

EFEK SEKUNDER TURBULENSI ALIRAN SUPER KRITIS PADA SALURAN TERBUKA TERHADAP BANGUNAN PERANGKAP SEDIMEN IRIGASI

Muhammad Isnaeni*

Konsultan Perorangan dengan Kepakaran Hidraulika dan Sedimentasi

*m_isnaeni66@live.com

Pemasukan: 27 Juni 2024 Perbaikan: 30 September 2024 Diterima: 22 Desember 2024

Intisari

Pengaruh sekunder pada aliran super kritis dengan bilangan *froude* > 1 , yang mengalir pada dasar saluran di permukaan lining beton memiliki efek sekunder. Efek tersebut menyebabkan timbulnya tonjolan garis kontur dan kecepatan aliran dengan pola bergelombang dari distribusi kecepatan rata-rata yang melintasi penampang. Karakteristik aliran ini dapat dilihat dari alirannya yang cepat dan tidak stabil. Aliran super kritis dapat bertransisi ke aliran sub kritis melalui fenomena lompatan hidraulik yang merugikan debit aliran. Penelitian ini bertujuan untuk memberikan rekomendasi inovasi efisiensi debit terhadap parameter kedalaman aliran optimum pada penampang saluran terbuka *flume* yang digunakan juga sebagai penguras perangkat sedimen di sistem irigasi. Metode penelitian ini menggunakan uji fisik dengan *flume* skala 1:40 dengan skala prototip di laboratorium. Uji fisik ini menghasilkan kecepatan aliran sesaat yang profil terperinci. Selain itu dilakukan pengamatan uji vertikal menggunakan *Acoustic Doppler Velocimeter* (ADV) 16 Mhz untuk memperoleh distribusi kecepatan aliran, intensitas turbulensi, *Reynolds* dan tegangan geser pada seluruh lapisan penampang aliran. Langkah berikutnya adalah melakukan analisis hukum *wake-log* yang dimodifikasi pada dasar dan permukaan aliran. Analisis berikutnya adalah analisis aliran pada *flume* yang dipengaruhi oleh kesetimbangan aliran dalam kurun waktu 5 jam pengaliran untuk mengetahui peningkatan fraksi sedimen lebih stabil per jamnya. Hasil penelitian menunjukkan bahwa rasio lebar (*b*) dan kedalaman aliran (*h*) dapat meningkatkan kekuatan arus sekunder yang signifikan dengan rasio yang *b/h* yang ideal dapat memberikan efisiensi pengaliran debit berdasarkan bilangan *Froude* = 2,2 dan *Reynolds* 2500-2600 dapat diefisiensikan hingga 46% diperlukan *Q*: 1,26 l/s, kecepatan aliran 10,79 cm/s sehingga aliran dalam posisi transisi laminar ke turbulen dan tidak memicu sedimentasi pada penampang basah saluran.

Kata Kunci: Efek Sekunder, *Froude*, *reynolds*, super kritis, turbulensi, perangkat sedimen.

Latar Belakang

Kerusakan tutupan lahan pada DAS Citarum harus segera ditangani karena mengakibatkan akumulasi sedimen, semakin signifikan penurunan kapasitas penampang basar Sungai Citarum akan mengurangi penampang basah sungai dan

berakibat pada pemanfaatan air di hilir sungai (Sudarningsih dkk., 2017). Sekitar 80% lahan pertanian terdegradasi akibat erosi tanah global. Praktik pertanian berkelanjutan sedikit terganggu oleh erosi tanah dan berkurangnya produktivitas tanah pertanian, yang mengakibatkan kerawanan pangan. Pada budidaya lahan, konservasi tanah membutuhkan jenis vegetasi tertentu yang didukung oleh strategi yang efisien untuk mengendalikan kehilangan tanah subur di permukaan. Air yang mengalir di sungai-sungai tersebut juga membawa angkutan sedimen. Dasar sungai tertimbun lumpur jika menerima angkutan sedimen melebihi kapasitas pengangkutannya, dan langkah-langkah efektif tidak diambil untuk pengendaliannya. Hal ini mengakibatkan penurunan kapasitas sungai atau saluran. Kemudian, kemiringan saluran umumnya lebih kecil dari sungai utama sehingga sedimen selalu cenderung tertampung di saluran atau sungai (Isnaeni dkk., 2022).

Untuk menganalisis fenomena ini khususnya untuk saluran terbuka, pengaruh arus turbulensi sekunder pada karakteristik aliran saluran terbuka super kritis pada aspek rasio rendah perlu untuk diteliti sehingga bentuk geometrik dan rasio b/h dari sebuah penampang akibat sedimentasi pada dasar saluran dapat optimal khususnya pada saluran penguras (Balachandar dan Bhuiyan, 2007).

Kebaruan penelitian ini adalah selain analisis numerik dengan persamaan konvensional, dilakukan uji laboratorium pada sebuah *flume* untuk menyelidiki secara eksperimental a) Karakteristik aliran rata-rata dan turbulen, b) gerakan sedimen, dan c) keterkaitannya dengan proses hidro-abrasi pada berbagai kondisi aliran saluran terbuka super kritis yang menyimulasikan aliran dalam *Flume* perangkap sedimen dan *Flume* penguras sedimen. Penelitian ini lebih fokus pada pengaruh arus sekunder pada karakteristik turbulensi aliran saluran terbuka sempit super kritis sangat rasio aspek rendah. Laju angkutan sedimen yang tinggi pada sebuah sungai oleh partikel pada dasar saluran dalam kombinasi kecepatan aliran menyebabkan berkurangnya penampang basah suatu sungai atau saluran (Chiodi dkk., 2014). Hidro-abrasi dan kerusakan karena kavitasi pada struktur hidraulik termasuk komponen bangunan seperti *outlet* bendungan, bendung, atau saluran pembilasan sedimen. Pengembangan model membutuhkan pemahaman yang lebih baik tentang proses fisik karakteristik aliran turbulen super kritis, gerakan partikel, abrasi, dan keterkaitan parameter hidraulik lainnya (Cuthbertson dan Ervine, 2007). Meskipun sejumlah besar penelitian terutama di saluran aluvial, hanya sedikit yang meneliti pada saluran alami dengan dasar batuan yang curam seperti sungai, dan aliran saluran terbuka super kritis dengan rasio lebar (b) dan kedalaman aliran (h) (Lepesqueur dkk., 2019).

