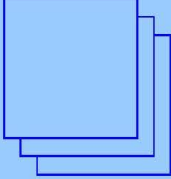


Volume 14 Nomor 1 April 2018

**ISSN (cetak) 1411-9331
ISSN (online) 2549-7219**



JURNAL TEKNIK SIPIL

**Prioritas Penanganan Lokasi Rawan Kecelakaan (LRK)
Di Provinsi Sumatera Utara**
(Budi Hartanto Susilo, Lutfiardi Wahyu Cahyadi)

Kompresibilitas Tanah Organik
(Asriwiyanti Desiani)

**Kajian Modulus Tanah Berdasarkan Uji Lapangan
Dan Uji Laboratorium**
(Cindarto Lie)

Transformasi Gelombang Soliter Oleh Fleksibilitas Vegetasi Pantai
(Tri Octaviani Sihombing)

**Kajian Evaluasi Kinerja Bangunan Terhadap Siaga
Bencana Gempa**
(Rofika Sinaga, Cindrawaty Lesmana)

J. Tek.Sipil	Vol. 14	No. 1	Hlm. 1-104	Bandung, April 2018	ISSN (cetak) 1411-9331 ISSN (online) 2549-7219
--------------	---------	-------	------------	---------------------------	---



JURNAL TEKNIK SIPIL

FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS KRISTEN MARANATHA

DAFTAR ISI :

Prioritas Penanganan Lokasi Rawan Kecelakaan (LRK) Di Provinsi Sumatera Utara <i>(Budi Hartanto Susilo, Lutfiardi Wahyu Cahyadi)</i>	1 - 25
Kompresibilitas Tanah Organik <i>(Asriwiyanti Desiani)</i>	26 - 44
Kajian Modulus Tanah Berdasarkan Uji Lapangan Dan Uji Laboratorium <i>(Cindarto Lie)</i>	45 - 62
Transformasi Gelombang Soliter Oleh Fleksibilitas Vegetasi Pantai <i>(Tri Octaviani Sihombing)</i>	63 - 76
Kajian Evaluasi Kinerja Bangunan Terhadap Siaga Bencana Gempa <i>(Rofika Sinaga, Cindrawaty Lesmana)</i>	77 - 103

TRANSFORMASI GELOMBANG SOLITER OLEH FLEKSIBILITAS VEGETASI PANTAI

Tri Octaviani Sihombing¹

Dosen Tetap, Program Studi Teknik Sipil, Universitas Kristen Maranatha

Prof. drg. Soeria Sumantri, MPH, No. 65, Bandung, 40164

e-mail: tri.octaviani@maranatha.edu

ABSTRAK

Beberapa model vegetasi gelombang disajikan dalam penelitian ini untuk mensimulasikan interaksi gelombang soliter dengan vegetasi fleksibel. CFD berdasarkan model tiga dimensi Navier-Stokes (RANS) Reynolds dengan model turbulen *renormalization group* (RNG) dikaitkan dengan metode *volume of fluid* (VOF) diterapkan untuk simulasi numerik. Penelitian ini mencoba untuk memberikan model fisik yang lebih baik dengan mempertimbangkan silinder fleksibel sebagai vegetasi untuk mensimulasikan kinerja redaman vegetasi. Transformasi gelombang dan karakteristik variasi medan alir gelombang soliter yang menyebar di kedua silinder kaku dan silinder fleksibel adalah topik yang akan dibahas. Hasil simulasi numerik menunjukkan bahwa ketika gelombang soliter merambat disekitar vegetasi yang kaku dan fleksibel, energi kinetik turbulen dan laju disipasinya dihasilkan karena interaksi antara gelombang dan silinder. Selanjutnya, hasilnya menunjukkan bahwa vegetasi kaku memperoleh reduksi tinggi gelombang yang lebih besar daripada vegetasi fleksibel. Vegetasi kaku juga mengalami energi kinetik turbulen yang lebih besar daripada yang fleksibel. Hal ini menjadi catatan penting bahwa redaman gelombang mungkin terlalu tinggi ketika mempertimbangkan sekelompok silinder kaku sebagai vegetasi pesisir untuk mensimulasikan dampak vegetasi terhadap redaman tsunami.

Kata kunci: Tsunami, Gelombang soliter, Vegetasi fleksibel, FLOW-3D

ABSTRACT

A coupled wave-vegetation model is presented in this paper for simulating the interaction of solitary waves with the emergent flexible vegetation. A CFD based on the three-dimensional Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS) with renormalization group (RNG) turbulent model associated with volume of fluid (VOF) method was applied for the numerical simulations. This study attempts to provide a better physical model by considering flexible cylinder as the vegetation to simulate damping performance of the vegetation. The wave transformations and the flow field variations characteristics of solitary waves propagating over both rigid cylinders and flexible cylinders are discussed. The numerical simulation results showed that as the solitary wave propagated over the both rigid and flexible vegetation, the turbulent kinetic energy and its dissipation rate are generated due to the interaction between wave and cylinder. Furthermore, the results indicate that the rigid vegetation obtains a greater wave height deduction than the flexible vegetation. Rigid vegetation also experienced more turbulent kinetic energy than the flexible one. This becomes an important note that the wave decay maybe overestimated by considering a group of rigid cylinders as coastal vegetation for the simulation on the effect of vegetation to tsunami damping.

Keywords: Tsunami, Solitary wave, Flexible vegetation, FLOW-3D

1. PENDAHULUAN

Bencana besar tsunami yang terjadi di Asia Tenggara telah menelan banyak korban dan menyebabkan kerusakan pada Desember 2004. Oleh karena tsunami telah menjadi ancaman yang selalu ada terhadap kehidupan dan properti di sepanjang garis pantai dunia, maka harus dilakukan upaya proaktif dalam mengembangkan cara mengurangi dampak tsunami. Bencana ini telah menimbulkan perdebatan tentang peran yang dimainkan oleh ekosistem pesisir seperti hutan mangrove dan terumbu karang dalam melindungi wilayah pesisir. Baird (2006) telah mencatat bahwa program puluhan juta dolar telah disahkan untuk memulihkan dan melestarikan vegetasi pesisir di 12 negara Asia dan Afrika untuk perlindungan pesisir terhadap tsunami di masa depan.

Untuk alasan tersebut, beberapa penulis telah menunjukkan bahwa hutan mangrove sebagai vegetasi telah memberikan perlindungan pesisir. Energi gelombang tsunami, tinggi dan kecepatan berkurang secara signifikan saat gelombang menyebar melalui hutan mangrove (Harada dan Kawata, 2004; Hiraishi dan Harada, 2003; Harada dan Imamura, 2000; Teh et al., 2009). Namun, Shuto (1987) mencatat bahwa jika ketinggian gelombang melebihi 4 m, pohon bakau mungkin tercerabut; sehingga menciptakan puing-puing yang bisa menyebabkan kerusakan sekunder.

