E-ISSN:2579-5511/P-ISSN:2579-6097
doi https://doi.org/10.20886/jppdas.2021.5.1.51-68

KAJIAN NUMERIK FENOMENA *UNDULAR TIDAL BORES* DALAM MEMPENGARUHI PROSES EROSI PADA DAERAH ALIRAN SUNGAI

(*Numerical study of undular tidal bores phenomenon in influencing erosion processes of watersheds*)

Yoga Satria Putra[1], Mentari Yuniar[1], dan Arie Antasari Kushadiwijayanto[2]
[1]Program Studi Geofisika, FMIPA, Universitas Tanjungpura
[2]Program Studi Ilmu Kelautan, FMIPA Universitas Tanjungpura
Alamat email: yogasatriaputra@physics.untan.ac.id

Diterima: 18 September 2020 Direvisi : 09 Februari 2021 Disetujui : 11 Februari 2021

ABSTRACT

Riverbank erosion is one indication of watershed damage. One of the causes is the phenomenon of tidal bores waves that occur in a river channel.The strength of tidal bores wave's can be measured based on its shear force parameter and dissipation energy. Wave shear force and dissipation energy are the parameters that play a role in a riverbank erosion process. Both of them are characterized by the Froude number (Fr) which is a function of the upstream river flow velocity (V_0), the tidal bores flow velocity from the estuary (V_b), the river depth (h_1), and the gravity acceleration (g). A numerical study of the phenomenon of undular tidal bores has been carried out in this article. Five undular bores simulations have been built using the open-source Computational Fluid Dynamics (CFD) software, OpenFOAM. This study aims to analyze the effect of the Froude number variations (Fr) on the magnitude of the wave shear coefficient (ϵ) and dissipation energy (ΔE) on undular bores cases. Five simulations of undular bores have been generated based on five Froude's numbers, Fr = 1.0, 1.1, 1.2, 1.3, and 1.4. The validation has been performed by comparing the experimental and numerical results from the scientific literature. The analysis results show that the increase in Fr has a significant effect on the increase in the ϵ and ΔE.These results indicate that the Froude number variations have influenced the wave shear coefficient and dissipation energy on the undular bores cases. Increasing the Fr values have triggered an increase in the value of ϵ linearly and ΔE exponentially. Thus, the erosion that occurs on the riverbank in the undular tidal bores phenomenon could be determined based on Froude's number.

Keywords: undular tidal bore; OpenFOAM; shear force coefficient; dissipation energy; Froude number

@2021 JPPDAS All rights reserved. Open access under CC BY-NC-SA license.

ABSTRAK

Erosi tebing sungai adalah salah satu indikasi kerusakan pada Daerah Aliran Sungai (DAS). Salah satu peyebabnya adalah fenomena gelombang *tidal bores* yang terjadi dalam sebuah kanal sungai. Kekuatan gelombang *tidal bores* ini dapat diukur berdasarkan parameter gaya geser dan energi disipasi. Gaya geser dan energi disipasi gelombang merupakan parameter yang berperan dalam sebuah proses erosi tebing sungai. Keduanya dikarakterisasi oleh bilangan *Froude* (*Fr*) yang merupakan fungsi dari kecepatan aliran sungai dari hulu (V_0), kecepatan aliran *tidal bores* dari muara (V_b), kedalaman sungai (h_1), dan percepatan gravitasi (g). Sebuah kajian numerik tentang fenomena *tidal bores* jenis *undular* telah dilakukan dalam artikel ini. Lima simulasi *undular bores* telah dibangun dengan menggunakan perangkat lunak *Computational Fluid Dynamics (CFD) open-source, OpenFOAM.* Kajian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi bilangan *Froude* (*Fr*) terhadap besarnya koefisien gaya geser gelombang (ϵ) dan energi disipasi ($\Delta\mathrm{E}$) pada kasus *undular bores*. Lima simulasi *undular bores* telah dibuat berdasarkan lima bilangan *Froude*, *Fr* = 1,0; 1,1; 1,2; 1,3; dan 1,4. Validasi telah dilakukan dengan membandingkan hasil eksperimen dan numerik dari literatur ilmiah. Hasil analisis menunjukkan bahwa peningkatan nilai *Fr* telah memberikan pengaruh yang signifikan terhadap peningkatan nilai ϵ dan $\Delta\mathrm{E}$. Hasil ini menjelaskan bahwa koefisien gaya geser gelombang dan energi disipasi pada kasus *undular bores* telah dipengaruhi oleh variasi bilangan *Froude*. Peningkatan nilai *Fr* telah memicu peningkatan nilai ϵ secara linier dan $\Delta\mathrm{E}$ secara eksponensial. Dengan demikian, erosi yang terjadi pada tebing sungai pada fenomena *undular tidal bores* dapat ditentukan berdasarkan bilangan *Froude*.

Kata Kunci: u*ndular tidal bores; OpenFOAM;* koefisien gaya geser; energi disipasi; bilangan *Froude*.

I. PENDAHULUAN

Tidal bores merupakan sebuah fenomena alam yang terjadi di Daerah Aliran Sungai (DAS) akibat pengaruh gelombang pasang di muara (Chanson & Tan, 2011). Mekanisme terjadinya *tidal bores* dimulai dengan peristiwa pasang di muara yang selanjutnya membangkitkan gelombang air yang bergerak menuju ke hulu melawan arus sungai dan membentuk sebuah fenomena mirip tsunami kecil (*little tusnami*) yang terjadi di sepanjang kanal sungai. Fenomena *tidal bores* biasanya terjadi pada sungai yang memiliki bentuk mulut sungai konvergen (Chanson, 2010a). Gelombang *tidal bores* ini dapat mengakibatkan kerusakan di sepanjang aliran sungai, seperti hancurnya rumah, kapal, dan juga dapat mengerosi tebing sungai yang dilaluinya. Efek negatif yang dibangkitkan dari gelombang *tidal bores* ini tentu akan berpengaruh pada proses pembangunan infrastruktur pada kanal sungai yang dilalui *tidal bores* ini. Kajian yang komprehensif tentang *tidal bores* juga akan mendukung kebijakan yang berhubungan dengan manajemen pengelolaan DAS. Manajemen pengelolaan DAS yang bisa dilakukan terkait dengan dampak yang ditimbulkan oleh fenomena

@2021 JPPDAS All rights reserved. Open access under CC BY-NC-SA license.

E-ISSN:2579-5511/P-ISSN:2579-6097

tidal bores ini dapat berupa kajian, perancangan, dan pembuatan sebuah teknologi yang bisa melindungi infrastruktur serta tebing sungai dari erosi yang dihasilkan oleh gelombang *tidal bores*. Hal ini tentunya akan memberikan tantangan bagi peneliti untuk berinovasi dalam mengatasi dampak negatif dari fenomena *tidal bores*. Di Indonesia, fenomena *tidal bores* dapat dijumpai di Sungai Kampar, Riau. Penduduk setempat memanggilnya dengan sebutan *Bono.*

Penelitian tentang fenomena *tidal bores* telah banyak dilakukan, baik dengan menggunakan metode analitik, numerik, eksperimental, maupun lapangan. Kajian tentang fenomena *tidal bores* telah dilakukan secara numerik dan analitik dengan menekankan pada perubahan kedalaman aliran, panjang gelombang, dan amplitudo gelombang yang dikorelasikan dengan bilangan *Froude* (Putra, Beaudoin, Rousseaux, Thomas, & Huberson, 2019). Selain itu, Treske (1994) telah melakukan studi tentang *tidal bores* dengan metode eksperimen dengan menganalisis permukaan bebas, kecepatan, dan tekanan dari *tidal bores*. Studi eksperimental tentang *tidal bores* juga telah dilakukan dengan mengkaji tipe-tipe *tidal bores* skala laboratorium dengan menekankan pada analisis permukaan bebas dan kecepatan aliran dari *tidal bores* (Rousseaux, Mougenot, Chatellier, David, & Calluaud, 2016). Selanjutnya, kajian numerik tentang aliran *tidal bores* telah dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak *Computational Fluid Dymamics (CFD), Thetis,* dengan model turbulen *Large Eddy Simulation* (LES) *Smagorinsky* (Berchet, Simon, Beaudoin, Lubin, Rousseaux, & Huberson 2018). Dalam kajian tersebut, sebuah klasifikasi pola aliran di bawah gelombang *tidal bores* telah dibuat oleh Berchet *et al*. (2018) dengan empat tipe pola aliran yang dipengaruhi oleh bilangan *Froude*. Selain itu, Putra *et al*. (2019) juga telah membuat sebuah klasifikasi *tidal bores* berdasarkan hubungan antara amplitudo gelombang dan bilangan *Froude* yang dikerjakan secara numerik menggunakan perangkat lunak *CFD open-source* yang dikenal dengan Open FOAM. Kajian lain tentang *tidal bores* juga telah dilakukan dengan membangun sebuah kanal sintetis menggunakan metode numerik (Siddiq, 2017). Pembahasan tentang teori dan fisis dari *tidal bores* telah dijelaskan di dalam beberapa literatur ilmiah yang bisa dibaca secara rinci, diantaranya Khezri (2013), Bonneton, Filippini, Arpaia, & Ricchiuto (2016), Furgerot *et al*. (2016), Leng, Lubin, & Chanson (2017), dan Lubin & Chanson(2017).

