakang kekasaran buatan model *strip*. Pembentukan pusaran atau pusaran di bagian belakang *strip* kekasaran juga bisa menyebabkan kesalahan dan sensitivitas pada hasil saat ini.

Untuk setiap uji aliran seragam harus ditargetkan untuk mencegah potensi kesalahan ataupun sensitivitas yang terkait dengan penggunaan persamaan Manning untuk aliran kondisi selain seragam. Debit dan profil permukaan air harus diukur dan dicatat. Manning kemudian dihitung seperti hasil dari penelitian yang dilakukan oleh USACE (1993). Setelah nilai Manning ditemukan, uji coba harus diperiksa kembali untuk memastikan bahwa aliran bekerja dalam rezim aliran kasar sepenuhnya seperti dikemukakan oleh USACE (1994).

Kekasaran skala kecil adalah jika rasio kedalaman aliran relatif tenggelam terhadap tinggi elemen kekasaran melebihi rasio 4 (Jordanova et al, 2004). Kekasaran skala menengah adalah jika rasio kedalaman aliran relatif tenggelam terhadap tinggi elemen kekasaran, terletak antara rasio 1 dan 4 (Jordanova et al, 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 et al, 2004). Ketinggian elemen kekasaran berskala besar dikaitkan dengan interaksi yang sangat kompleks antara elemen hambatan kekasaran, pusaran dan loncat hidraulik lokal (Jordanova et al, 2004).

Untuk mensimulasikan model fisik dari pemodelan kekasaran di skala model hidraulik tentu harus dilakukan validasi terkait berbagai aspek aliran yang dilakukan dalam uji model fisik, skala prototip disimulasikan, dan efek skala diperiksa. Akhirnya, batas untuk meminimalkan efek skala yang diamati dalam berbagai aspek aliran pada saluran terbuka perlu dilakukan. Tujuan penelitian ini untuk menganalisa sensitivitas yang didapat dari efek penskalaan nilai kekasaran n -Manning pada model fisik, dengan fokus pada akurasi dan batasan dari persamaan Manning dengan pengujian uji statistik.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini melakukan review jurnal pada data penelitian Webb et al (2010) dan penelitian yang dilakukan Allen (2014) mengenai penelitian pemodelan kekasaran dalam model skala, pada penelitian yang dilakukan Webb et al (2010) dalam menskalakan kekasaran pada model fisik menggunakan persamaan Froude dan persamaan Manning yang digunakan untuk menghasilkan hubungan yang sesuai antara n -Manning dalam model dan prototip. Untuk persamaan Froude sama dengan rasio kecepatan antara prototip dan model diberikan pada Persamaan (1).

$$\frac{V_p}{V_m} = V_r = \sqrt{g_r L_r} \quad (1)$$

Dimana V_p adalah kecepatan prototip, V_m kecepatan model, V_r rasio kecepatan, g_r rasio percepatan gravitasi antar model dan prototip, dan L_r adalah rasio panjang untuk dimensi linier dalam model dan prototip (ASCE 2000). Rasio kekasaran model dapat diperoleh dari persamaan Manning.

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

$$R = \frac{A}{P} = \frac{Bh}{B + 2h} = \frac{h}{\left(1 + \frac{2h}{B}\right)} \quad (3)$$

$$V_r = \frac{1}{n_r} R_r^{2/3} S_r^{1/2} \quad (4)$$

$$n_r = \frac{R_r^{2/3} S_r^{1/2}}{V_r} \quad (5)$$

Dimana n_r adalah rasio koefisien n Manning, R_r rasio jari-jari hidraulik, dan S_r rasio kemiringan gesekan (USBR 1980). ASCE (1942) pengaturan pada model $S_r = 1$, $g_r = 1$, $R_r = L_r$, lalu gabungkan persamaannya di atas untuk menghasilkan

$$n_r = L_r^{1/6} \quad (6)$$

Deskripsi umum eksperimen nilai n -Manning pada model fisik dari penelitian jurnal yang direview dengan kriteria model dasar tetap (*fixed bed*) dibangun di *flume* dengan ukuran yang berbeda untuk mengevaluasi penskalaan kekasaran hidraulik dengan menggunakan lebar *flume* 1,219 m untuk prototip dan 0,305 lebar *flume* untuk penggunaan model dengan skala 25% dari prototip.