Pengetahuan tentang karakteristik aliran super kritis seperti kecepatan rata-rata, turbulensi, tegangan geser dan *Reynolds* sangat penting untuk mengatasi banyak masalah hidraulika seperti angkutan sedimen, proses pengendapan, erosi, hidro-abrasi, dan kavitasi. Nikuradse, 1933 dan *Von Kármán* 1930 telah banyak melakukan kajian komprehensif pada karakteristik rata-rata dan turbulen dari aliran saluran terbuka dengan dan tanpa angkutan sedimen di atas lapisan halus dan kasar (Basse, 2023), studi ini menghasilkan berbagai adaptasi dari distribusi kecepatan *log-law* dasar di pada dasar saluran, dan distribusi kecepatan di wilayah luar diwakili oleh parameter hidraulik. Pada sisi dalam, juga disebut wilayah pengaruh

dari dinding saluran, didefinisikan sebagai $z/h \leq 0,2$ dengan z = jarak dari dasar saluran dan h = kedalaman aliran. Pada lapisan ini, gaya viskositas mendominasi aliran, skala karakteristik kecepatan dan panjang adalah kecepatan gesekan lokal u^* , dan rasio viskositas kenematik terhadap kecepatan gesekan ν/u^* . Pada wilayah luar, gaya inersia mendominasi aliran, karakteristik skala kecepatan dan panjang adalah kecepatan aliran rata-rata maksimum U_{\max} , dan kedalaman aliran h . Distribusi kecepatan di wilayah dinding mengikuti persamaan universal yang disebut *log law* (Manes dkk., 2007), sebagai berikut:

$$U^+ = \frac{1}{k} \ln(z^+) + A, (z^+ > 30) \quad (1)$$

Dengan $U^+ = U/u^*$, U adalah kecepatan aliran rata-rata waktu, $z^+ = zu^*/\nu$, k = konstanta *von Kármán*, A adalah konstanta integral. Konstanta *von Kármán* $k = 0,41$ oleh beberapa peneliti untuk aliran saluran yang stabil, terbuka di atas *smooth bed load*, kasar, terlepas dari angka *Reynolds* dan *Froude*.

Pada lapisan transisi yang kasar pada aliran saluran terbuka diusulkan pergeseran kekasaran permukaan ΔU^+ untuk Persamaan (1). Dalam Persamaan (2), ΔU^+ meningkat dengan meningkatnya kekasaran bilangan *Reynolds* $k_s^+ = k_s U^*/\nu$, dimana k_s = tinggi kekasaran *Nikuradse* pada lapisan pasir. Nilai-nilai kisaran ΔU^+ antara 0 (pada *smooth bed*) dan 7,4 - 7,6 (pada *rough bed*). Untuk transisi dari lapisan permukaan halus *smooth bed* ke kasar *rough bed*, nilai ΔU^+ dilaporkan antara 3,5 dan 6, maka Persamaan (1) ditulis kembali menjadi:

$$U^+ = \frac{1}{k} \ln(z^+) + A - \Delta U^+ \quad (2)$$

Untuk parameter hidraulik yang melalui dasar *smooth bed*, transisi pada *rough-bed*, dan dasar saluran yang kasar (*rough bed*), maka dipergunakan Persamaan (3) atau Persamaan (4). Pada Persamaan (3), nilai B adalah konstanta integral mulai dari 8.5 - 15% untuk dasar saluran yang kasar, dimana fungsi k_s^+ adalah fungsi dari kekasaran dasar saluran.

$$U^+ = \frac{1}{k} \ln\left(\frac{z}{k_s}\right) + B \quad (3)$$

$$U^+ = \frac{1}{k} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (4)$$

$$k_s^+ < 5 \quad z_0 = 0.11 \frac{\nu}{u_*} \quad (\text{untuk parameter hidraulik } \textit{smooth-bed}) \quad (5)$$

$$5 < k_s^+ < 70 \quad z_0 = 0.11 \frac{\nu}{u_*} + 0.033 k_s \quad (\text{untuk transisi dari } \textit{smooth-bed} \text{ ke } \textit{rough-bed}) \quad (6)$$

$$k_s^+ > 70 \quad z_0 = 0.033 k_s \quad (\text{untuk dasar } \textit{rough-bed}) \quad (7)$$

Telah banyak studi sebelumnya yang membahas tentang karakteristik aliran turbulen mencakup berbagai aliran dan kondisinya pada dasar saluran, sebagian besar penelitian terbatas pada bilangan *Froude* yang rendah. Hanya beberapa peneliti yang menyelidiki aliran super kritis dengan $F > 1$ seperti yang ada di saluran curam. Khususnya *Otsuka dkk., 2017* telah meneliti melalui data laboratorium tentang karakteristik turbulensi di saluran terbuka super kritis mengalir dengan fokus pada pengaruh *Froude* hingga 8 dan $2,5 \leq b/h \leq 10,7$. Namun, dampak rasio

aspek yang bahkan lebih rendah hingga 1 pada karakteristik turbulen aliran super kritis yang tinggi (Otsuka dkk., 2017). Oleh karena itu, jelas bahwa pengamatan fisik dan kuantifikasi akurasi pada aliran pada aspek rasio rendah seperti ini menarik dari praktik teknik keairan dan tinjauan mekanika fluida. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dengan laboratorium yang sistematis investigasi menggunakan Micro ADV 16 Mhz, matriks eksperimental mencakup rasio aspek $1 \leq b/h_0 \leq 2$ dan angka *Froude* hingga 4. Karena terjadi turbulensi yang besar dengan angka *Froude* yang tinggi, sehingga sedimen hanya akan berputar dan membutuhkan waktu yang lama untuk ter gelontorkan.