Dalam artikel ini, kajian numerik tentang fenomena *tidal bores* jenis *undular* telah dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak *OpenFOAM* yang menerapkan model turbulen RANS *k-Omega.* Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh bilangan *Froude* (*Fr*) terhadap besar koefisien gaya geser gelombang (ϵ) berdasarkan referensi dari Zhu *et al*. (2017), Hassanpour, Dalir, & Farsadizadeh (2017), dan Ead & Rajaratnam (2002) yang telah mengkaji hubungan antara gaya geser gelombang dan bilangan *Froude* dalam sebuah proses erosi. Selain itu, kajian dalam artikel ini

@2021 JPPDAS All rights reserved. Open access under CC BY-NC-SA license.

juga bertujuan untuk mengetahui hubungan antara bilangan *Froude* (*Fr*) terhadap energi disipasi (ΔE) yang dibawa oleh gelombang *tidal bores* berdasarkan pada kajian Lubin & Chanson (2017). Lima simulasi *undular bores* dibangun dengan mengacu pada lima bilangan *Froude* yang berbeda, yaitu *Fr* = 1,0; 1,1; 1,2; 1,3; dan 1,4. Amplitudo dan panjang gelombang pada permukaan bebas *undular bores* dianalisis untuk melihat pengaruh bilangan *Froude* dalam membangkitkan gelombang pada permukaan bebasnya. Selanjutnya energi disipasi dari gelombang *undular bores* dihitung dan diplot sebagai fungsi dari bilangan *Froude*. Semakin besar energi yang dilepaskan, maka daya rusaknya juga akan semakin besar (Dean & Dalrymple, 1993). Kajian dalam artikel ini diharapkan mampu memberikan kontribusi positif terkait dengan pengelolaan DAS khususnya pada sungai dimana fenomena *tidal bores* terjadi.

II. BAHAN DAN METODE

A. Waktu dan Lokasi

Kajian tentang fenomena *undular tidal bores* ini dilakukan secara numerik dengan membangun simulasi *undular bores* yang dikerjakan di Laboratorium Geofisika dan Sistem Informasi Geografi (SIG) Program Studi Geofisika, Jurusan Fisika, FMIPA, Universitas Tanjungpura, Pontianak, Kalimantan Barat. Penelitian ini dilakukan dari bulan Desember 2019 sampai dengan Juni 2020 yang dimulai dengan studi pustaka, validasi simulasi dengan referensi ilmiah yang ada, dan analisis amplitudo serta panjang gelombang. Bagian akhir penelitian adalah menghitung koefisien gaya geser dan energi disipasi gelombangsebagai fungsi dari bilangan *Froude* untuk mengetahui kekuatan erosi dari gelombang *undular tidal bores*.

B. Bahan dan Alat

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah data sekunder berupa profil permukaan bebas terhadap kedalaman air yang didigitasi dari referensi ilmiah dari Chanson (2010b) dan Berchet *et al*. (2018). Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari perangkat lunak dan perangkat keras seperti yang dideskripsikan dalam Tabel 1.

C. Metode Penelitian

Hal pertama yang dilakukan dalam membangun simulasi *undular bores* ini adalah membangun domain komputasi. Domain komputasi yang digunakan pada simulasi ini berbentuk balok dengan ukuran panjang dan tingginya adalah *L x H = 10 x 0,5* m yang mengikuti susunan eksperimen Chanson (2010b) seperti diilustrasikan pada Gambar 1.

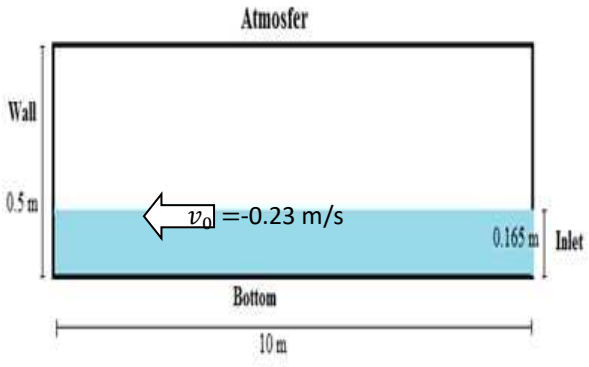
Tabel (*Table*) 1. Alat dan bahan penelitian (*Tools and material of the research*).

No.	Alat dan perangkat lunak (*Tools and software*)	Spesifikasi (*Specification*)
1.	Laptop	*Intel Pentium 987 1.60 GHz, RAM 2 GB, System type 32 bit*
2.	*Operating system Ubuntu*	Ubuntu 14.04 LTS
3.	Perangkat lunak *CFD OpenFOAM*	Versi 4.0
4.	Perangkat lunak *ParaView*	Versi 5.0.1
5.	Perangkat lunak *Gnuplot*	Versi 5.0
6.	Perangkat lunak *Mgraph*	Versi 12.50
7.	*Hardisk*	1 TB

Sumber (*Source*): Kajian sekarang *(Present study)*, 2021

@2021 JPPDAS All rights reserved. Open access under CC BY-NC-SA license.

E-ISSN:2579-5511/P-ISSN:2579-6097



Gambar (*Figure*) 1. Domain komputasi simulasi *undular bores (Computational domain of undular bores simulation)*
Sumber (*Source*): Kajian sekarang *(Present study)*, 2021

Pada domain tersebut dibangun sebuah kolom air dua dimensi dengan ukuran panjang dan tingginya adalah *l x h = 10 x 0,165* m. Nilai viskositas air dan udara dalam domain tersebut didefinisikan masing-masing sebesar$\mu_{air} = 10^{-3}$kg/ms dan $\mu_{udara} = 1{,}85 \times 10^{-5}$kg/ms. Nilai densitas air dan udara ditentukan masing-masing sebesar $\rho_{air} = 1000$ kg/m^3 dan $\rho_{udara} = 1$ kg/m^3. Percepatan gravitasi diatur sebesar 9.80 m/s^2. Kecepatan aliran air mula-mula ditentukan sebesar $v_0 = -0.23$m/s. Kecepatan bernilai negatif menunjukkan arah aliran air dari kanan ke kiri. Tahap selanjutnya adalah *solving* yang merupakan proses diskretisasi dan perhitungan numerik. Untuk menyelesaikan simulasi *undular bores* digunakan persamaan Navier-Stokes yang terdapat di dalam *OpenFOAM*. Pesamaan tersebut dapat dibagi menurut skema diskretisasi berikut:

$$\underbrace{\frac{\partial u}{\partial t}}_{\substack{skema\\waktu}} + \underbrace{\nabla(uu)}_{\substack{skema\\divergensi}} + \underbrace{\nabla.(dev(-v^{eff}}_{\substack{skema\\turbulen}} \underbrace{(\nabla u + (\nabla u)^T)))}_{\substack{skema\\laplacian}} = \underbrace{-\nabla p}_{\substack{skema\\gradien}} + S \quad ....(1)$$

dengan u adalah kecepatan fluida, v^{eff} adalah viskositas kinematika efektif fluida, *p* adalah tekanan, dan *S* adalah sumber lain yang bisa dimasukan ke dalam persaman ini.