Sumber : Allen, 2014

Gambar 1. Prototip *Flume* Lebar 1,219 m

Berdasarkan penelitian Webb et al (2010) tersebut maka penelitian ini hanya menganalisis sebanyak 17 data aliran untuk

mengetahui seberapa besar sensitivitas dari nilai kekasaran dari penelitian yang direview dengan menggunakan Persamaan (7) sampai Persamaan (8).

Dari data penelitian tersebut dilakukan analisis terkait evaluasi sensitivitas penggunaan skala model kekasaran n -Manning dengan menggunakan Persamaan (7) untuk mengetahui seberapa besar persentase sensitivitas skala kekasaran yang didapatkan dari masing-masing hasil *running* dari data jurnal yang direview yaitu nilai kekasaran n -Manning antara prototip dengan model fisik

$$n_x = \left[\frac{(n_p - n_m)}{n_p} \right] \times 100\% \quad (7)$$

Selanjutnya dilakukan analisis evaluasi tingkat eror nilai kekasaran. Proses perhitungan tingkat eror pada skala koefisien kekasaran hasil *running* di tes model dan yang di estimasi pada model fisik dapat di evaluasi keakurasianya dengan metode uji statistik *Mean Error Relative* (MER) dan *Root Mean Square Error* (RMSE) masing-masing menggunakan Persamaan (8) dan (9).

$$MER = \frac{\sum_i^n \left(\frac{O - C}{O} \right)}{N} \quad (8)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_i^n (C_i^2 - O_i^2)^2}{N}} \quad (9)$$

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

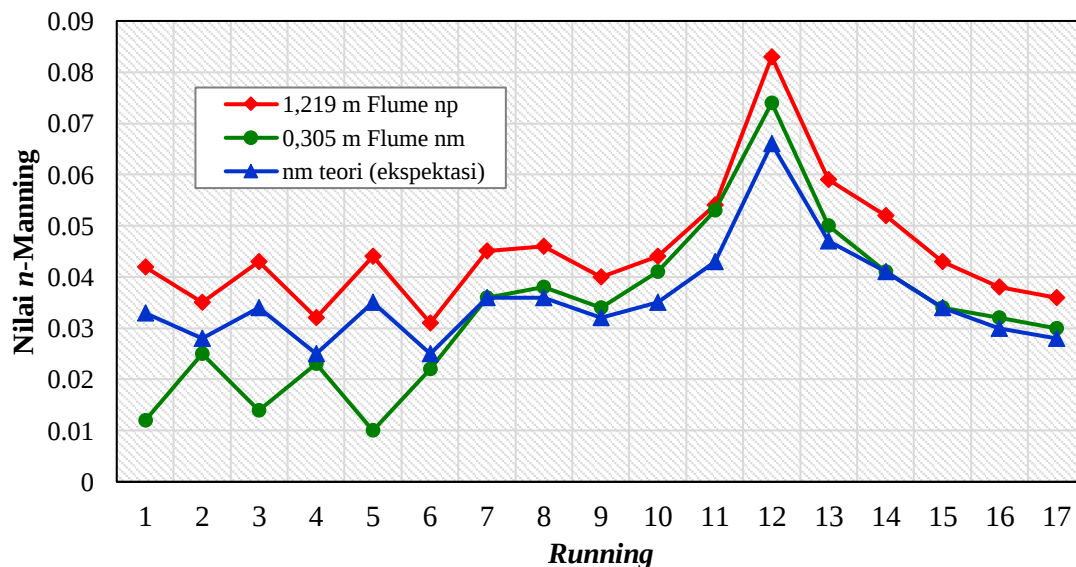
HASIL DAN PEMBAHASAN

Nilai Kekasaran Hasil Eksperimen di Prototip dan Model

Hasil nilai kekasaran yang di dapatkan dari *running* prototip-model sebanyak 17 data dari penelitian Webb et al (2010) ditampilkan pada Tabel 1 dan Gambar 1 perbandingan nilai n -Manning Prototip-Model dan n -Manning ekspektasi dari penskalaan sebesar 25%.