Tujuan dari penelitian ini, untuk dapat merekomendasikan kepada operator Bendung khususnya bangunan utama yang memiliki perangkat sedimen, tinggi aliran (debit yang besar) apalagi harus 120% dari nilai *NFR* (*Nett Field Required*) untuk menguras sedimen pada sebuah bangunan perangkat sedimen tidak selalu dengan debit besar. Rasio b/h dari saluran pembawa ke jaringan irigasi harus ideal, sehingga sedimentasi yang dipicu oleh kerusakan lahan di hulu bangunan dan terbawa di bangunan utama seperti Bendung, dapat diminimalkan dengan rasio saluran yang ideal. Tinggi muka air yang optimum akan mampu memberikan nilai efisiensi waktu dan debit sehingga petani/pengguna air di hilir dapat tetap memanfaatkan air irigasi.

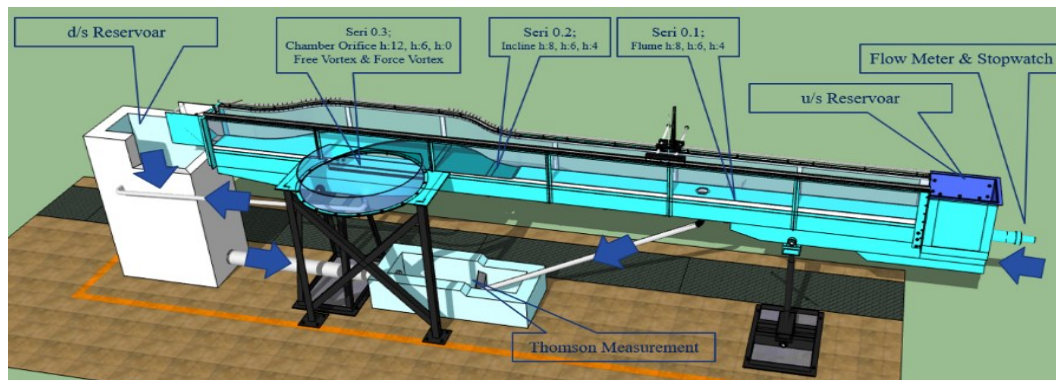
Metodologi Studi

Model Uji Laboratorium

Penggunaan model uji hidraulik untuk keperluan perencanaan bangunan-bangunan air sangat dibutuhkan untuk pengamatan fenomena hidraulik dan pemantapan dan kesempurnaan desain. Dalam pemodelan ini terdapat tiga kegiatan yang saling terkait yaitu: “*Modelling*” (proses membuat model), “*solving*” (proses pemecahan masalah) dan “*interpretation*” (menginterpretasikan atau menjabarkan hasil penelitian dari model ke prototip). Agar penelitian dan pengamatan profil aliran tersebut dapat memberikan hasil yang maksimal maka ketiga kegiatan tersebut di atas harus memenuhi kaidah-kaidah yang benar, artinya harus memenuhi persyaratan-persyaratan tertentu (Huang dkk., 2018). Model uji fisik akan memberikan interpretasi nyata dalam setiap pengamatan untuk membuktikan fenomena fluida, eksperimen ini diawali dengan percobaan laboratorium dengan skala yang tidak terdistorsi dengan keserupaan dan kesebangunan dari prototip pada model fisik dan memenuhi analisis keserupaan geometrik, kenematik dan dinamis.

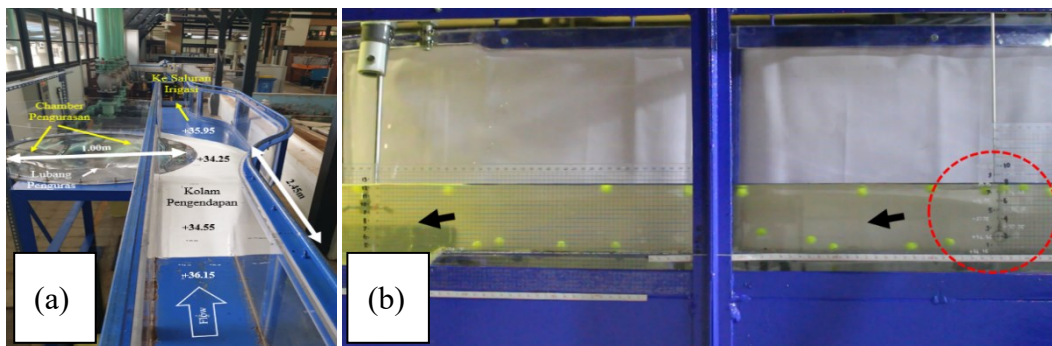
Setelah analisis keserupaan, skala prototip ke model uji diperoleh 1:40, dimensi geometrik pada model uji laboratorium diperoleh dengan dimensi *flume* uji dengan dimensi $b = 0,2$ m, $h_f = 0,5$ m dan panjang *flume* 4,00 m dengan kemiringan dasar $S_b = 1\%$, mewakili bagian lurus dari kolam/saluran pengendapan dan saluran penguras sedimen (lihat Gambar 1). Dasar saluran dengan permukaan plat besi tanpa dihaluskan. Dinding sampingnya terbuat dari bahan akrilik, aliran masuk pipa bertekanan diubah menjadi aliran permukaan bebas ke *flume* dengan sistem aliran seragam dikembangkan di laboratorium. Pipa masuk yang dikendalikan dengan keran dengan *flow meter* memungkinkan untuk menyesuaikan kedalaman aliran pendekatan h_0 . Debit diukur menggunakan pengukur aliran magnetik yang

dipasang ke pipa dengan kesalahan pengukuran $< 0,5\%$. Kedalaman aliran h diukur pada interval 0,5 m di sepanjang *flume*, baik menggunakan pengukur titik dan jarak *Propeller Current Meter Probe H33* dengan akurasi data $< 0,5$ mm (Isnaeni, 2023).