Pada proses perhitungan, waktu simulasi diatur di dalam sebuah file bernama *control Dict.* Di dalam file ini, *time step* simulasi ditentukan sebesar Δt *= 0,001* detik. Selanjutnya, validasi dilakukan untuk memeriksa dan membandingkan data hasil simulasi dengan data referensi. Validasi pada penelitian ini menggunakan data hasil eksperimen dari Chanson (2010b) dan data numerik dari Berchet *et al*. (2018). Setelah mendapatkan parameter simulasi yang terbaik, selanjutnya amplitudo gelombang a_w dan panjang gelombang L_w dari simulasi *undular bores* dianalisis dengan menggunakan persamaan:

$$a_w = \frac{Y_1 - Y_{min}}{2} \quad .....(2)$$

$$L_w = X_1 - X_2 \quad .....(3)$$

Dengan Y_1 adalah ketinggian puncak gelombang pertama (m), Y_{min} adalah ketinggian lembah gelombang pertama (m), X_1 adalah jarak dari puncak gelombang pertama ke titik nol (m), dan X_2adalah jarak dari puncak gelombang kedua ke titik nol (m), seperti diilustrasikan pada Gambar 2. Sedangkan V_b dan V_0 masing-masing adalah kecepatan aliran *bores* (*m/s*) dan kecepatan awal aliran air (*m/s*). Kemudian, hasil perhitungan menggunakan persamaan (2) dan (3) divalidasi dengan hasil perhitungan menggunakan persamaan analitik dari Lemoine (1948), Andersen (1978), dan Berry (2018) sebagai berikut:

@2021 JPPDAS All rights reserved. Open access under CC BY-NC-SA license.

$\frac{L_w}{h_1} = \frac{\pi}{\sqrt{3}}(Fr-1)^{-\frac{1}{2}}$ dan $\frac{a_w}{h_1} = \frac{8}{3\sqrt{3}}(Fr-1)$, (Teori Lemoine) ……(4)

$\frac{L_w}{h_1} = \frac{1.79}{(Fr-1)^{0.614}}$ dan $\frac{a_w}{h_1} = 0.741(Fr-1)^{0.1028}$, (Teori Anderson) ……(5)

$\frac{L_w}{h_1} = 0.3426\frac{(r+2)^{\frac{3}{2}}}{\sqrt{r-1}}$ dan $\frac{a_w}{h_1} = 0.2331(r-1)$, (Teori Berry) ……(6)

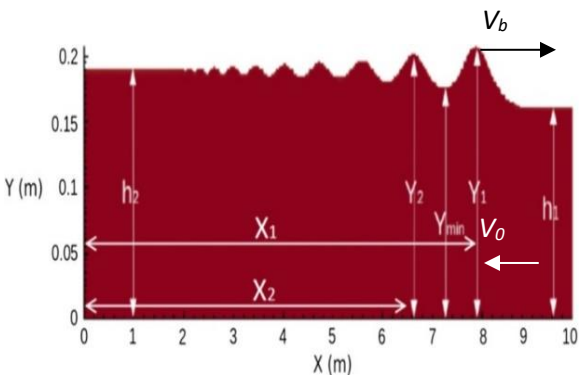
Dengan $r = h_2/h_1$ adalah rasio kedalaman *tidal bores* h_2 (m) terhadap kedalaman air sungai h_1 (m). Rasio r dapat ditulis sebagai fungsi dari bilangan *Froude* sebagai berikut:

$r = \frac{1}{2}\sqrt{1+8Fr_1^2} - 1$ ……(7)

Selanjutnya, untuk memperoleh nilai bilangan *Froude* digunakan persamaan berikut:

$F_r = \frac{V_b+V_0}{\sqrt{gh_1}}$ ……(8)

dimana Fr adalah bilangan *Froude,* V_b adalah kecepatan aliran *bores* (*m/s*), V_0 adalah kecepatan awal aliran air (*m/s*), *g* adalah percepatan gravitasi (*m/s²*), dan h_1 adalah kedalaman awal air (m) (Gambar 2).



Gambar (*Figure*) 2. Ilustrasi parameter fisis pada simulasi *undular bores (Illustration of physical parameters in the undular bores simulation)*

Sumber (*Source*): Putra *et al*., 2019

Pengaruh gelombang air dalam proses erosi dapat ditentukan berdasarkan pada kekuatangaya geser gelombang air yang berinteraksi dengan pada tebing dan dasar sungai (Zhu *et al*., 2017). Hassanpour *et al*. (2017) telah menghitung koefisien gaya geser air pada kasus lompatan hidrolik yang mirip dengan kasus *tidal bores.* Dalam kajiannya, Hassanpour *et al*. (2017) telah menyimpulkan bahwa semakin besar *Fr* akan menghasilkan koefisien gaya geser ϵ yang besar pula. Definisi ϵ telah diturunkan dalam artikel Ead & Rajaratnam (2002) yang dinyatakan dalam persamaan berikut:

$\epsilon = \epsilon_1 Fr^2 = (Fr-1)^2$, ……(9)

$\epsilon_1 = \frac{(Fr-1)^2}{2Fr^2}$, ……(10)

dengan ϵ dan ϵ_1 masing-masing adalah koefisien gaya geser total dan koefisien gaya geser gelombang depan *undular bores*, sedangkan *Fr* adalah bilangan *Froude*.

Definisi energi disipasi gelombang lompatan hidrolik untuk kanal persegi panjang horizontal dengan dasar halus telah dibahas oleh Lubin & Chanson (2017). Energi disipasi (ΔE) ini dikarakterisasi oleh bilangan *Fr* dan energi total yang dibawa oleh aliran sungai dari hulu (E_1) yang dinyatakan sebagai berikut:

$\Delta E = E_1\left(\frac{\left(\sqrt{1+8Fr^2}-3\right)^3}{16\left(\sqrt{1+8Fr^2}-1\right)(1+0.5Fr^2)}\right)$, ……(11)

dengan

$E_1 = \frac{h_1+{V_0}^2}{2g}$ ……(12)

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Uji ukuran kisi domain komputasi untuk $\Delta x = \Delta y$

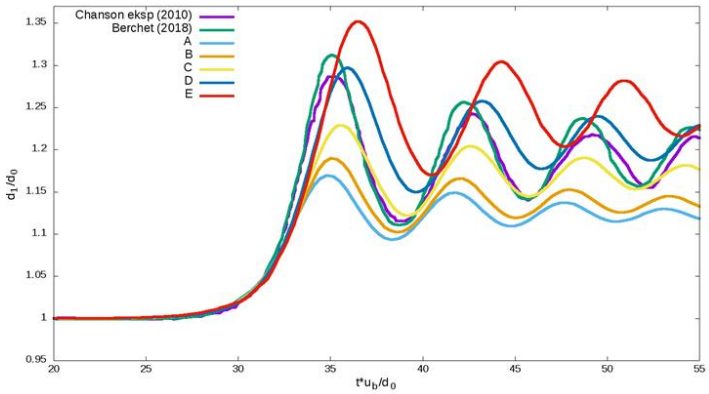
Uji ukuran kisi bertujuan untuk mendapatkan parameter numerik terbaik

@2021 JPPDAS All rights reserved. Open access under CC BY-NC-SA license.

E-ISSN:2579-5511/P-ISSN:2579-6097

yang digunakan dalam membangun lima simulasi *undular bores* berdasarkan lima bilangan *Froude* yang berbeda. Uji pertama adalah menerapkan ukuran kisi regular, yaitu $\Delta x = \Delta y$ dengan Δx dan Δy mewakili ukuran kisi-kisi pada domain komputasi dengan arah sumbu-x dan sumbu-y. Uji ukuran kisi ini dilakukan dengan membuat lima tipe ukuran kisi seperti yang diperlihatkan pada Tabel 2 (kolom 1, 2, dan 3). Selanjutnya, bentuk permukaan bebas dari lima tipe simulasi diplot dalam sebuah grafik perubahan permukaan bebas terhadap waktu bersama dengan data acuan seperti diperlihatkan pada Gambar 3. Pada Gambar 3 terlihat bahwa Tipe D memiliki bentuk permukaan bebas yang mendekati hasil eksperimen dari Chanson (2010b) dan hasil numerik dari Berchet *et al*. (2018). Tipe D memiliki ketinggian puncak gelombang paling mendekati dengan data acuan. Namun, bentuk lembah gelombang tipe D terlihat masih cukup jauh dari data acuan. Ukuran kisi yang reguler pada setiap sumbu $(\Delta x = \Delta y)$ telah mempengaruhi proses perhitungan permukaan bebas dalam kasus *undular bores* ini. Oleh karena itu pengaturan ukuran kisi yang *irregular* $(\Delta x \neq \Delta y)$perlu dilakukan pada uji tahap kedua.