Tabel 1. Perbandingan n -Manning Prototip-Model

Run	Data Webb et al (2010)		Expected n_m dari $n_r=L_r^{1/6}$	MER	RMSE
	1,219 m Flume n_p	0,305 m Flume n_m	n_m		
1	0,042	0,012	0,033	-175,00	$8,93 \times 10^{-7}$
2	0,035	0,025	0,028	-12,00	$2,53 \times 10^{-8}$
3	0,043	0,014	0,034	-142,86	$9,22 \times 10^{-7}$
4	0,032	0,023	0,025	-8,70	$9,22 \times 10^{-9}$
5	0,044	0,01	0,035	-250,00	$1,27 \times 10^{-6}$
6	0,031	0,022	0,025	-13,64	$1,99 \times 10^{-8}$
7	0,045	0,036	0,036	0,00	0,00
8	0,046	0,038	0,036	5,26	$2,19 \times 10^{-8}$
9	0,04	0,034	0,032	5,88	$1,74 \times 10^{-8}$
10	0,044	0,041	0,035	14,63	$2,08 \times 10^{-7}$
11	0,054	0,053	0,043	18,87	$9,22 \times 10^{-7}$
12	0,083	0,074	0,066	10,81	$1,25 \times 10^{-6}$
13	0,059	0,05	0,047	6,00	$8,47 \times 10^{-8}$
14	0,052	0,041	0,041	0,00	0,00
15	0,043	0,034	0,034	0,00	0,00
16	0,038	0,032	0,030	6,25	$1,54 \times 10^{-8}$
17	0,036	0,03	0,028	6,67	$1,35 \times 10^{-8}$
Jumlah				-527,81	$5,67 \times 10^{-6}$
Rata-rata				-31,05	0,0006



Gambar 1. Perbandingan Nilai Manning Prototip-Model

Nilai n -Manning ekspektasi dalam skala 25% dari prototip pada model dibandingkan dengan nilai yang diperoleh dari nilai aktual n -Manning tes model yang disajikan pada Gambar 1. Hasil antara nilai n -Manning model dengan nilai n -Manning prototip terjadi perbedaan yang signifikan. Kemungkinan perbedaan antara n_p dari

flume 1,219 m diskalakan sebesar 25% nilai n_m pada model flume 0,305 m terletak pada pengaruh persamaan Manning. Dimana konsep persamaan Manning yang digunakan dari parameter $2/3$ eksponen jari-jari hidraulik dapat menyebabkan sensitivitas untuk semua data n -Manning, dimana aliran yang beroperasi di model dan