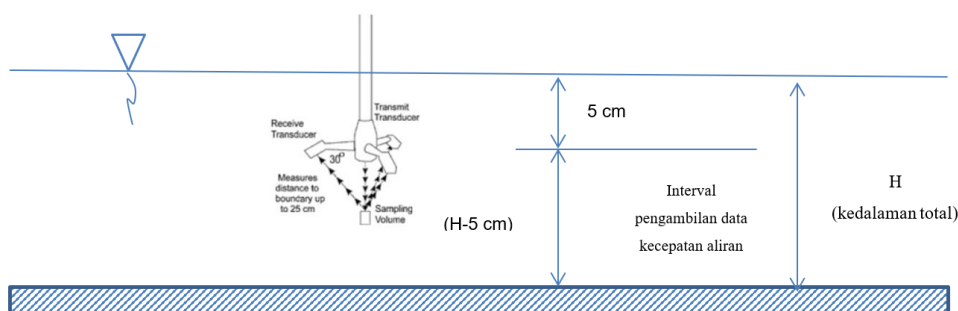


Gambar 1. Tampak *flume* uji keseluruhan

Skema *Propeller Current Meter Probe 33* dapat mengukur kecepatan aliran hingga 1.500 mm /s dengan menghubungkan pembacaan baling – baling ke *Data Logger* yang terhubung dengan Komputer/Laptop. Digunakan 2 unit H-33 *Propeller Current Meter* dalam mengamati kecepatan aliran dan penelitian ini, posisi penempatan alat ini diletakkan tergantung bagian profil mana yang akan diamati. Micro ADV 16 Mhz SonTek 16-MHz Micro ADV (*Acoustic Doppler Velocimeter*) adalah terobosan paling signifikan dalam teknologi pengukur arus 3-sumbu (3D) sejak SonTek ADV lebih baik dibandingkan dengan sistem laser *Micro ADV* bahkan lebih baik (García-Ramos dkk., 2018). Frekuensi akustik yang lebih tinggi yaitu 16 MHz menjadikan Micro ADV instrumen yang optimal untuk pekerjaan laboratorium. Seperti semua instrumen *SonTek*, Micro ADV sangat mudah diatur dan digunakan, sebagian besar pengguna mengambil data berkualitas tinggi dalam beberapa menit setelah menerima sistem. Dengan fitur Pengukuran kecepatan tiga sumbu Sensor dipasang pada batang 25 cm dan laju pengambilan sampel tinggi — hingga 50 Hz Volume sampel kecil — kurang dari 0,1 cm³. Akurasi tinggi 1% dari rentang terukur kisaran kecepatan besar 1 mm/dt hingga 2,5 m/s performa aliran rendah yang luar biasa tidak perlu kalibrasi ulang Perangkat lunak yang komprehensif termasuk Horizon ADV (Isnaeni, 2023).



Gambar 2. Tata letak kolam pengendapan dan saluran penguras pada *flume* uji (a), Penempatan Micro ADV 16 Mhz dan *Propeller Current Meter H33* pada *Flume* uji di Laboratorium (b)



Gambar 3. Cara kerja pembacaan sensor akustik Micro ADV 16 Mhz *downlooking*

Syarat dan Kondisi Pengujian Laboratorium

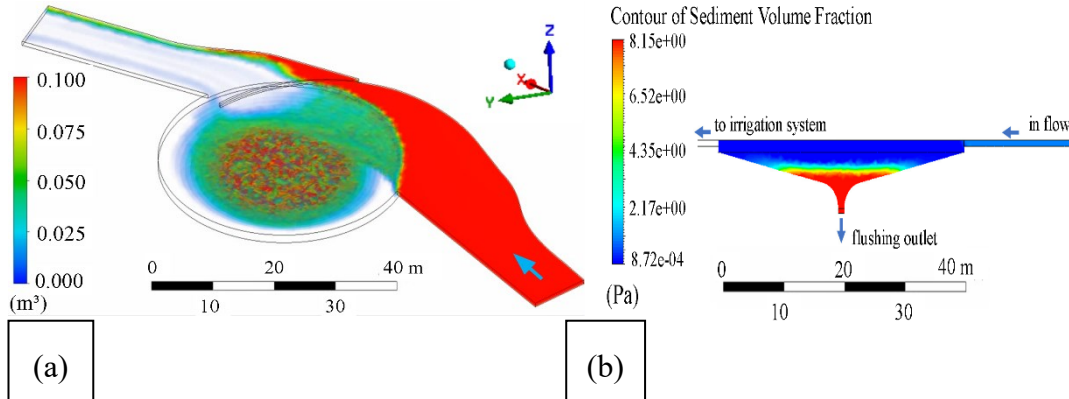
Matrik pengujian yang merangkum kondisi eksperimental, dengan penampang melintang TA1–TA4 dengan bilangan *Froude* yang terbatas pada $Fr = 3$ dan 3,5 karena keterbatasan aliran maksimal pada pipa inlet (lihat Tabel 1). Dalam semua uji coba, bilangan *Reynolds* adalah $ks^+ < 6$, dan karenanya rezim aliran halus secara hidraulik menggunakan Persamaan 5. Kecepatan aliran rata-rata penampang U ditentukan dengan menggunakan persamaan kontinuitas, dimana debit ditentukan menggunakan dua metode: a) kecepatan aliran rata-rata penampang basah, yaitu, $U = Q/(b.h)$, dihitung dengan debit Q , yang diukur dengan flow meter magnetik, dan b) kecepatan aliran rata-rata U dihitung dari pengukuran Micro ADV sebagai $U = Q/A$ dengan $Q = \int U dA$, dimana A = luas penampang basah, dan U = kecepatan rata-rata waktu pada setiap titik pengukuran. Nilai-nilai ini sesuai dengan perbedaan deviasi maksimum 3%. Alirannya berangsur-angsur bervariasi; oleh karena itu, pengukuran ketinggian air digunakan untuk mengkalibrasi kurva *backwater*, yang dihitung dengan interval $D_x = 0,05$ m di sepanjang *flume* untuk menentukan kehilangan gesekan *flume* dan mengukur kemiringan garis energi S_e serta ketinggian kekasaran pasir yang seragam ks^+ .