Selanjutnya, permukaan bebas dari lima tipe simulasi pada Gambar 3 diobservasi dengan menekankan pada bentuk permukaan bebas dan waktu perhitungan. Pola permukaan bebas dari lima simulasi tersebut dikorelasikan berdasarkan data eksperimen dari Chanson (2010b). Hasil perhitungan nilai koefisien korelasi *R* dari lima tipe simulasi pada Tabel 2 (kolom 4) menunjukkan bahwa simulasi Tipe D memiliki korelasi yang paling tinggi dibandingkan empat tipe lainnya. Persentase galat dari lima simulasi juga telah dihitung berdasarkan data eksperimen dari Chanson (2010b) untuk melihat seberapa dekat data simulasi yang dihasilkan dengan data eksperimen yang menjadi acuan. Pada Tabel 2 (kolom 5) menunjukkan bahwa persentase galat pada Tipe D lebih kecil dibanding empat tipe lainnya yang menandakan bahwa simulasi Tipe D telah menghasilkan data permukaan bebas yang lebih mendekati data acuan.



Gambar (*Figure*) 3. Grafik perubahan permukaan bebas terhadap waktu dengan menerapkan ukuran kisi regular, $\Delta x = \Delta y$) (*Graph of free surface with time using aregular grid size,* $\Delta x = \Delta y$*)*
Sumber *(Source)*: Analisis data (*Data analysis*), 2021

@2021 JPPDAS All rights reserved. Open access under CC BY-NC-SA license.

Tabel (*Table)* 2. Hasil simulasi dengan ukuran kisi reguler, $\Delta x = \Delta y$ (*Simulation results with regular grid size* $\Delta x = \Delta y$)

Tipe (*Type*)	Δx(m)	Δy (m)	*R*	*Galat* (%)	Waktu (*Time*) (detik)
A	0.010	0.010	0.848	5	1181
B	0.006	0.006	0.907	4.6	3616
C	0.004	0.004	0.928	1.7	8651
D	0.0025	0.0025	0.963	1	37559
E	0.002	0.002	0.827	4.5	70106

Sumber (*Source*): Analisis data (*Data analysis*), 2021

Oleh karena itu, berdasarkan nilai *R* dan galat dalam Tabel 2, telah memberikan sebuah penguatan bahwa pemilihan parameter numerik berupa ukuran kisi reguler yang digunakan pada Tipe D dapat diterapkan dalam membangun simulasi *undular bores* dengan variasi bialangan *Froude*. Namun di sisi lain, waktu perhitungan simulasi yang digunakan pada Tipe D lebih lama dibandingkan dengan tipe A, B, dan C. Lamanya waktu perhitungan ini dipengaruhi oleh jumlah kisi yang lebih banyak dalam domain komputasi yang harus dihitung oleh *OpenFOAM*. Pada Tipe E, data yang dihasilkan tidak menunjukkan hasil yang memuaskan. Hal ini disebabkan oleh spesifikasi *Processor* dan *Random Acces Memory* (RAM) dalam perangkat hitung masih menggunakan tipe lama yang sangat berpengaruh terhadap proses perhitungan secara numerik, khususnya pada domain komputasi yang menerapkan jumlah kisi yang sangat banyak.

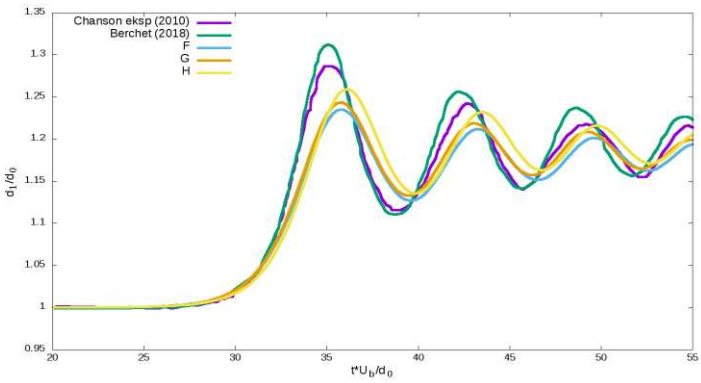
B. Uji ukuran kisi domain komputasi untuk $\Delta x \neq \Delta y$

Pada uji kisi reguler ($\Delta x = \Delta y$), Tipe D memperlihatkan bentuk kurva yang paling mendekati data acuan (Gambar 3). Namun, proses perhitungan dalam membangun simulasi masih memerlukan waktu yang cukup lama. Selain itu, bentuk lembahpertama dari gelombang *undular bores* masih cukup jauh dari data eksperimen Chanson (2010b) dan hasil numerik dari Berchet *et al*., (2018). Oleh karena itu, untuk memperoleh parameter numerik yang lebih optimal maka dilakukan uji lain dengan menerapkan ukuran kisi *irregular* yaitu $\Delta x \neq \Delta y$ (Gambar 4). Uji ini bertujuan untuk mendapatkan waktu perhitungan yang lebih cepat dan bentuk kurva yang mendekati data acuan.

Gambar 4 menunjukkan bentuk permukaan bebas *undular bores* yang menerapkan ukuran kisi *irregular* ($\Delta x \neq \Delta y$). Gambar 4 menampilkan tiga tipe kurva dengan bentuk puncak gelombang pertama yang hampir sama. Tipe H memperlihatkan puncak gelombang yang lebih mendekati hasil eksperimen dari Chanson (2010b) dibandingkan tipe yang lainnya. Namun, bentuk lembah pertama pada Tipe F lebih mendekati data acuan. Untuk menentukan tipe mana yang paling mendekati data acuan maka dilakukan perhitungan nilai koefisien korelasi *R* dan galat berdasarkan pada data eksperimen dari Chanson (2010b).

@2021 JPPDAS All rights reserved. Open access under CC BY-NC-SA license.

E-ISSN:2579-5511/P-ISSN:2579-6097



Gambar (*Figure*) 4. Grafik permukaan bebas terhadap waktu dengan menerapkan ukuran kisi *irregular*, $\Delta x \neq \Delta y$ (*Graph of free surface to time with irregular grid size,* $\Delta x \neq \Delta y$)
Sumber (*Source)*: Analisis data (*Data analysis*), 2021

Dari hasil perhitungan, Tipe F memiliki nilai korelasi yang lebih tinggi terhadap data acuan dibandingkan dengan dua tipe lainnya. Persentase galat dari simulasi Tipe F memiliki nilai yang lebih kecil dibandingkan dengan dua tipe lainnya (Tabel 3). Hal ini menunjukkan bahwa simulasi yang dibangun pada Tipe F telah menghasilkan permukaan bebas yang mendekati data acuan. Selain itu, waktu perhitungan dalam membangun simulasi pada Tipe F lebih singkat jika dibandingkan dengan dua tipe lainnya. Oleh karena itu, parameter numerik yang telah digunakan dalam membangun simulasi Tipe F dapat diadopsi untuk membangkitkan empat simulasi *undular bores* berdasarkan bilangan *Froude* yang berbeda.