Eksperimen laboratorium atau bahkan kerja lapangan dapat memberikan data berharga, namun sulit dikendalikan, mahal untuk dilakukan dan bahkan tidak mungkin dilakukan untuk meniru. Sebagai alternatif, pendekatan numerik telah dikembangkan untuk memprediksi dan mereproduksi efek hutan mangrove dalam perambatan gelombang tsunami. Dengan menggunakan pendekatan numerik tiga dimensi, Maza et al. (2015) mensimulasikan interaksi gelombang soliter dengan vegetasi yang muncul dan kaku. Baik Maza et al. (2015) dan Huang et al. (2011) dan peneliti lainnya (misalnya, Anderson et al, 2011.; Wu et al, 2016), vegetasi mangrove dianggap kaku yang mengabaikan gerak tanaman di bawah tindakan gelombang. Kenyataannya, batang vegetasi dapat bergerak seperti kantilever atau cambuk yang didorong oleh gelombang (Paul et al, 2012) karena vegetasi alami dapat berubah bentuk, yang mengurangi hambatan aliran.

Untuk memberikan pemodelan yang lebih baik, makalah ini mempertimbangkan vegetasi dengan menggunakan sekelompok silinder fleksibel, daripada menggunakan silinder kaku. Dalam penelitian ini, computational fluid dynamics (CFD) multi-fisika yang sangat kuat dan sangat akurat, FLOW-3D, digunakan untuk pendekatan simulasi gelombang tsunami yang berinteraksi dengan silinder fleksibel. Transformasi gelombang

dan karakteristik variasi medan alir gelombang soliter yang merambat di atas kedua silinder kaku dan silinder fleksibel, masing-masing, dibahas dalam makalah ini.

2. MODEL NUMERIK

Simulasi numerik ini dibuat dengan menggunakan persamaan Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS)) dengan model turbulen renormalization group (RNG) $k-\varepsilon$. Untuk memodelkan batas geometris kompleks dengan teknik pecahan representasi sudut/ volume (FAVOR) (Hirt dan Sicilian, 1985), persamaan kontinuitas dan momentum umum untuk arus turbulen yang masif diformulasikan dengan fungsi fraksi area dan volume, yang diberikan sebagai berikut,

$$\frac{\partial \langle u_i \rangle A_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \langle U_j \rangle A_j \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \langle p \rangle}{\partial x_i} + \frac{1}{\rho V_F} \frac{\partial}{\partial x_j} [A_j (\langle \tau_{ij} \rangle + R_{ij})] \quad (2)$$

dimana $\tau_{ij} = 2\mu S_{ij}$ dengan $S_{ij} = (\partial \langle u_i \rangle / \partial x_j + \partial \langle u_j \rangle / \partial x_i) / 2$ dengan notasi $\langle \rangle$ menunjukkan ansambel-rata-rata, u adalah komponen kecepatan dalam arah subskrip = 1, 2 mewakili arah x - dan z -, berurutan, p adalah intensitas tekanan, ρ adalah kerapatan fluida, g adalah percepatan gravitasi, dan μ adalah viskositas absolut. V_F adalah volume pecahan terbuka terhadap arus dan A adalah untuk arah subscript yang baik V_F dan A di set menjadi satu. Tegangan Reynolds R_{ij} pada Pers. (2) dituliskan dengan:

$$R_{ij} = 2\rho\nu_t S_{ij} - \frac{2}{3}\rho k \delta_{ij} \quad (3)$$

dimana ν_t adalah Eddy viskositas, k adalah energi kinetic turbulen, dan δ_{ij} adalah fungsi Kronecker delta seperti $\delta_{ij} = 1$ ketika $i = j$; $\delta_{ij} = 0$, dan $i \neq j$. Pada Pers. (3), viskositas Eddy ν_t terkait dengan efek ruang dan distribusi waktu gerak turbulen, yang diselesaikan menggunakan metode *renormalization group* (RNG $k-\varepsilon$ model). Yokhot dan Orszag (1986) mengusulkan model turbulen RNG $k-\varepsilon$ dan membuat perbaikan atas model $k-\varepsilon$.

Solusi numerik diimplementasikan dalam aplikasi Flow-3D CFD (Flow Science, 2012), memanfaatkan metode *volume of fluid* (VOF) (Hirt and Nichols, 1981) untuk secara akurat menghitung permukaan air bebas dan model efisien geometri padat menggunakan yang teknik FAVOR. Beberapa penelitian telah menerapkan Flow-3D

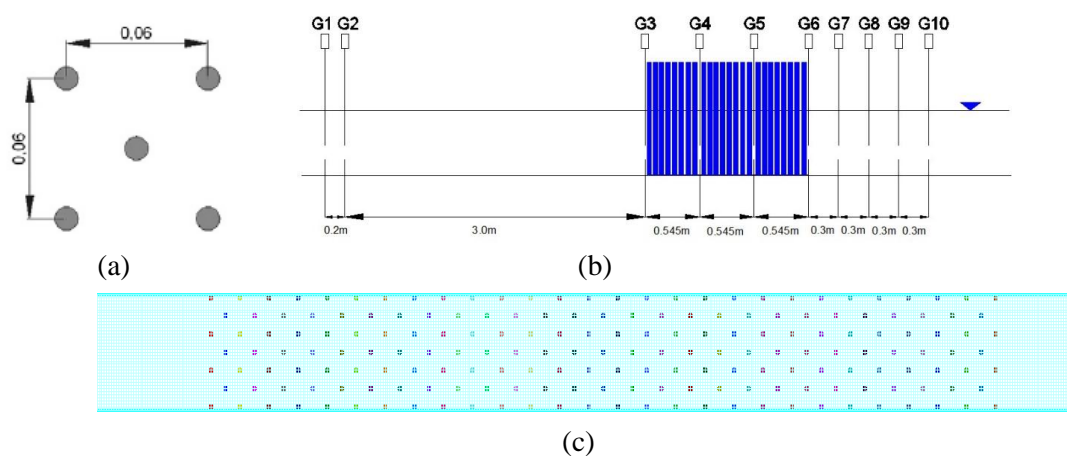
untuk mensimulasikan interaksi gelombang dan struktur, misalnya Choi *et al.* (2007) dan Dentale *et al.* (2014). Pada studi numerik kali ini, solusi dari gelombang soliter yang berasal dari persamaan Boussinesq digunakan sebagai gelombang peristiwa, yang dinyatakan sebagai:

$$\eta(x, t) = H \operatorname{sech}^2 \left[\sqrt{\frac{3H}{4h_0^3}} (x - ct) \right] \quad (4)$$