Hasil Studi dan Pembahasan

Komputasi Numerik

Hasil simulasi dengan *Computational Fluid Dynamics CFD* menunjukkan konsentrasi sedimen non-kohefif 120.000 – 190.000 ppm, Dengan menghitung secara grafik fraksi sedimen pada deskriptor simulasi pada komputer. Pada simulasi numerik dengan *Ansys 2021 R2 Fluent Students* ini, sangat sulit untuk mengamati pola aliran yang sebenarnya (Kumar dan Malipatil, 2014). Sedimen yang mengendap pada kolam pengendapan dan saluran penguras pada kondisi bilangan *Froude* terjadi aliran super kritis sedimen tidak dapat mengendap sempurna. Kecepatan aliran lebih besar pada sisi kanan *chamber*, karena bidang masuknya aliran dari *flume*. Bagian dasar *chamber* kecepatan aliran didominasi pada sisi kanan lubang mencapai kecepatan absolut 8,2 cm/s dalam kondisi katup/keran di *orifice* terbuka. Kecepatan yang diinginkan sehingga dapat diperoleh bilangan *Froude* 1-1,2 dan bilangan *Reynold* transisi dari laminar ke turbulen di kisaran 3 – 4 dengan cara katup/keran dibuka tidak penuh dengan setengah bukaan sehingga rotasi gradasi partikel dapat tertuju pada lubang pengurasan (lihat Gambar 4). Pada peningkatan fraksi lebih cepat dikarenakan tekanan menurun dari dinding *chamber*

menuju *outlet flushing* yang dipengaruhi gaya gravitasi ketika partikel mengalir dari dinding depan ke arah dinding belakang, lebih banyak partikel akan diseret ke arah daerah tekanan rendah yaitu menuju *outlet flushing* dan akan mengendap pada pusaran sebelum membentuk lapisan partikel berputar yang stabil terhadap dinding *chamber*.



Gambar 4. Hasil simulasi penggelontoran sedimen pada *CFD Ansys 2021 R2*, kontur fraksi sedimen tampak atas (a), kontur fraksi sedimen pada potongan melintang dari arah *inlet* ke *outlet* (b)

Pemodelan Fisik

Selain itu, aliran yang mengalir pada *flume* juga dipengaruhi kesetimbangan aliran dalam kurun waktu ke 5 jam pengaliran menunjukkan peningkatan fraksi sedimen lebih stabil per jamnya. Parameter kesetimbangan aliran β yang menunjukkan tingkat keseragaman aliran dihitung dengan persamaan berikut:

$$\beta = \frac{gRh}{U_{*1}^2} \left(\frac{dRh}{dx} - Sb \right) \quad (8)$$

Dengan β keseragaman aliran, g gravitasi, R jari-jari hidraulik, U adalah kecepatan aliran, l adalah panjang *flume* yang dilalui oleh fluida, h adalah ketinggian muka air pada *flume*, dRh panjang karakteristik aliran ketinggian muka aliran, dx panjang karakteristik *flume* dan Sb adalah kemiringan *flume*. Persamaan 2-7 dalam kondisi umum dapat ditulis kembali menjadi distribusi kecepatan di wilayah dinding mengikuti rumus universal yang disebut hukum log berikut (Ramirez dkk., 2020):

$$U^+ = \frac{1}{k} \ln(z^+) + A, (z^+ > 30) \quad (9)$$

Dengan $U^+ = U/u^*$; U kecepatan aliran rata-rata waktu, $z^+ = zu^*/\nu$, k = konstanta *von Kármán*, A adalah konstanta integral. Konstanta *von Kármán* $k = 0,41$ oleh beberapa peneliti untuk aliran saluran yang stabil, terbuka di atas *smooth bed load*, kasar, dan dapat dipindahkan, terlepas dari angka *Reynolds* dan *Froude*. Maka persamaan di atas menjadi:

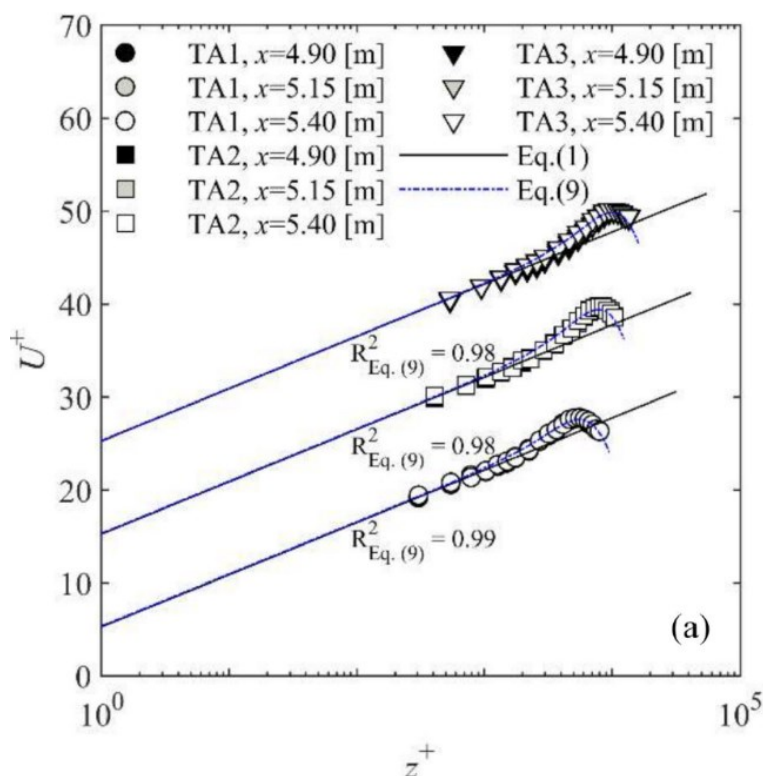
$$U^+ = \frac{1}{k} \ln(z^+) + A - \frac{1}{3k} \left(\frac{z}{\delta} \right)^3 + \frac{2\pi(1+\alpha^{0,5})}{k} \sin^2 \frac{\pi z}{2\delta}, (z^+ > 30) \quad (10)$$