C. Uji pengaruh parameter energi kinetik turbulen *k*

Setelah mendapatkan ukuran kisi yang terbaik, selanjutnya dilakukan uji parameter energi kinetik turbulen *k* yang diterapkan dalam simulasi ini. Parameter *k* berperan dalam mempengaruhi proses turbulen yang terjadi antara air dan batas permukaan padat. Interaksi antara air dan batas permukaan padat dalam simulasi ini dapat dianalogikan seperti interaksi antara aliran sungai dengan dasar atau tebing sungai. Namun dalam paper ini tidak akan membahas variasi nilai *k* dalam mempengaruhi kekuatan air untuk menggerus batas permukaan padat. Kajian tentang pengaruh nilai *k* terhadap proses turbulen ini memerlukan pembahasan yang lebih dalam yang bisa dilakukan dengan pendekatan numerik. Tujuan dalam uji ini adalah untuk melihat pengaruh nilai *k* dalam membentuk permukaan bebas pada kasus *undular bores*. Untuk melakukan uji ini, digunakan ukuran kisi Tipe F yang telah diterapkan pada uji sebelumnya. Variasi nilai *k* yang diuji dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel (*Table*) 3. Hasil simulasi dengan ukuran kisi *irregular*, $\Delta x \neq \Delta y$ (*Simulation result with irregular grid size,* $\Delta x \neq \Delta y$)

Tipe (*Type*)	Δx (m)	Δy (m)	Waktu (*Time*) (detik)	*R*	*Galat* (%)
F	0.010	0.0025	1181	0.9549	1.20
G	0.008	0.0025	3616	0.9547	1.22
H	0.006	0.0025	8651	0.9049	1.73

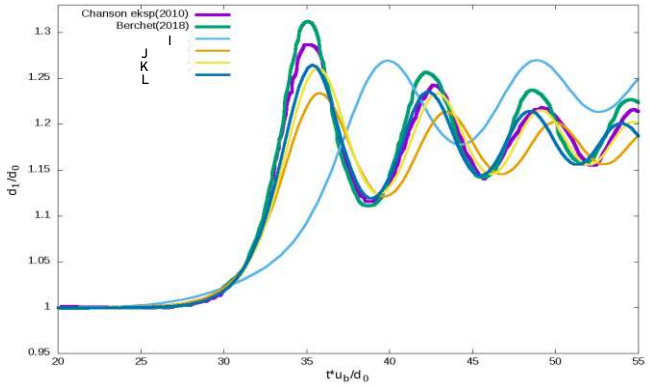
Sumber *(Source):* Analisis data (*Data analysis*), 2021

@2021 JPPDAS All rights reserved. Open access under CC BY-NC-SA license.

Untuk menguji pengaruh nilai *k* dalam membentuk permukaan bebas yang mendekati data acuan maka telah dibangun empat simulasi dengan empat nilai *k* yang berbeda seperti diperlihatkan pada Tabel 4 (kolom 2). Selanjutnya bentuk permukaan bebas dari empat tipe simulasi tersebut diplot terhadap waktu seperti ditunjukkan pada Gambar 5. Secara kualitatif, Tipe L pada Gambar 5 memperlihatkan bentuk permukaan bebas yang mendekati data acuan. Puncak dan lembah gelombang pada tipe L memperlihatkan pola permukaan bebas yang mirip data acuan. Untuk lebih menguatkan kesimpulan di atas, maka telah dihitung nilai koefisien korelasi R dan persentase galat seperti yang diperlihatkan pada Tabel 4. Berdasarkan nilai koefisien korelasinya, Tipe L menunjukkan hubungan yang paling tinggi terhadap data eksperimen. Berdasarkan persentase galatnya, Tipe L juga memberikan nilai terkecil yang menandakan data permukaan bebas hasil simulasi telah mendekati data acuan. Untuk waktu perhitungannya, Tipe L juga memberikan nilai yang moderat untuk sebuah perhitungan numerik. Oleh karena itu, nilai parameter *k* yang diterapkan dalam Tipe L dapat dipilih untuk membangun simulasi *undular bores* dengan variasi bilangan *Froude.*

D. Simulasi permukaan bebas *undular bores* dengan variasi bilangan *Froude*

Dengan menggunakan parameter terbaik dari hasil tiga uji yang telah dilakukan sebelumnya, maka dibangun lima simulasi *undular bores* dengan lima variasi bilangan *Froude*, yaitu *Fr = 1,0;1,1;1,2;1,3;* dan *1,4.* Domain komputasi dari lima simulasi yang dibangun adalah sama seperti pada Gambar 1. Kedalaman air awal (h_1) diberikan seperti pada Tabel 5 (kolom 2). Nilai kecepatan air awal (V_0) diatur seperti pada Tabel 5 (kolom 3). Pada Tabel 5, tiga kolom terakhir masing-masing adalah kedalaman rata-rata permukaan bebas *undular bores* (h_2), kecepatan aliran *bores* (V_b), dan bilangan *Froude (Fr)* (Gambar 2).



Gambar (*Figure*) 5. Grafik permukaan bebas terhadap waktu berdasarkan variasi nilai *k* (*Graph of free surface with time using various k*)
Sumber *(Source)*: Analisis data (*Data analysis*), 2021

Tabel (*Tabel*) 4. Hasil simulasi dengan variasi nilai *k* (*Simulation results with various k*)

Tipe (*Type*)	*k* (m^2/s^2)	*R*	*Galat* (%)	Waktu dalam detik (*Time in second*)
I	10^{-1}	0.403	5.42	7047
J	10^{-3}	0.953	1.64	6850
K	10^{-5}	0.964	1.05	4965
L	10^{-7}	0.979	0.99	2661

Sumber (*Source*): Analisis data (*Data analysis*), 2021

@2021 JPPDAS All rights reserved. Open access under CC BY-NC-SA license.

E-ISSN:2579-5511/P-ISSN:2579-6097

Ketiga parameter ini selanjutnya diamati secara langsung dan diukur nilainya untuk lima simulasi *undular bores* yang dibangun. Data yang ditampilkan pada Tabel 5 memperlihatkan sebuah pola peningkatan kedalaman rata-rata permukaan bebas *undular bores* (h_2) seiring dengan meningkatnya nilai *Fr*. Peningkatan nilai *Fr* dipengaruhi oleh kecepatan air awal (V_0). Di alam, V_0 berasosiasi dengan kecepatan aliran sungai dari arah hulu, sedangkan V_b berasosiasi dengan aliran *tidal bores* dari arah muara. Berdasarkan lima simulasi yang dibangun dapat dilihat bahwa pengaruh kecepatan sungai dari arah hulu akan meningkatkan kedalaman permukaan bebas *undular bores* (h_2). Hal ini dapat dijelaskan berdasarkan persamaan (8) yang memberikan sebuah hubungan antara V_0, V_b, dan *Fr*. Semakin besar V_0, V_b maka *Fr* juga akan semakin besar, sedangkan hubungan antara nilai *Fr* dengan peningkatan h_2 dapat dijelaskan berdasarkan persamaan (7) yang menyatakan bahwa semakin besar nilai *Fr* akan berdampak pada peningkatan kedalaman permukaan bebas dari *undular bores* (h_2). Peningkatan V_b dan h_2 dapat berpengaruh pada peningkatan energi kinetik dan potensial yang dibawa oleh gelombang *undular bores* ini. Semakin besar energi yang dibawa dalam gelombang ini maka akan semakin memperkuat kekuatan gesekan erosi (*erosion shear strength*) dari sebuah aliran *bores* yang dapat berdampak pada kerusakan dasar dan tebing sungai yang dilaluinya.