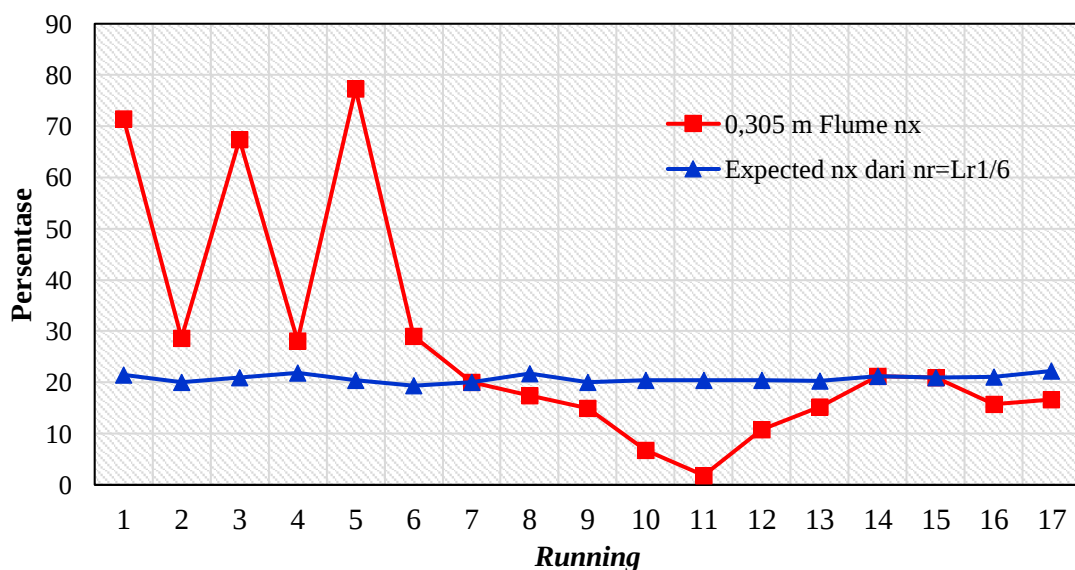
prototip ada pengaruh dari rezim aliran yang kasar. Sensitivitas lain bisa berasal dari bentuk *flume* yang akan mempengaruhi nilai kekasaran n -Manning akibat dari parameter radius jari-jari hidraulik.

Persentase Sensitivitas Penggunaan Skala Kekasaran Antara Tes Model dengan Ekspektasi

Secara ekspektasi penggunaan skala kekasaran pada model tanpa distorsi dimana pada seluruh arah, kecepatan dan percepatan mempunyai perbandingan yang sama terhadap prototip, hasil persentase sensitivitas penggunaan skala nilai kekasaran antara tes model dengan ekspektasi berdasarkan skala 25% pada penelitian ini disajikan pada Tabel 2 dan Gambar 2.

Tabel 2. Perbandingan Persentase Skala Kekasaran Antara Tes Model dengan Persentase Skala Rencana

Run	0,305 m Flume n_x	Expected n_x dari $n_r=Lr^{1/6}$
1	71,43	21,43
2	28,57	20,00
3	67,44	20,93
4	28,13	21,88
5	77,27	20,45
6	29,03	19,35
7	20,00	20,00
8	17,39	21,74
9	15,00	20,00
10	6,82	20,45
11	1,85	20,37
12	10,84	20,48
13	15,25	20,34
14	21,15	21,15
15	20,93	20,93
16	15,79	21,05
17	16,67	22,22
Jumlah	463,57	352,79
Rata-rata	27,27	20,75



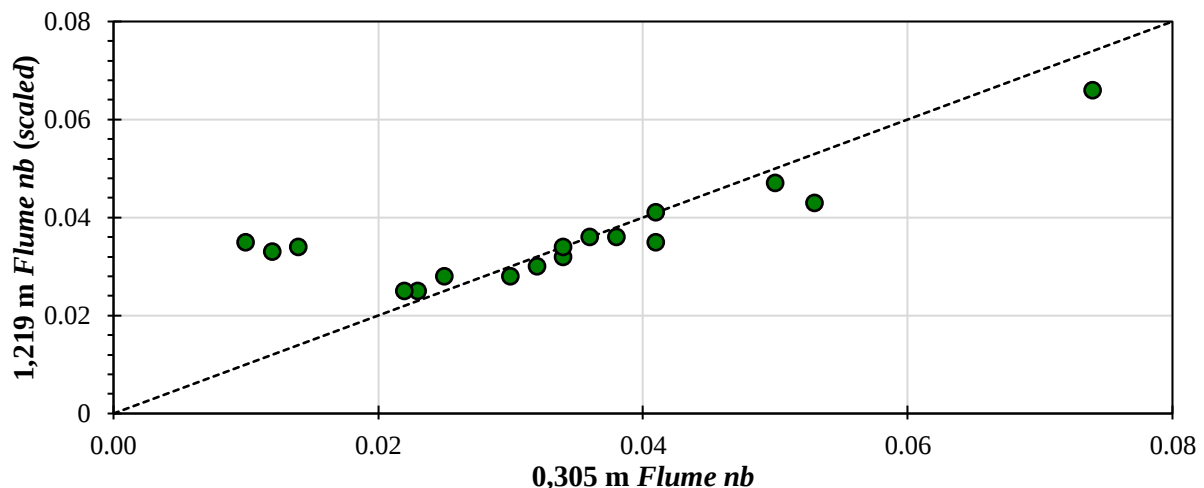
Gambar 2. Perbandingan Presentase Sentivitas Skala Antara Tes Model dengan Ekspektasi