Dengan δ posisi kecepatan maksimum yang dapat ditentukan secara eksperimental, dan α rasio tegangan geser yang jelas pada permukaan air dengan tegangan geser pada saat sedimen mulai bergerak. Dari data dan analisis percobaan model uji pada penampang melintang *flume*, hasil uji disajikan pada Tabel 1 berikut:

Tabel 1. Percobaan hidraulik parameter pada penampang melintang aliran

Test	F_o	F	h_o	h	b/h_o	b/h	R	\bar{U}_{bulk}	\bar{U}	$\frac{\bar{U}}{\bar{U}_{bulk}}$	β
	(-)	(-)	(cm)	(cm)	(-)	(-)	(10^5)	(m/s)	(m/s)	(-)	(-)
TA1	2.0	1.9	10	10.5	2	1.91	4.0	1.95	1.96	1.01	-0.80
TA2	3.0	2.5	10	11.2	2	1.79	5.6	2.66	2.68	1.01	-0.43
TA3	4.0	3.3	10	11.4	2	1.75	7.5	3.52	3.52	1.00	-0.26
TA4	2.0	1.9	15	16.0	1.33	1.25	5.7	2.31	2.31	1.00	-0.69

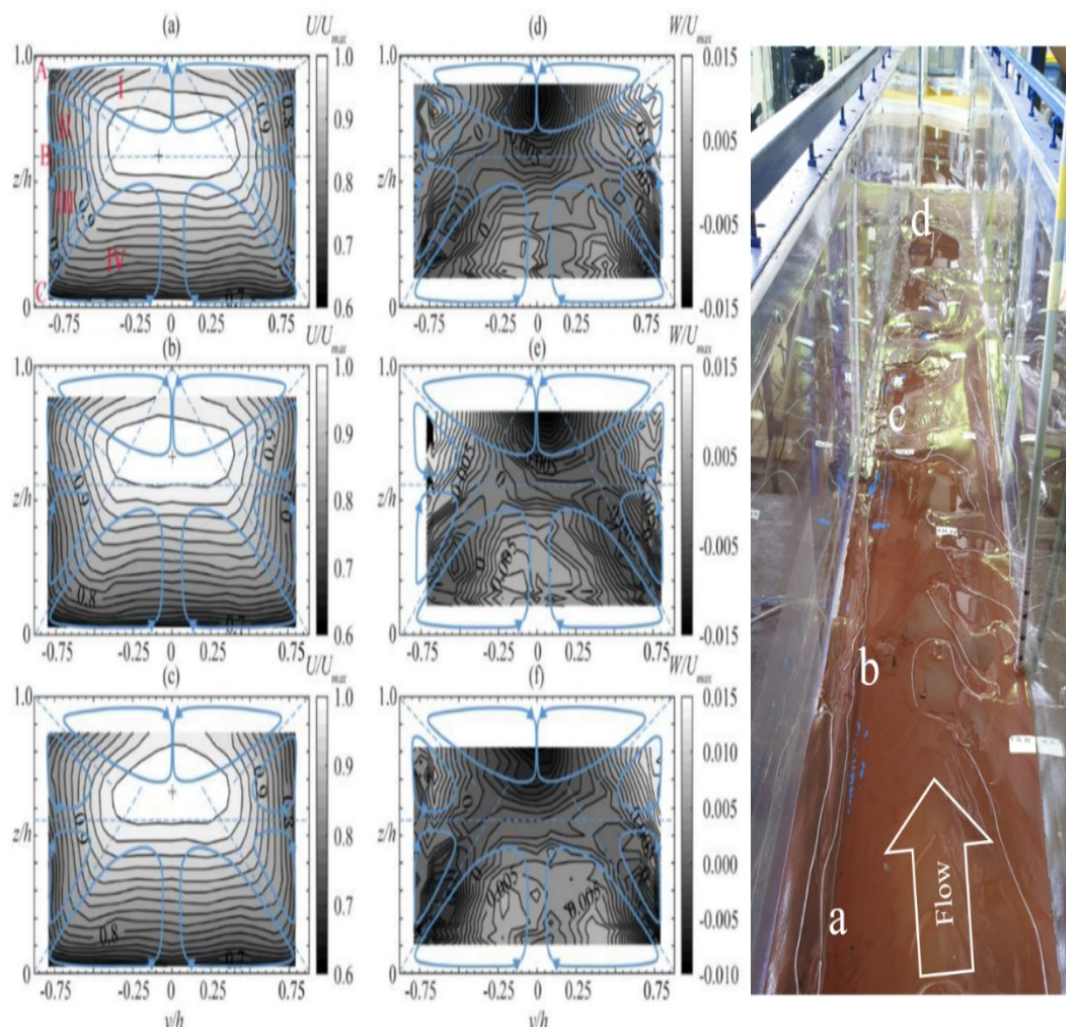
Keseragaman aliran pada *flume* pada Gambar 5, menunjukkan pada panjang aliran masuk pada kolam pengendapan mengalami ketidakseragaman pola aliran karena aliran mulai berbelok dari lurus ke radian kolam pengendapan. Kondisi aliran yang baik untuk mengendapkan sedimen adalah aliran yang seragam dan nilai bilangan *Reynolds* dikisaran 3 – 4 dan rasio b/h = berkisar 1 – 1,2.



Gambar 5. Rata-rata profil kecepatan *streamwise* bersama dengan *log-law* Persamaan 3 dan dimodifikasi *log-wake-law* Persamaan 10 cocok untuk TA1–TA3 di semua penampang pada $y/h = 0$.

Plot kontur kecepatan aliran rata-rata yang dinormalisasi dalam (a–c) arah aliran, (d–f) arah vertikal untuk TA1–TA3. Dalam (a) I = pusaran permukaan bebas, II dan

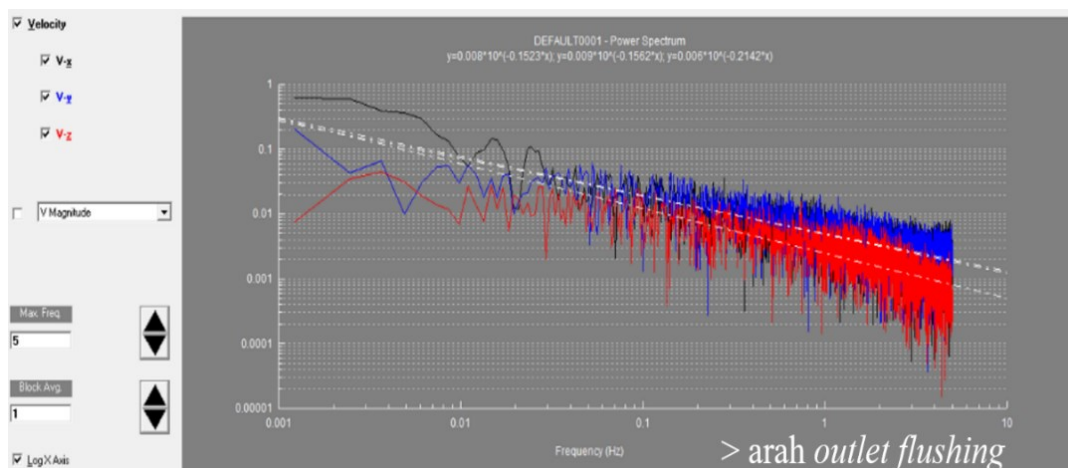
III = pusaran tengah, IV = pusaran bawah, A = vektor sudut permukaan, B = bisector tengah, C = vektor sudut bawah. Aliran seragam pada jarak 1,6 – 1,8, ditunjukkan pada Gambar 6 dari jaring *honey comb* pada jarak ini sedimen mulai jatuh dan mengendap hingga kolam pengendapan pada *flume* (d).



Gambar 6. Profil aliran pada *flume* model uji

Kehilangan partikel dari pengamatan dengan Micro ADV, diperoleh spektrum kecepatan aliran yang semakin tinggi pada lubang pengurasan *oulet flushing*. Namun kecepatan ini yang semakin tinggi akan menghasilkan bilangan *Froude* yang tinggi pula dan aliran dalam kondisi $Fr > 1$ = super kritis, diperoleh Fr : 3.42 ditunjukkan pada Gambar 7.

Fenomena *vortex* ini, mempengaruhi efektivitas pengurasan pada sebuah perangkat sedimen, pengaturan debit diperlukan untuk mengatur aliran dalam kondisi transisi laminar ke turbulen sehingga fraksi sedimen dapat dikuras secara maksimal. Dalam penelitian ini diperlukan Q : 1.26 l/s, kecepatan aliran 10,79 cm/s untuk dapat menguras fraksi sedimen secara optimal.



Gambar 7. Spektrum aliran pada titik kolam pengendapan

Kesimpulan dan Saran

Kesimpulan

Hasil penelitian eksperimental ini secara sistematis pada pengaruh sekunder arus pada karakteristik turbulensi aliran saluran terbuka super kritis pada aspek yang sangat rendah rasio di pada dasar saluran terbuka. Dari hasil pengamatan dengan *Micro ADV 16 Mhz* dan Persamaan 3 - 10 terperinci dari pengukuran pada *flume* laboratorium dengan kemiringan dasar saluran 1%. Parameter hidraulik utama yang dipelajari adalah rasio aspek $b/h_o = 1-2$ dan aliran pendekatan bilangan *Froude*, $Fr = 2 - 4$. Kondisi aliran keduanya seragam dan secara bertahap bervariasi tergantung pada bilangan *Froude*. Hasil studi ini menunjukkan bahwa empat seri pengaliran arus sekunder yang digerakkan oleh turbulensi pusaran permukaan bebas, dan dua pusaran tengah di antaranya, terjadi pada penampang *flume* tanpa bentuk pada dasar saluran. Pola aliran arus sekunder terlihat jelas dalam distribusi penampang kecepatan aliran rata-rata dan vertikal, intensitas turbulensi dan *Reynolds* dan distribusi tegangan geser. Kecepatan aliran vertikal rata-rata dengan aliran naik dan turun pada dinding samping dan gradien hidraulik pada *flume* cocok dengan pola arus sekunder. Aliran turun yang kuat di dekat permukaan air dan aliran ke puncak aliran pada *flume* di tengah *flume* masing-masing sesuai dengan daerah kecepatan aliran yang dipercepat dan diperlambat. Oleh karena itu, kecepatan maksimum terjadi jauh di bawah permukaan aliran, yang disebut "fenomena kecepatan-dip". Oleh karena itu, distribusi kecepatan logaritmik *Prandtl - Von Kármán (log-law)* memerlukan koreksi penurunan kecepatan di wilayah luar. Hukum *wake-log* yang dimodifikasi termasuk koreksi ini berlaku dengan baik untuk data di wilayah dalam dan luar untuk semua kondisi hidraulika yang dipelajari dan dengan demikian direkomendasikan untuk aliran 3D seperti dalam penelitian ini.

Dalam penggelontoran sedimen dapat diizinkan dengan debit maksimal hingga 120% NFR, namun pada pengamatan pada penelitian ini dengan debit 74% dari NFR dapat menggelontorkan sedimen. Pada prototip debit penggelontoran 120% NFR adalah $13,21 \text{ m}^3/\text{s}$ pada model uji $2,16 \text{ l/s}$, Kecepatan aliran pada prototip $3,43 \text{ m/dt}$ atau pada model uji setara kecepatan aliran $16,32 \text{ cm/dt}$. Efisiensi pengaliran

debit berdasarkan bilangan *Froude* = 2.2 dan *Reynolds* 2500 – 2600 dapat diefisiensikan hingga 46% diperlukan $Q:1.26 \text{ l/s}$, kecepatan aliran $10,79 \text{ cm/dt}$ untuk dapat menguras fraksi sedimen secara optimal.

Saran

Pola arus sekunder dan pengaruh aliran yang diperoleh dari pengukuran aliran saluran pada *flume* dengan pengujian laboratorium. Namun, penyimpangan studi aliran saluran terbuka model fisik untuk rasio aspek yang serupa. Untuk alasan ini, direkomendasikan untuk kalibrasi dan validasi studi model numerik dan matematik. Secara keseluruhan, kebaruan penelitian ini memberikan karakterisasi yang cukup komprehensif dari aliran super kritis tinggi 3D pada rasio aspek yang sangat rendah. Untuk memberikan kontribusi pada pemahaman yang lebih baik tentang dinamika arus sekunder dan pengaruh potensialnya pada tegangan geser pada dasar, dan karenanya angkutan sedimen serta mekanisme hidro-abrasi yang terjadi pada struktur hidraulik. Penelitian ini diharapkan dapat mendukung tindak lanjut studi tentang berbagai kekasaran pada dasar saluran pada arus sekunder pada kondisi hidraulik yang serupa. Untuk mengefisiensi debit penggelontoran disarankan dilakukan pemodelan fisik untuk memperoleh debit yang optimum sehingga tidak selalu debit penggelontoran yang besar dapat menggelontorkan sedimen secara maksimal, bilangan *Froude* dan *Reynolds* sangat menentukan sehingga dapat diperoleh parameter hidraulik yang tepat. Karena nilai gradien kecepatan di sepanjang arah kecepatan itu sendiri akan memberikan ukuran kecepatan geser yang baik ke arah tertentu.

Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih kepada segenap pengajar pada KK-TSA FTSL dan Teknisi Laboratorium Rekayasa Sumber Daya Air – Fluida Institut Teknologi Bandung atas bantuan fasilitas dan peralatan uji.

Daftar Referensi

- Balachandar, R., dan Bhuiyan, F. (2007): Higher-Order Moments of Velocity Fluctuations in an Open-Channel Flow with Large Bottom Roughness, *Journal of Hydraulic Engineering*, **133**(1), 77–87. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2007\)133:1\(77\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2007)133:1(77))
- Basse, N. T. (2023): An Algebraic Non-Equilibrium Turbulence Model of the High Reynolds Number Transition Region, *Water*, **15**(18), 3234. <https://doi.org/10.3390/w15183234>
- Chiodi, F., Claudin, P., dan Andreotti, B. (2014): A two-phase flow model of sediment transport: transition from bedload to suspended load, *Journal of Fluid Mechanics*, **755**, 561–581. <https://doi.org/10.1017/jfm.2014.422>
- Cuthbertson, A. J., dan Ervine, D. A. (2007): Experimental Study of Fine Sand Particle Settling in Turbulent Open Channel Flows over Rough Porous Beds, *Journal of Hydraulic Engineering*, **133**(8), 905–916. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2007\)133:8\(905\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2007)133:8(905))

- García-Ramos, F. J., Badules, J., Boné, A., Gil, E., Aguirre, A. J., dan Vidal, M. (2018): Application of an Acoustic Doppler Velocimeter to Analyse the Performance of the Hydraulic Agitation System of an Agricultural Sprayer, *Sensors*, **18**(11), 3715. <https://doi.org/10.3390/s18113715>
- Huang, C.-C., Lai, J.-S., Lee, F.-Z., dan Tan, Y.-C. (2018): Physical Model-Based Investigation of Reservoir Sedimentation Processes, *Water*, **10**(4), 352. <https://doi.org/10.3390/w10040352>
- Isnaeni, M. (2023): Experiments Of Geometric Shape Of Sediment Trap Rectangular And Vortex Settling Desilting Basin, *International Journal of GEOMATE*, **24**(106). <https://doi.org/10.21660/2023.106.s8650>
- Isnaeni, M., Buhyatil Kubra, H., Sukadi, Sopandi, Triyadi, dan Chairunnisa (2022): Perilaku Pengendapan Sedimen Sphere Particles yang Mengandung Fiber dalam Aliran Sungai Ciasem yang Terkontaminasi Limbah Industri, *Jurnal Teknik Sumber Daya Air*, 105–116. <https://doi.org/10.56860/jtsda.v2i2.47>
- Kumar, N., dan Malipatil, A. S. (2014): CFD Analysis of Vortex Tube for Various Cross Sectional Nozzles, **2**.
- Lepesqueur, J., Hostache, R., Martínez-Carreras, N., Montargès-Pelletier, E., dan Hissler, C. (2019): Sediment transport modelling in riverine environments: on the importance of grain-size distribution, sediment density, and suspended sediment concentrations at the upstream boundary, *Hydrology and Earth System Sciences*, **23**(9), 3901–3915. <https://doi.org/10.5194/hess-23-3901-2019>
- Manes, C., Pokrajac, D., dan McEwan, I. (2007): Double-Averaged Open-Channel Flows with Small Relative Submergence, *Journal of Hydraulic Engineering*, **133**(8), 896–904. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2007\)133:8\(896\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2007)133:8(896))
- Otsuka, J., Saruwatari, A., dan Watanabe, Y. (2017): Vortex-induced suspension of sediment in the surf zone, *Advances in Water Resources*, **110**, 59–76. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2017.08.021>
- Ramirez, R., Avila, E., Lopez, L., Bula, A., dan Duarte Forero, J. (2020): CFD characterization and optimization of the cavitation phenomenon in dredging centrifugal pumps, *Alexandria Engineering Journal*, **59**(1), 291–309. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2019.12.041>
- Sudarningsih, S., Maulana, L., Bijaksana, S., Hafidz, A., Pratama, A., Widodo, W., dan Iskandar, I. (2017): Magnetic CHARACTERIZATION OF SAND AND BOULDER SAMPLES FROM CITARUM RIVER AND THEIR ORIGIN, *Journal of Mathematical and Fundamental Sciences*, **49**(2), 116. <https://doi.org/10.5614/j.math.fund.sci.2017.49.2.2>