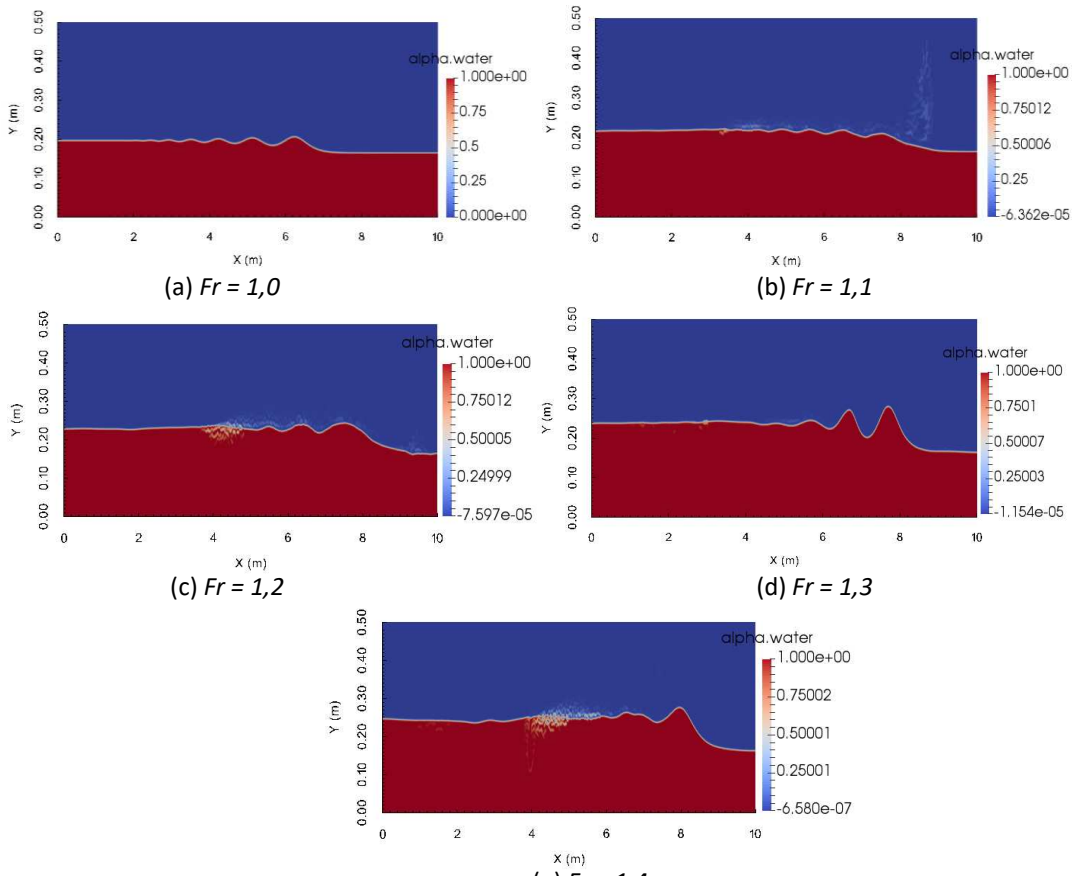
Secara kualitatif, permukaan bebas *undular bores* berdasarkan lima variasi bilangan *Froude* ditunjukkan seperti pada Gambar 6. Untuk setiap *Fr* terlihat bahwa amplitudo gelombang *undular bores* berbeda satu sama lain. Amplitudo gelombang *undular bores* semakin meningkat seiring dengan meningkatnya nilai *Fr*. Pada *Fr* terkecil (*Fr* = 1,0), jumlah gelombang terbentuk lebih banyak dibandingkan pada Fr terbesar (Fr = 1,4). Namun, amplitudo gelombang yang terbentuk pada Fr terbesar lebih tinggi dibandingkan pada Fr terkecil. Ketinggian amplitudo gelombang ini akan mempengaruhi kekuatan gelombang *undular bores* dalam menggerus dasar dan tebing sungai yang dilaluinya. Di sisi lain, semakin besar *Fr* telah mempengaruhi penurunan panjang gelombang dari *undular bores*. Bentuk permukaan bebas pada gelombang *undular bores* semakin pecah seiring dengan bertambahnya nilai *Fr*. Berdasarkan studi oleh Putra *et al*., (2019), jika *Fr* ditingkatkan menjadi lebih besar dari 1,4 (*Fr*> 1,4) maka amplitudo dan panjang gelombang pada permukaan bebasnya akan semakin menurun dan tipe *tidal bores* akan berubah dari *undular bores* menjadi *breaking bores* dengan kedalaman rata-rata permukaan bebas (h_2) yang semakin besar. Kekuatan *tidal bores* tipe *breaking* ini lebih besar dalam mengerosi dasar dan tebing sungai yang dilewatinya. Namun pembahasan tentang *breaking tidal bores* ini tidak akan disampaikan di dalam artikel ini.

@2021 JPPDAS All rights reserved. Open access under CC BY-NC-SA license.

Tabel (*Table*) 5. Parameter dan hasil simulasi (*Parameter and simulation results*)

No.	h_1 (m)	V_0 (m/s)	h_2 (m)	V_b (m/s)	F_r
1	0.165	-0.23	0.196	0.87	1.0
2	0.165	-0.52	0.216	0.90	1.1
3	0.165	-0.65	0.227	0.92	1.2
4	0.165	-0.78	0.237	0.95	1.3
5	0.165	-0.91	0.245	0.98	1.4

Sumber (*Source*)*:* Analisis data *(Data analysis)*, 2021



Gambar (*Figure*) 6. Permukaan bebas *undular bores* pada*t = 8 detik* dengan variasi bilangan *Froude* (*Free surface of undular bores at t = 8 second with various Froude number)*

Sumber *(Source):* Analisis data (*Data analysis*), 2021

E. Analisis amplitudo (a_w) dan panjang gelombang (L_w) *undular bores*

Dari lima simulasi *undular bores* yang telah dibuat menunjukan bahwa amplitudo (a_w) dan panjang gelombang (L_w) pada permukaan bebas memiliki bentuk yang berbeda satu sama lain. Untuk menentukan a_w dan L_w pada studi ini, digunakan persamaan (1) dan (2) yang telah dijelaskan dalam bagian metode penelitian. selanjutnya nilai a_w dan L_w dibandingkan dengan hasil perhitungan yang telah diperoleh oleh Lemoine (1948), Andersen (1978), dan Berry (2018). Hasil perhitungan a_w dan L_w juga dibandingkan dengan hasil simulasi numerik yang telah dikerjakan oleh Putra *et al*. (2019) dan Simon (2013), serta hasil eksperimen dari

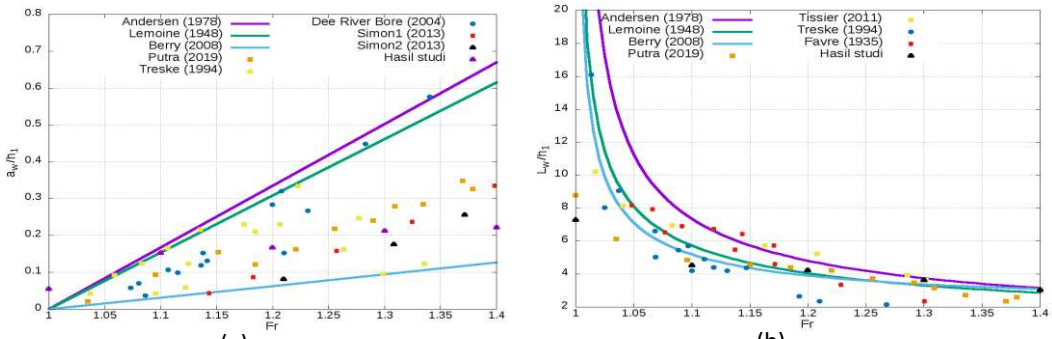
@2021 JPPDAS All rights reserved. Open access under CC BY-NC-SA license.

E-ISSN:2579-5511/P-ISSN:2579-6097

beberapa literatur ilmiah seperti ditunjukan pada Gambar 7. Hasil perhitungan a_w dan L_w dari lima simulasi yang dibangun memperlihatkan pola kurva yang mirip dengan hasil dari berbagai referensi ilmiah. Gambar 7 memperlihatkan bahwa permukaan bebas *undular bores* dapat dikarakterisasi oleh nilai a_w dan L_w. Nilai a_w dan L_w dipengaruhi oleh variasi bilangan *Froude* (*Fr*) yang merupakan fungsi dari kecepatan aliran bores (V_b), kecepatan aliran sungai (V_0), kedalaman sungai (h_1), dan percepatan gravitasi (*g*). Pada Gambar 7 (a) memperlihatkan perubahan a_w terhadap kedalaman awal air (h_1) yang semakin meningkat ketika *Fr* menuju nilai 1,4. Sebaliknya, pada Gambar 7(b), nilai L_w semakin menurun ketika *Fr* menuju nilai 1,4. Menurut Putra *et al*. (2019), penurunan L_w dan peningkatan a_w dipengaruhi oleh tekanan yang terjadi diantara dua aliran yang saling bertabrakan, yaitu aliran *bores* dari muara dan aliran sungai dari hulu. Ketika bilangan *Froude* semakin besar maka tekanan diantara kedua aliran ini juga semakin besar yang berdampak pada mengecilnya panjang gelombang dari *undular bores*. Di sisi lain, tekanan yang besar diantara kedua aliran yang berlawanan tersebut membuat gelombang depan dari *undular tidal bores* semakin besar yang sekaligus meningkatkan ketinggian dari amplitudonya.