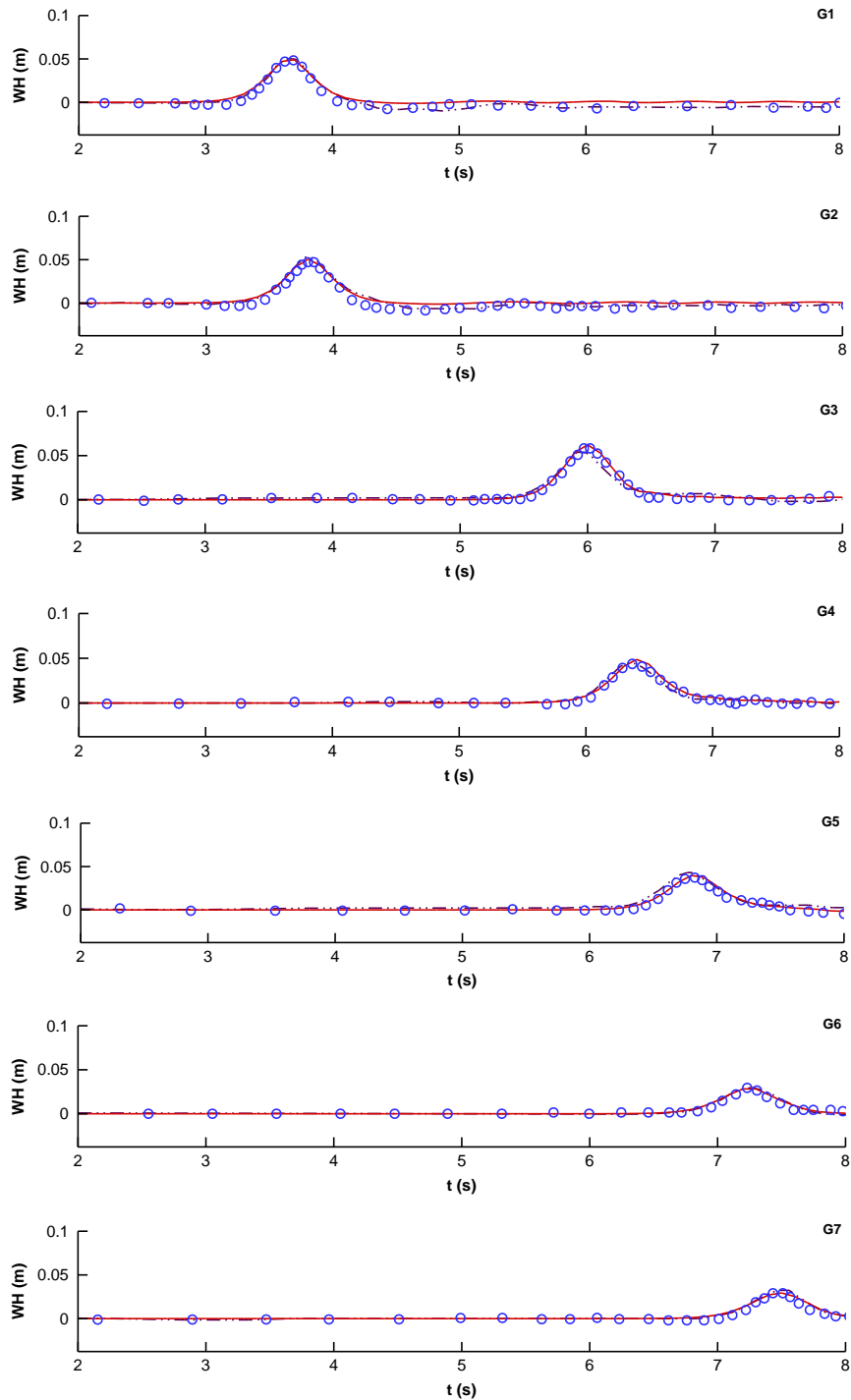
dimana η adalah elevasi permukaan bebas, h_0 adalah kedalaman muka air tetap, H tinggi gelombang, dan c adalah gelombang celerity ($c = \sqrt{g(h_0 + H)}$).

3. VALIDASI

Hasil laboratorium yang dilakukan oleh Huang *et al.* (2011) digunakan untuk melakukan validasi akurasi hasil dari model numerik yang akan disimulasikan. Simulasi ini dilakukan dengan menggunakan geometri gelombang saluran yang sama, kedalaman air dan karakteristik gelombang soliter seperti Huang *et al.* (2011). Semua tes digridnkan dalam saluran dengan panjang 32m dan lebar 0,55m, kedalaman air sama dengan $h = 0,15\text{m}$, menggunakan silinder dengan diameter 0,01 m yang muncul dengan susunan C dengan kerapatan sama dengan $N = 560$ silinder / m^2 dan panjang bidang 1,635m. Untuk mengatasi error komputasi dan memberikan akurasi hasil, ukuran mesh 0,005m di sepanjang semua domain dipilih. Kondisi batas adalah gelombang soliter sebagai x minimum, *outflow* sebagai x maksimum, dan simetri pada y minimum dan m , lalu digunakan dinding sebagai z minimum dan maksimum. Lokasi pengukur dan aturan grid (*mesh*) dapat dilihat pada Gambar 1. Tinggi gelombang relatif dari gelombang soliter, H/h , sama dengan 0,33.



Gambar 1: (a) Pengaturan silinder, (b) Lebar bidang dan posisi alat ukur dan (c) Kondisi grid (*mesh*)



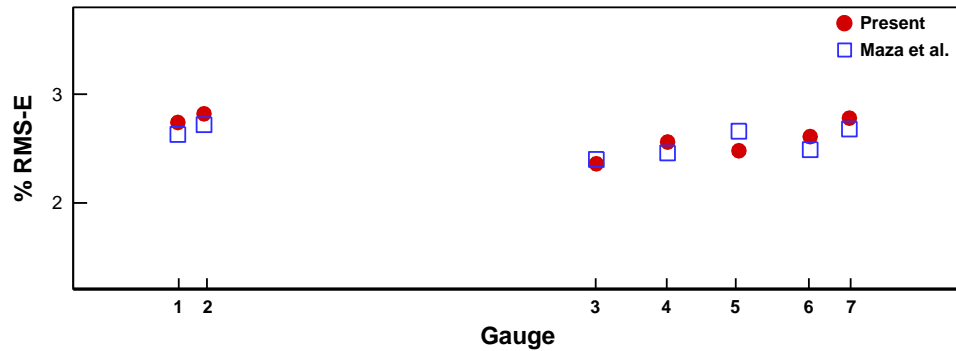
Gambar 2: Perbandingan transformasi gelombang antara studi numerik saat ini (garis merah) dan hasil eksperimen oleh Huang *et al.* (garis bulat biru), dan juga hasil numerik oleh Maza *et al.* (garis putus-putus coklat) untuk $H/h = 0.33$

Gambar 2 menunjukkan perbandingan antara hasil numerik saadan eksperimen oleh Huang *et al.* (2011). Hasil numerik oleh Maza *et al.* (2015) juga dibandingkan. *Root*

mean square error (RMSE) digunakan untuk mengukur, yang didefinisikan melalui pers. (7) diman y_i adalah nilai numerik, y_i' adalah nilai dan n adalah total data.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_0^n (y_i - y_i')^2} \quad (7)$$

Baik gambar 2 dan gambar 3 menunjukkan bahwa hasil numerik saat ini sesuai dengan hasil terukur.

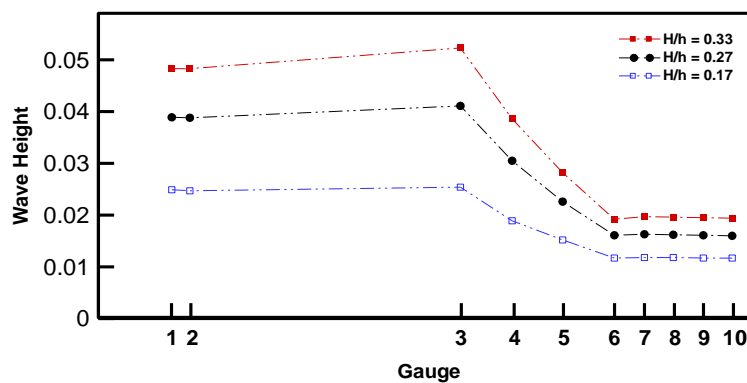


Gambar 3: RMS Error antara studi numerik saat ini (*present*) dengan hasil eksperimen (bulatan merah), dan studi numerik oleh Maza *et al.* dengan hasil eksperimen (persegi biru)

4. HASIL DAN DISKUSI

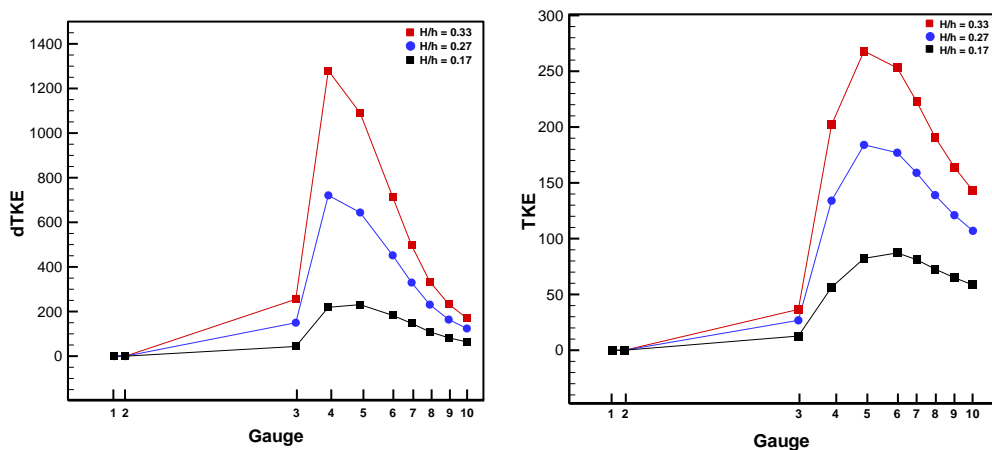
Setelah melakukan validasi terhadap Huang *et al.* (2011) dan konfirmasi dengan Maza *et al.* (2015), pengaruh dari tinggi gelombang relatif pada pengurangan tinggi gelombang akan dianalisa terlebih dulu. Tiga tinggi gelombang soliter dipilih (0.05m, 0.04m, and 0.025m) untuk disimulasikan dengan mempertimbangkan pengaturan C terhadap silinder kaku, tinggi gelombang relatif (H/h) adalah 0.33, 0.27, 0.17.

Silinder diletakkan pada lokasi antara alat ukur (*gauge*) G3 dan G6, seperti pada gambar 4, maka dapat dilihat bahwa fenomena pengurangan tinggi gelombang terlihat signifikan pada daerah tersebut.



Gambar 4: Tinggi gelombang variasi untuk silinder kaku

Untuk mengevaluasi redaman gelombang oleh silinder, energi turbulen kinetik (*turbulent kinetic energy*, TKE) dan tingkat dissipasi energi turbulen kinetik (*turbulent kinetic energy dissipation rate*, DTKE) diperhitungkan. Gambar 5 menunjukkan nilai TKE dan DTKE di setiap lokasi saat puncak gelombang soliter melewatinya. Bisa diamati bahwa TKE maksimum dihasilkan pada G4 dan DTKE maksimum dihasilkan pada G5. Mengenai pengaruh tinggi gelombang relatif, dapat dilihat bahwa tinggi gelombang yang lebih tinggi menghasilkan TKE dan DTKE yang lebih besar pula.



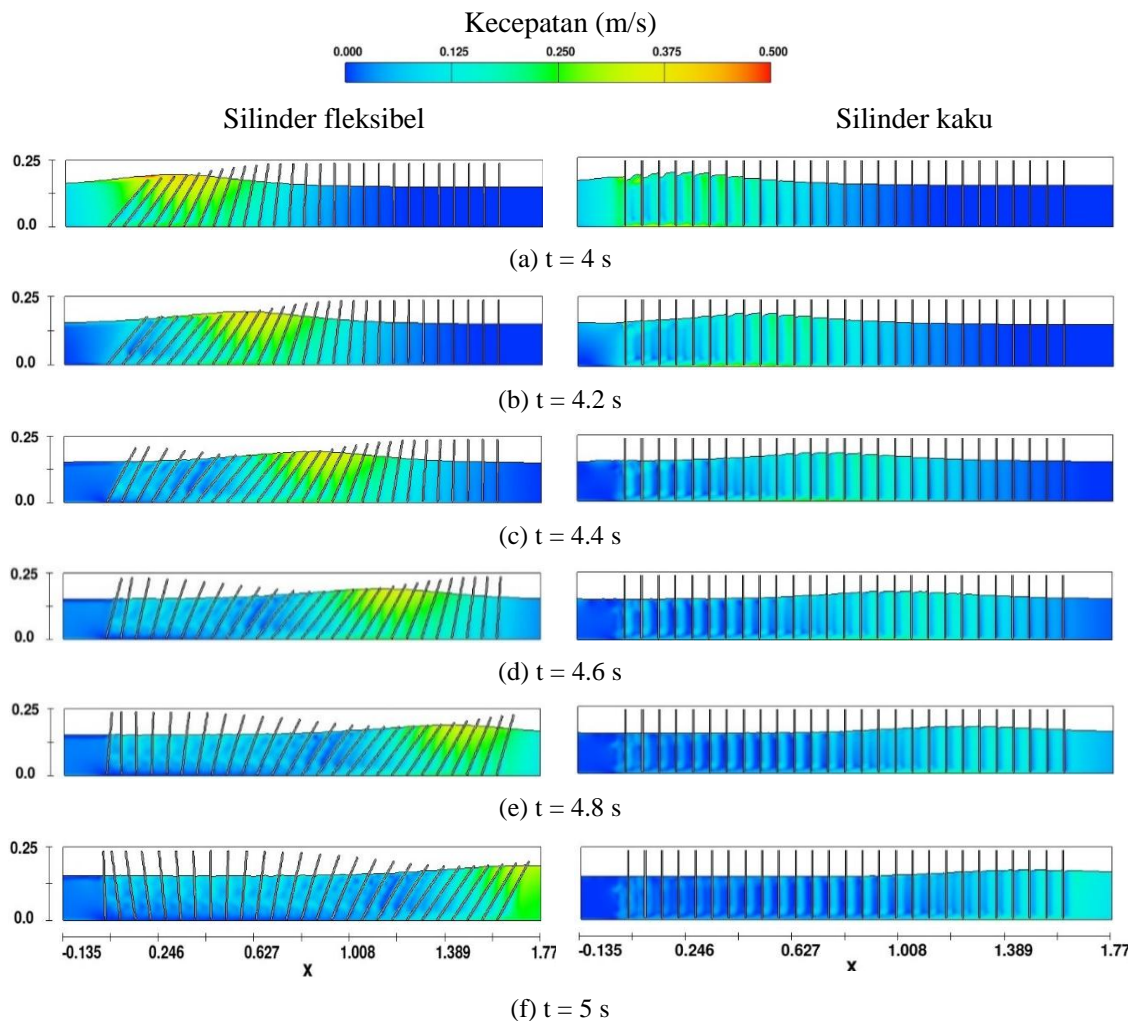
Gambar 5: Energi kinetik turbulen dan laju didipasi energi kinetik turbulen pada silinder kaku untuk 3 tinggi gelombang yang berbeda.

Karena tujuan dari penelitian ini adalah untuk memberikan model fisik yang lebih baik, kasus silinder fleksibel disimulasikan dengan kondisi gelombang yang sama seperti kasus silinder kaku. Dengan menggunakan fungsi *General Moving Object* (GMO) pada silinder kaku di bawah semua jenis gerak fisik yang digabungkan secara dinamis dengan aliran fluida, bagian simulasi ini membuat pengaturan silinder dapat bergerak dengan x derajat kebebasan (DOF). Model GMO ini bekerja baik dalam sistem koordinat Cartesian dan silinder FLOW-3D. Untuk membandingkan peredaman gelombang dengan silinder fleksibel yang muncul dan silinder kaku, tinggi gelombang relatif $H/h = 0,33$ akan dibahas.

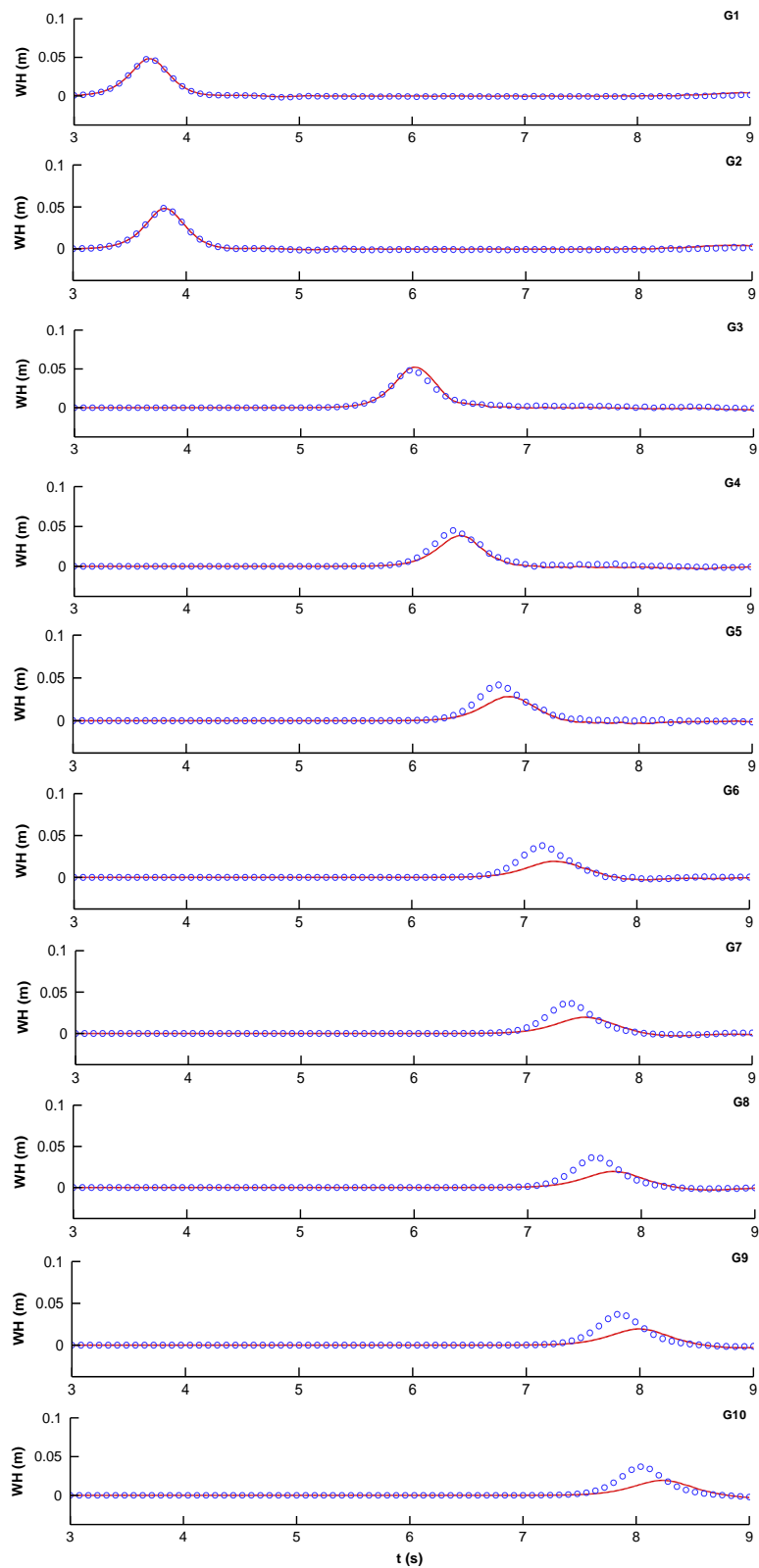
Distribusi medan kecepatan berdasarkan variasi waktu elevasi permukaan pada setiap lokasi pengukur ditunjukkan pada Gambar 6 untuk perambatan gelombang di atas silinder kaku dan silinder fleksibel. Gambar 7 menunjukkan bahwa silinder kaku terlihat bekerja lebih baik daripada silinder fleksibel untuk mengurangi tinggi gelombang.

Sebelum gelombang soliter mencapai struktur, transformasi gelombang antara silinder yang kaku dan fleksibel tidak banyak perbedaan. Namun fenomena yang berbeda

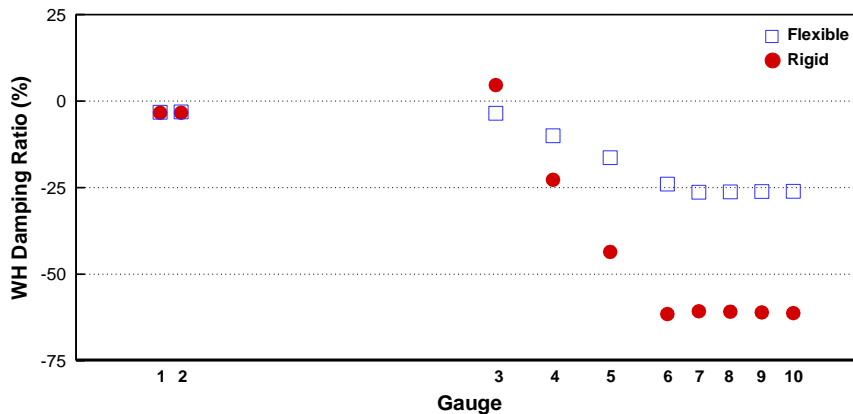
muncul dari G4 ketika dan setelah rambatan gelombang berada di atas struktur seperti ditunjukkan pada Gambar 8, tinggi gelombang meluruh lebih banyak oleh silinder kaku. Ada rasio redaman tinggi gelombang sebesar 43,5% untuk silinder yang kaku sedangkan pada silinder fleksibel hanya 16,3% pada G5. Setelah gelombang melewati silinder, rasio redaman tinggi gelombang untuk silinder fleksibel sekitar 25% tetapi sekitar 60% untuk silinder kaku.



Gambar 6: Distribusi medan kecepatan antara silinder yang kaku dan fleksibel

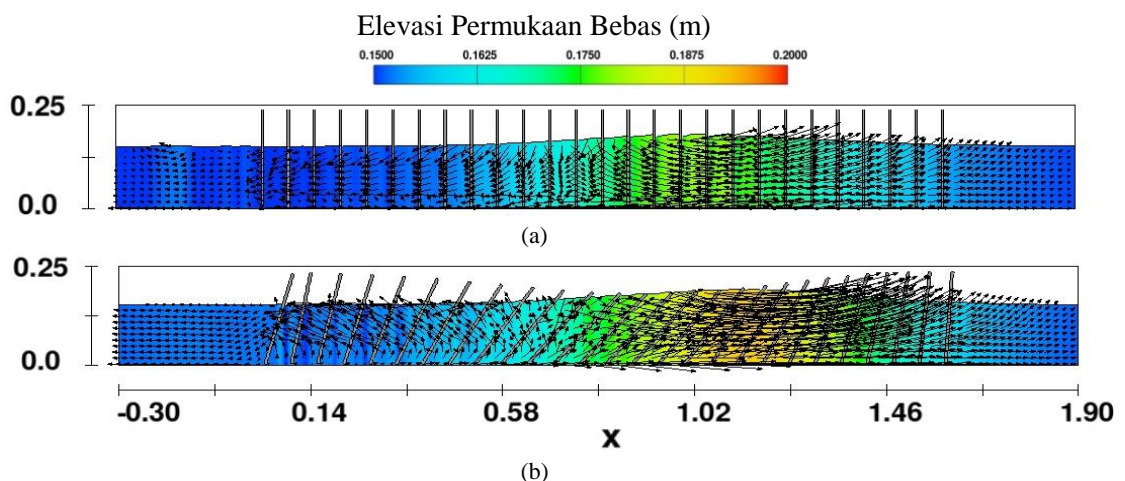


Gambar 7: Perbandingan transformasi tinggi gelombang antara silinder kaku (garis merah) dan silinder fleksibel (garis bulat biru)



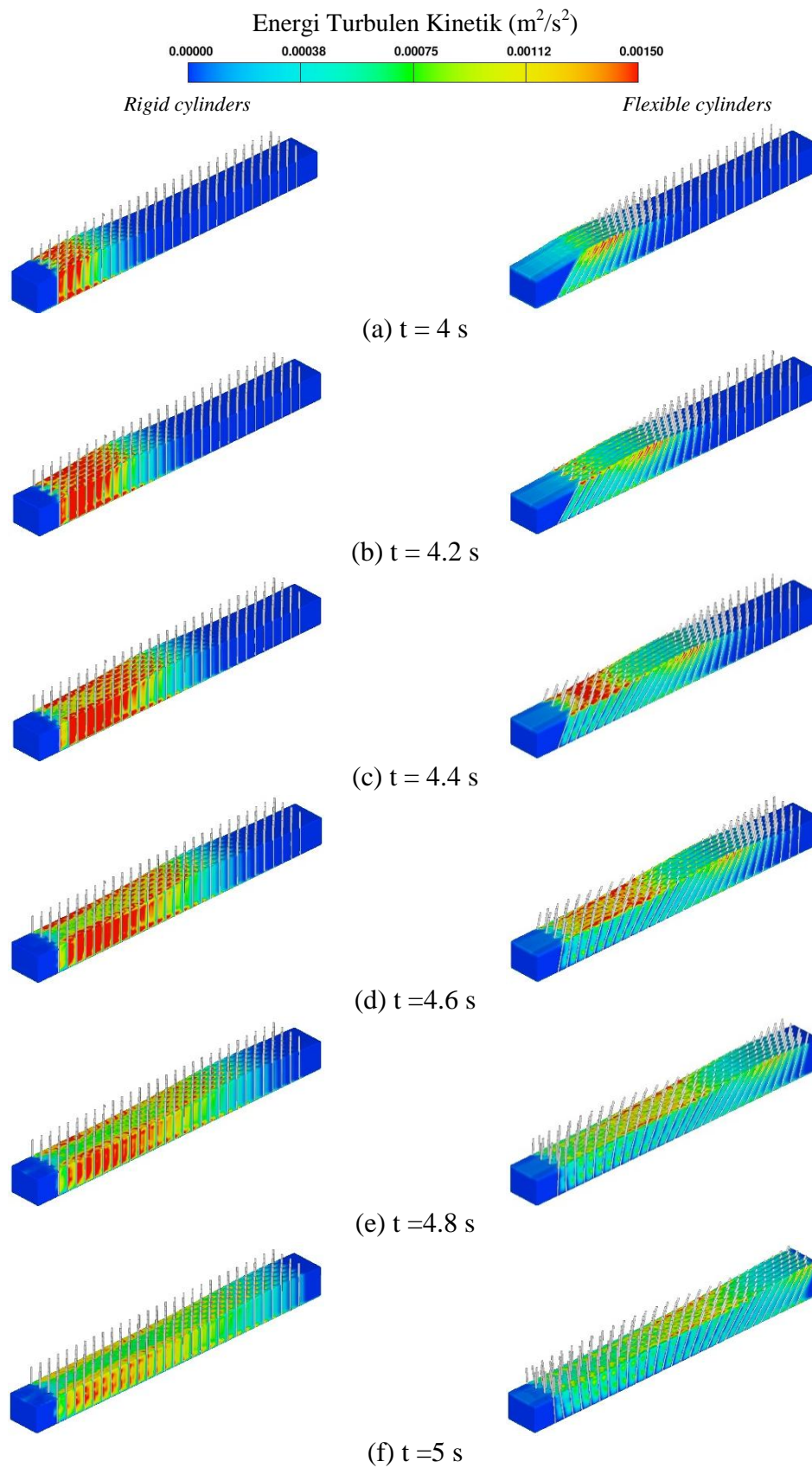
Gambar 8: Perbandingan redaman tinggi gelombang antara silinder kaku (bulatan merah) dan silinder fleksibel (persegi biru) di setiap alat pengukur (*gauge*).

Gambar 9 (b) menunjukkan medan alir saat puncak gelombang melewati alat pengukur 5. Dapat diamati bahwa silinder fleksibel berputar maju mengikuti gerakan gelombang. Tapi, secara simultan, silinder yang berada diantara G3 dan G4 lebih kuat terayun kembali ke belakang saat gelombang melewatinya.

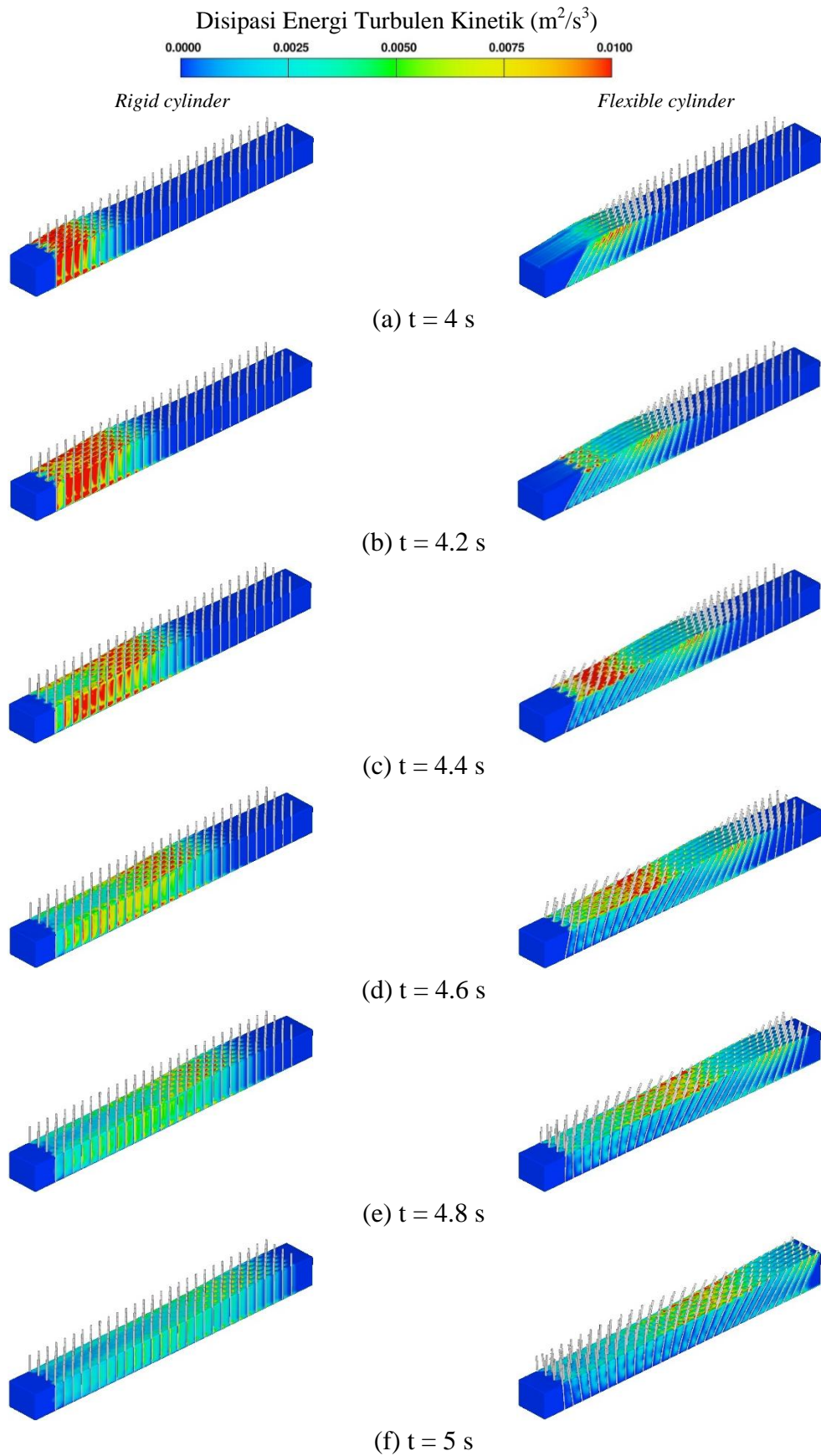


Gambar 9: Bidang arus berdasarkan perambatan gelombang melalui G5 untuk (a) silinder kaku dan (b) silinder fleksibel.

Gambar 10 dan Gambar 11 menunjukkan variasi waktu dari energi kinetik turbulen (TKE) dan laju disipasi energi kinetik turbulen (DTKE) dari silinder kaku dan silinder fleksibel. Hasilnya menunjukkan bahwa silinder kaku mengalami energi kinetik turbulen lebih besar daripada silinder fleksibel. Dengan meningkatnya kekakuan vegetasi, disipasi energi turbulen terjadi di daerah yang relatif luas. Juga menarik untuk dicatat bahwa waktu terjadinya TKE maksimum atau bahkan DTKE maksimum dalam silinder fleksibel berbeda dengan silinder kaku. TKE dan DTKE maksimum pada silinder fleksibel ditemukan pada 4,4 s dan 4,6 s saat silinder bergerak mundur setelah gelombang.



Gambar 10: Energi turbulen kinetik untuk silinder kaku dan fleksibel.



Gambar 11: Disipasi energi turbulen kinetik untuk silinder kaku dan fleksibel.

5. SIMPULAN

Pendekatan numerik tiga dimensi berdasarkan model RANS digunakan untuk mempelajari interaksi gelombang tsunami dengan vegetasi. Transformasi tinggi gelombang, medan aliran dan energi kinetik turbulen dan laju disipasi gelombang soliter yang menyebar di atas silinder yang kaku dan fleksibel menjadi topik yang diselidiki dalam penelitian ini. Hasil simulasi numerik menunjukkan bahwa setelah gelombang soliter disebarkan di atas vegetasi yang kaku dan fleksibel, energi kinetik turbulen dan laju disipasi dihasilkan karena interaksi antara gelombang dan silinder. Hasilnya menunjukkan bahwa vegetasi yang kaku memiliki redaman tinggi gelombang yang lebih besar daripada yang fleksibel. Vegetasi kaku juga mengalami energi kinetik turbulen yang lebih besar daripada yang fleksibel, yang berarti mengurangi lebih banyak energi setelah gelombang melewati vegetasi. Padahal, struktur vegetasi pesisir jauh dari makna fisik yang kaku seperti yang digunakan oleh beberapa penelitian terdahulu. Hal ini menjadi catatan penting bahwa kemungkinan overestimasi terhadap peluruhan gelombang ketika menggunakan silinder kaku sebagai vegetasi pesisir perlu dipertimbangkan kembali untuk upaya pencegahan bencana apapun.

REFERENSI

1. Anderson, M. E., Smith, J. M., and McKay, S. K., 2011. Wave dissipation by vegetation. Coastal and Hydraulics Engineering Technical Note ERDC/CHL CHETN-I-82, U.S. Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg, MS.
2. Baird, A.H., 2006. Myth of green belts. Viewpoint, SAMUDRA Report No. 44.
3. Chen, X., Chen, Q., Zhan, J., Liu, D, 2016. Numerical simulations of wave propagation over a vegetated platform. *Coast. Eng.*, 110, 64-75.
4. Choi, B.H., D.C. Kim, E. Pelinovsky and S.B. Woo, 2007. Three-dimensional simulation of tsunami run-up around conical island. *Coastal Engineering* 54, 618–629.
5. Cooker, M. J., D.H. Peregrine, C. Vidal and J.W. Dold, 1990. The interaction between a solitary wave and a submerged semicircular cylinder. *Journal of Fluid Mechanics* 215, 1–22.
6. Dentale, F., G. Donnarumma and E. Pugliese Carratelli, 2014. Simulation of flow within armour blocks in a breakwater. *Journal of Coastal Research* 30(3), 528-536.

7. Harada, K. and Imamura, F., 2000. Experimental study on the resistance by mangrove under the unsteady flow, 1st Congress of the Asian and Pacific Coast. Eng., 975–984.
8. Harada, K. and Kawata, Y., 2004. Study on the effect of coastal forest to tsunami reduction. *Annals of Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ.*, No. 47 C.
9. Hiraishi, T., Harada, K., 2003. Greenbelt tsunami prevention in south-Pacific region. *Report of the Port and Airport Research Institute* 42 (2), 3–25.
10. Hirt, C.W. and B.D. Nichols, 1981. Volume of fluid (VOF) method for dynamics of free boundaries. *Journal of Computational Physics* 39, 201-225.
11. Huang, Z., Yao, Y., Sim, S. Y., and Yao, Y., 2011. Interaction of solitary waves with emergent rigid vegetation, *Ocean Eng.*, 38, 1080–1088.
12. Li, C.W., Xie, J.F., 2011. Numerical modeling of free surface flow over submerged and highly flexible vegetation. *Adv. in Water Resources*, 34, 468-477.
13. Liu, P.L.F., H. Yeh, and C.E. Synolakis. 2008. *Advanced Numerical Models for Simulating Tsunami Waves and Runup*, In: *Advances in Coastal and Ocean Engineering*, World Scientific Pub. (10), Singapore.
14. Maza, Maria, Lara J.L., Losada I.J., 2015. Tsunami wave interaction with mangrove forests: a 3-d numerical approach. *Coast. Eng.*, 98, 33-54.
15. Paul, M., Bouma, T. J., and Amos, C. L. (2012). “Wave attenuation by submerged vegetation: Combining the effect of organism traits and tidal current.” *Mar. Ecol.*
16. Shuto, N., 1987. The effectiveness and limit of tsunami control forests. *Coastal Eng in Japan* 30, 143–153.
17. Tadepalli, S. and C.E. Synolakis (1994). The Run-Up of N-Waves on Sloping Beaches, *Proceedings: Mathematical and Physical Sciences* 445(1923), 99-112.
18. Teh, S.Y., Koh, H.L., Liu, P.L.F., Ismail, A.I.M., Lee, H.L., 2009. Analytical and numerical simulation of tsunami mitigation by mangroves in Penang, Malaysia. *J. Asian Earth, Sci.* 36, 38–46.
19. Wu, W.-C., Ma G., Cox, D.T., 2016. Modeling wave attenuation induced by the vertical density variations of vegetation. *Coastal Eng.*, 112, 17-27.
20. Zhu, L., Chen, Q., 2015. Numerical modeling of surface waves over submerged flexible vegetation. *J. Eng. Mech.*, 141(8).