Hasil perhitungan persentase sensitivitas penggunaan skala kekasaran n -Manning dari tes model dengan nilai n -Manning ekspektasi yang disajikan pada Tabel 2 dan Gambar 4 menunjukkan nilai sensitivitas yang fluktuatif cukup besar pada tes model dengan nilai sensitivitas rata-rata skala model kekasaran sebesar 27,27%, hasil ini sangat berbeda dari nilai ekspektasi skala model yang direncanakan dengan skala 25%, sehingga terjadi deviasi sensitivitas rata-rata mencapai 2,27%. Sedangkan hasil nilai n -Manning ekspektasi didapatkan nilai rata-rata persentase sensitivitas skala sebesar 20,75%, dari hasil sensitivitas ekspektasi sebaiknya skala model kekasaran menggunakan skala sebesar 20% untuk mengurangi sensitivitas

pada tes model. Hasil analisis dari evaluasi sensitivitas persentase skala model fisik nilai kekasaran, dapat ditarik kesimpulan bahwa penentuan skala pada model kekasaran n -Manning dapat dilakukan dengan memilih skala yang semakin lebih detail untuk mendapatkan hasil yang sesuai dan untuk mengurangi nilai sensitivitas yang tinggi terhadap penggunaan kekasaran n -Manning.

Nilai Error Rata-Rata Koefisien Kekasaran

Hasil analisis tingkat error rata-rata koefisien kekasaran dari tes model dengan nilai kekasaran ekspektasi disajikan pada Gambar 3 berikut ini.



Sumber : Webb et al (2010)

Gambar 3. Perbandingan antara koefisien kekasaran tes model pada model fisik dan koefisien kekasaran ekspektasi

Gambar 3 menunjukkan perbandingan koefisien kekasaran yang dievaluasi dengan uji statistik untuk kondisi data eksperimen antara prototip dan model didapatkan nilai koefisien korelasi $R_2 = 0,648$, $MER = -31,5$, dan $RMSE = 0,0006$. Hasil pengukuran koefisien kekasaran pada model fisik dengan hasil estimasi pada penelitian ini memberikan tingkat kesalahan rata-rata mencapai $\pm 31\%$. Hasil analisis tingkat penyimpangan tersebut dapat ditarik kesimpulan bahwa jika eksperimen model fisik hidraulik tidak dapat dioperasikan dalam rezim aliran yang kasar sepenuhnya,

maka skala model baru harus dipertimbangkan ulang. Selain itu, jika prototip tidak beroperasi dalam kondisi aliran yang kasar sepenuhnya, metode penskalaan khusus untuk skala kekasaran tidak berlaku.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis dalam penelitian ini, dapat disimpulkan bahwa nilai rata-rata sensitivitas skala penggunaan kekasaran n -Manning dari tes model sebesar 27,27%, hasil ini sangat berbeda dari nilai ekspektasi skala model yang

direncanakan dengan skala 25%, sehingga terjadi deviasi sensitivitas rata-rata mencapai 2,27%.