E. Pengaruh bilangan *Froude* (*Fr*) terhadap koefisien gaya geser (ϵ) dan energi disipasi (ΔE)

Gaya geser akibat gelombang adalah salah satu cara untuk mengukur kekuatan gelombang *undular bores* dalam mengerosi dasar dan tebing sungai yang dilaluinya (Zhu *et al*., 2017). Untuk mengukur kekuatan gelombang *undular bores*ini maka dihitung koefisien gaya geser ϵ berdasarkan pada persamaan (9) (Ead & Rajaratnam, 2002). Hasil perhitungan ϵ selanjutnya diplot sebagai fungsi dari *Fr* seperti diperlihatkan pada Gambar 8. Grafik hubungan antara *Fr* dan ϵ pada Gambar 8 telah menunjukkan hubungan yang linier dengan nilai koefisien determinasi $R^2 = 0.9195$ yang berarti bahwa nilai bilangan *Froude* sangat berpengaruh signifikan terhadap besarnya koefisien gaya geser.

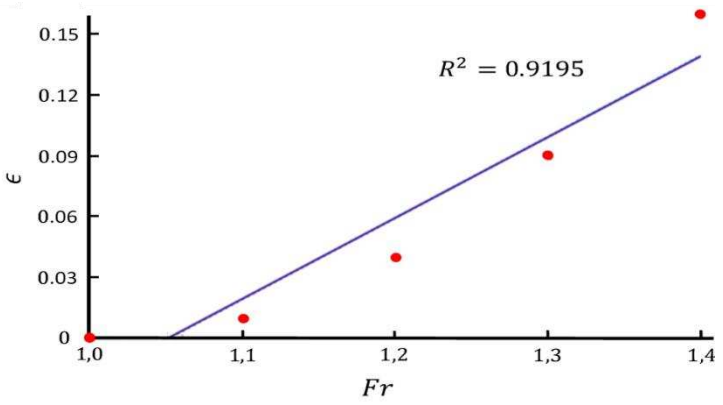


(a) (b)

Gambar (*Figure*) 7. Grafik hubungan bilangan *Froude dengan*: (a) amplitudo gelombang a_w, dan (b) panjang gelombang L_w (*Relationship graph of Froude number with: (a) the wave amplitude a_w, and (b) wavelength*)

Sumber (*Source*): Analisis data (*Data analysis*), 2021

@2021 JPPDAS All rights reserved. Open access under CC BY-NC-SA license.



Gambar (*Figure*) 8. Grafik hubungan variasi bilangan *Froude* (*Fr*) dan koefisien gaya geser (*ϵ)* (*Relationship graph of the Froude number (Fr) and shear force coefficient* (*ϵ)*)
Sumber (*Source*): Analisis data (*Data analysis*), 2021

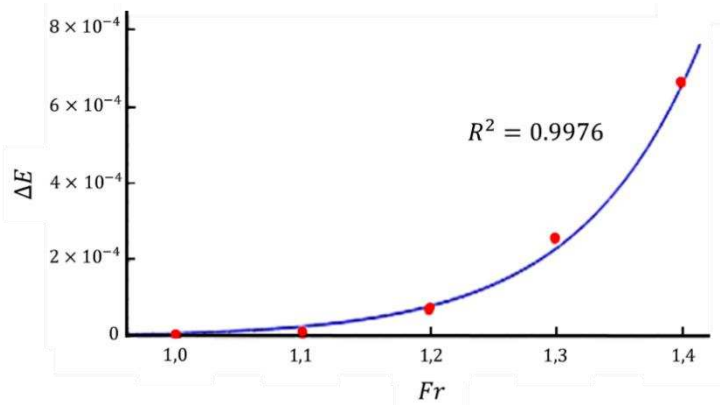
Sebagai tambahan, Hassanpour *et al*. (2017) juga telah mengkaji pengaruh dari nilai *Fr* terhadap ϵ dan menyimpulkan bahwa semakin besar *Fr* maka koefisien gaya geser ϵ akan besar pula. Kesimpulan yang didapat dalam kajian Hassanpour *et al*. (2017) telah memperkuat hasil perhitungan yang diperoleh dalam penelitian ini.

Gambar 8 memperlihatkan sebuah hubungan antara koefisien gaya geser (*ϵ)* dari gelombang *undular bores* terhadap lima variasi bilangan *Froude*, *Fr* = 1,0; 1,1; 1,2; 1,3; dan 1,4. Nilai *Fr* diukur secara langsung dari lima simulasi *undular bores* yang dibuat. Nilai *Fr* dipengaruhi oleh kecepatan awal air V_0 dan kecepatan aliran bores V_b yang keduanya berasosiasi dengan kecepatan aliran sungai dari hulu dan kecepatan aliran *tidal bores* dari muara. Kecepatan aliran sungai dari hulu dapat mempengaruhi besarnya nilai bilangan *Froude* yang terukur. Semakin besar kecepatan aliran sungai dari hulu akan membuat nilai bilangan *Froude* semakin besar. Di sisi lain, berdasarkan definisi yang dinyatakan oleh Ead & Rajaratnam (2002), bilangan *Froude* juga dapat mengkarakterisasi koefisien gaya geser dari sebuah lompatan hidraulik, termasuk dalam kasus *tidal bores*. Menurut Zhu *et al*. (2017), gaya geser akibat gelombang dapat digunakan untuk mengukur kekuatan gelombang dalam mengerosi dasar dan tebing sungai yang dilaluinya. Sehingga dengan melihat hubungan yang ditampilkan dalam Gambar 8 maka dapat dijelaskan bahwa bilangan *Froude* dalam setiap aliran *bores* dapat memberikan pengaruh yang signifikan dalam mengerosi tebing atau dinding sungai yang dilaluinya. Semakin besar bilangan *Froude* yang dihasilkan dalam sebuah kasus *tidal bores* maka akan berdampak pada kekuatan erosi dari gelombang *tidal bores* yang pada akhirnya dapat berpengaruh pada besarnya kerusakan yang dihasilkan oleh aliran *tidal bores* tersebut.

Selanjutnya, energi disipasi (ΔE) yang dibawa oleh gelombang *undular bores* dari lima simulasi yang dibuat telah dihitung dengan menggunakan persamaan (11) (Lubin & Chanson, 2017). Kemudian, nilai ΔE hasil perhitungan diplot sebagai fungsi dari *Fr* seperti diperlihatkan pada Gambar 9.

@2021 JPPDAS All rights reserved. Open access under CC BY-NC-SA license.

E-ISSN:2579-5511/P-ISSN:2579-6097



Gambar (*Figure*) 9. Grafik hubungan energi disipasi (ΔE)dan variasi bilangan *Froude* (*Fr*) (*The relationship graph of the dissipationenergy* (ΔE) *and Froude number (Fr)*)
Sumber (*Source*): Analisis data (*Data analysis*), 2021

Grafik hubungan antara *Fr* dan ΔE pada Gambar 9 menunjukkan sebuah hubungan eksponensial dengan nilai koefisien determinasi $R^2 = 0.9976$ yang berarti bahwa nilai bilangan *Froude* sangat berpengaruh signifikan terhadap besarnya energi disipasi yang dibawa oleh sebuah gelombang *tidal bores*.

Berdasarkan Gambar 9 dapat dilihat bahwa bilangan *Froude* telah memberikan pengaruh yang sangat signifikan terhadap peningkatan energi disipasi (ΔE) yang dilepaskan oleh gelombang *tidal bores*. Jika diamati, nilai ΔE yang dihasilkan oleh gelombang tidal bores dengan bilangan *Froude* dari 1,0 sampai 1,4 masih relatif kecil. Ini menunjukkan bahwa pada *tidal bores*tipe *undular,* gelombang yang dihasilkan pada permukaan bebasnya tidak terlalu kuat untuk merusak tebing sungai yang dilaluinya. Oleh karena itu, seberapa besar kekuatan dari energi yang terkandung dalam fenomena *tidal bores* ini perlu dikaji secara langsung di lapangan.

IV. KESIMPULAN

Kajian tentang fenomena *undular tidal bores* di alam telah dilakukan secara numerik dengan membangun simulasi *undular bores* menggunakan bantuan perangkat lunak *open-source, OpenFOAM* yang menerapkan model turbulen *k-Omega*. Lima simulasi *undular bores* telah berhasil dibangun berdasarkan pada lima variasi bilangan *Froude*, yaitu *Fr* = 1,0; 1,1; 1,2; 1,3; dan 1,4. Penerapan ukuran kisi *irregular,* $\Delta x \neq \Delta y$, dalam domain komputasi dapat membantu dalam membentuk permukaan bebas *undular bores* yang mengikuti pola permukaan bebas dari data acuan. Pemilihan nilai parameter energi kinetik turbulen *k* yang lebih kecil juga memberikan dampak pada pembentukan permukaan bebas *undular bores* yang mendekati data acuan dan mengurangi waktu perhitungan yang dilakukan oleh *OpenFOAM*. Hasil analisis amplitudo dan panjang gelombang *undular bores* telah memperlihatkan bahwa simulasi *undular bores* yang dibangun dalam penelitian ini telah mengikuti pola yang dihasilkan dalam penelitian-penelitian sebelumnya. Amplitudo dan panjang gelombang *undular bores* dipengaruhi oleh nilai dari bilangan *Froude*. Bilangan *Froude* yang besar akan berdampak pada peningkatan amplitudo gelombang. Sebaliknya, bilangan *Froude*

@2021 JPPDAS All rights reserved. Open access under CC BY-NC-SA license.

yang besar akan mengurangi panjang gelombang *undular bores.*

Potensi gelombang *undular tidal bores* dalam mengerosi tebing sungai telah dibahas dengan melihat nilai koefisien gaya gesek (ϵ) dan energi disipasi (ΔE) dari gelombang pada lima simulasi *undular bores.* Kedua parameter ini dikarakterisasi oleh sebuah parameter tak berdimensi, *Fr*, yang merupakan fungsi dari kecepatan aliran sungai dari hulu, kecepatan aliran *tidal bores* dari muara, kedalaman sungai, dan percepatan gravitasi. Berdasarkan hasil analisis dan pembahasan dapat disimpulkan bahwa besarnya bilangan *Froude* telah memberikan dampak yang signifikan terhadap nilai dari koefisien gaya geser dan energi disipasi gelombang. Semakin besar nilai *Fr* akan berpengaruh pada peningkatan nilai ϵ secara linier. Peningkatan nilai *Fr* juga berdampak pada peningkatan nilai ΔE secara eksponensial. Pengaruh nilai *Fr* terhadap peningkatan nilai ϵ dan ΔE dapat mengarahkan kepada sebuah kesimpulan bahwa kekuatan erosi dalam sebuah fenomena *undular tidal bores* dapat ditentukan berdasarkan pada bilangan *Froude.* Untuk memperkuat kajian dalam artikel ini, penelitian lapangan terkait dengan pengaruh bilangan *Froude* dalam sebuah proses erosi pada tebing sungai harus dilakukan secara komprehensif.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terimakasih kepada Program Studi Geofisika, Jurusan Fisika, FMIPA, Universitas Tanjungpura yang telah memfasilitasi kegiatan riset dosen dan mahasiswa hingga dapat dipublikasikan dalam jurnal ini. Ucapan terimakasih juga disampaikan pada Laboratorium Geofisika dan SIG Program Studi Geofisika, Jurusan Fisika, FMIPA, Universitas Tanjungpura tempat dimana simulasi numerik dalam riset ini dibangun.

KONTRIBUSI PENULIS

Kontribusi penulis pertama dalam artikel ini adalah dalam hal memberikan ide, membantu analisis data dari simulasi yang dibangun, serta membuat pembahasan yang berhubungan dengan fenomena *undular tidal bores* dalam mempengaruhi proses erosi pada daerah aliran sungai. Sedangkan kontribusi penulis kedua adalah membuat simulasi, mengolah dan menganalisis data simulasi. Penulis ketiga berkontribusi dalam membantu analisis data dari simulasi yang dibuat.

DAFTAR PUSTAKA

Berchet, A., Simon, B., Beaudoin, A., Lubin, P., Rousseaux, G., & Huberson, S. (2018). Flow fields and particle trajectories beneath a tidal bore: A numerical study. *International Journal of Sediment Research*, 33(3), 351–370. https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2018.03.001

Berry, M. V. (2018). Minimal analytical model for undular tidal bore profile; Quantum and Hawking effect analogies. *New Journal of Physics*, 20(5). https://doi.org/10.1088/1367-2630/aac285

Bonneton, P., Filippini, A. G., Arpaia, L., Bonneton, N., & Ricchiuto, M. (2016). Conditions for tidal bore formation in convergent alluvial estuaries. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 172, 121–127. https://doi.org/10.1016/j.ecss.2016.01.019

@2021 JPPDAS All rights reserved. Open access under CC BY-NC-SA license.

Chanson, H., & Tan, K. K. (2011). Dispersion of fish eggs under undular and breaking tidal bores. *Fluid Dynamics and Materials Processing*,7(4), 403–418. https://doi.org/10.3970/fdmp.2011.007.403

Chanson, H. (2010). Environmental, ecological and cultural impacts of tidal bores, Burros and Bonos. Environmental hydraulics: Theoretical, experimental and computational solutions. *Proceedings of the International Workshop on Environmental Hydraulics, IWEH, October2009*. https://doi.org/10.1201/b10999-3

Furgerot, L., Mouazé, D., Tessier, B., Perez, L., Haquin, S., Weill, P., & Crave, A. (2016). Sediment transport induced by tidal bores. An estimation from suspended matter measurements in the Sée River (Mont-Saint-Michel Bay, northwestern France). *Comptes Rendus-Geoscience*, 348(6), 432–441. https://doi.org/10.1016/j.crte.2015.09.004

Khezri, N. (2013). Modelling turbulent mixing and sediment process beneath tidal bores : Physical and numerical investigations. (Dissertation, University of Queensland, Brisbane, Australia).

Leng, X., Lubin, P., & Chanson, H. (2017). CFD modelling of breaking and undular tidal bores with physical validation. *38th IAHR World Congress*, 7(1), 1562–6865.

Lubin, P., & Chanson, H. (2017). Are breaking waves, bores, surges and jumps the same flow? *Environmental Fluid Mechanics*, 17(1), 47–77. https://doi.org/10.1007/s10652-016-9475-y

Siddiq N. L. (2017). Simulasi numerik fenomena tidal bore di kanal sintetik. (Skripsi, ITB).

Putra, Y. S., Beaudoin, A., Rousseaux, G., Thomas, L., & Huberson, S. (2019). 2D numerical contributions for the study of non-cohesive sediment transport beneath tidal bores. *Comptes Rendus-Mecanique*, 347(2), 166–180. https://doi.org/10.1016/j.crme.2018.11.004

Rousseaux, G., Mougenot, J. M., Chatellier, L., David, L., & Calluaud, D. (2016). A novel method to generate tidal-like bores in the laboratory. *European Journal of Mechanics, B/Fluids*, 55, 31–38. https://doi.org/10.1016/j.euromechflu.2015.08.004

Treske, A. (1994). Undular bores (favre-waves) in open channels - experimental studies: Ondes de favre dans les canaux découverts - etudes expérimentales. *Journal of Hydraulic Research*, 32(3), 355–370. https://doi.org/10.1080/00221689409498738

Dean, R.G.,& Dalrymple, R.A. (1993). Water wave mechanic for engineer and scientist. Singapore: World Scientific Publishing.

Lemoine, R. (1948). Sur les ondes positives de translation dans les canaux et sur le ressaut ondulé de faible amplitude. French. *La Houille Blanche,*2, 183–185.

Andersen, V. (1978). Undular hydraulic jump. *Journal of the Hydraulics Division-Asce* 104(8), pp. 1185–1188.

Zhu, C.,Jia, Y., Liu, X., Guo, L., Shan, H., Zhang, M., Wang, Z., &Fu, Y. (2017). Influence of waves and currents on sediment erosion and deposition based on in-situ observation: Case Study in Baisha Bay, China. *Journal of Marine Environmental Engineering*, 10(1), 29-43.

Ead, S.A., & Rajaratnam, N. (2002). Hydraulic jumps on corrugated beds. *Journal of Hydraulic Engineering*, 128, 656-663.

@2021 JPPDAS All rights reserved. Open access under CC BY-NC-SA license.

Halaman ini dibiarkan kosong.

@2021 JPPDAS All rights reserved. Open access under CC BY-NC-SA license.