Sedangkan koefisien korelasi didapatkan dengan nilai $R_2 = 0,648$, $MER = -31,5$, dan $RMSE = 0,0006$. Semua elemen kekasaran n -Manning yang dibuat dengan skala 25% dari prototip memberikan tingkat kesalahan rata-rata mencapai $\pm 31\%$. Jika model fisik hidraulik tidak dapat dioperasikan dalam rezim aliran yang kasar sepenuhnya, maka skala model baru harus dipilih atau jika prototip tidak beroperasi dalam kondisi aliran yang kasar sepenuhnya, maka metode penskalaan khusus untuk kekasaran tidak berlaku.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih disampaikan kepada peneliti yang telah melaksanakan eksperimen model fisik yang dilakukan Allen (2014) dan Webb et al (2010) melaksanakan eksperimen model fisik di Laboratorium Hidraulika Utah State University, yang telah memberikan inspirasi di dalam tulisan jurnal yang dipublikasikan yang penulis review sehingga dapat melaksanakan penelitian dari hasil mereview jurnal hasil penelitian tersebut dan sekaligus melakukan pengembangan analisis evaluasi dari persentase besaran efek penskalaan pemodelan kekasaran pada skala model fisik.

DAFTAR PUSTAKA

Allen, T.G., 2014. *A Study of the Variability Versus the Assumed Constancy of Manning's n*. Doctoral Dissertation, Utah State University, Logan, UT.

ASCE, 1942. *Hydraulic Models*. Manuals of Engineering Practice No. 25. American Society of Civil Engineers, New York.

ASCE, 2000. *Hydraulic Modeling*. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 97. American Society of Civil Engineers, New York.

Barfuss, S.L., 2008. *Model Study of The LL Anderson Dam Spillway Modification*. Utah Water Research Laboratory, Logan, UT.

Bathurst, J.C., 1978. Flow Resistance of Large-Scale Roughness, *Journal of the Hydraulic Division, ASCE*, Vol. 104(12):1587 – 1603.

Chanson, H., 1994. Hydraulics of Skimming Flows Over Stepped Channels And Spillways. *J. Hydraulic Res.* 42(3), 239–245.

French, R.H., 1985. *Open Channel Hydraulics*, McGraw-Hill.

Heller, V., 2011. Scale Effects In Physical Hydraulic Engineering Models, *Journal of Hydraulic Research*, 49(3), pp.293-306.

Heller, V., Hager, W. H. and Minor, H.-E., 2007. Scale Effects In Subaerial Landslide Generated Impulse Waves. *Experiments in Fluids*, 44(5), pp.691-703.

Hughes, S. A., 1993. *Physical models and Laboratory Techniques on Coastal Engineering*. Advanced series on ocean engineering. London: World Scientific.

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.

Knight, D.W., Macdonald, J.A., 1979. Hydraulic Resistance of Artificial Strip Roughness. *J. Hydraulic Div., ASCE*. 105(HY6), 675–690.

Leopardi, M., 2004. On Roughness Similarity Of Hydraulic Models. *J. Hydraulic Res.* 42(3), 239–245.

Marchi, E., 1961. Il Moto Uniforme Delle Correnti Liquide Nei Condotti Chiusi E Aperti. *Energ. Elett.* 38(4), 289–301.

Thorne, C.R., Zevenbergen, L.W., 1985. Estimating Mean Velocity in Mountain Rivers, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 111(4): 612 – 624.

- USACE, 1993. River hydraulics. US Army Corp. of Engineers, EM 1110-2-1416, Dept. of the Army, Washington DC.
- USACE, 1994. Hydraulic design of flood control channels. US Army Corp. of Engineers, EM 1110-2-1601, Dept. of the Army, Washington DC.
- Webb, C.B., Barfuss, S.L., Johnson, M.C., 2010. Modelling roughness in scale models. *Journal of Hydraulic Research*, Vol 48(2): 260-264.
- Yalin, M. S, 1989. *Fundamentals of Hydraulic Physical Modelling. Recent Advances in Hydraulic Physical Modelling*. Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers.