



Kehadiran Gelombang Soliter dan Transpor Sesaat Sedimen tersuspensi di Perairan Pantai Bengkulu Tengah

Edi Kusmanto¹ dan Muhammad Hasanudin¹

¹Pusat Penelitian Oseanografi - Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia, Jakarta.

E-mail: edikusmanto@gmail.com

Submitted 11 April 2019. Reviewed 19 August 2019. Accepted 18 November 2019.

DOI: [10.14203/oldi.2019.v4i3.262](https://doi.org/10.14203/oldi.2019.v4i3.262)

Abstrak

Abrasi dan dinamika angkutan sedimen tersuspensi oleh gelombang tengah berlangsung secara intensif di pantai Bengkulu Tengah. Abrasi cenderung mengalami percepatan akibat hempasan gelombang soliter pada musim muson tenggara. Data primer diperoleh pada bulan Juli 2014 dan data sekunder *Google Maps image* pada tanggal 17 Juni 2014 mewakili musim muson tenggara. Data primer diperoleh dari *Acoustic Doppler Current Profiler* (ADCP) 1200KHz untuk pengukuran arus, kedalaman dengan *Echosounder single beam*, posisi dengan GPS Garmin 276C, tinggi dan periode gelombang dengan RBR-TWR2050 pada titik tetap pada posisi 102,2219° BT dan 3,6916°LS pada kedalaman 9 m dan arah gelombang dengan kompas. Data sekunder merupakan citra satelit Astrium yang dikompilasi oleh *Google Earth* dan ditampilkan sebagai *Google Maps image* pada tanggal 17 Juni 2014 digunakan sebagai alat bantu dalam mengidentifikasi kemunculan paket-paket gelombang (*wave group*) dan dengan alat ukur yang ada di *Google Earth* menunjukkan bahwa estimasi jarak antarpaket gelombang yang menghempas pantai mencapai 147 m. Hasil penelitian terhadap gelombang di perairan pesisir Bengkulu Tengah pada bulan Juli 2014 menunjukkan kehadiran gelombang soliter dengan tinggi dan periode gelombang masing masing adalah 1,02 m dan 13,85 detik dengan panjang gelombang mencapai 147,7 m. Energi dan fluks energi gelombang masing masing 1123,12 J/m² dan 12018,94 J/(m.detik) yang dihitung dengan teori gelombang Cnoidal yang dipecahkan dengan persamaan KdV. Gelombang tersebut mempunyai daya rusak yang besar terhadap pantai yang tidak stabil dan bertebing. Hasil abrasi pantai yang berupa sedimen yang tersuspensi yang ditunjukkan oleh backscatter ADCP 1200 KHz dengan intensitas tertinggi 146 dB kemungkinan besar terbawa oleh arus dengan kecepatan rata rata 25,99 cm/detik dengan arah dominan ke selatan - tenggara dan diendapkan di sekitar pesisir Kota Bengkulu.

Kata Kunci: Gelombang soliter, transpor sesaat, sedimen tersuspensi, Bengkulu Tengah, abrasi.

Abstract

Existence of Solitary Waves and Transient Suspended Sediment Transport in the Coastal Waters of Central Bengkulu. Coastal abrasion and suspended sediment transport driven by waves is occurring dreadfully in the coastal waters of Central Bengkulu. The abrasion tends to be accelerated by solitary waves during the southeast monsoon season. The primary data were obtained on 17-26 July 2014, while the secondary data derived from Google Maps imageries obtained on 17 June 2014, representing the southeast monsoon season. The primary data were collected by 1200 KHz Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP) for water currents, a single beam Echosounder for depths, Garmin 276C GPS receiver for

coordinate positions, RBR-TWR2050 (installed at a fixed point at 102.2219 °E and 3.6916 °S and depth of 9 m) for height and wave periods, and a compass for the direction of wave propagation. The secondary data included Astrium satellite imageries compiled by Google Earth and displayed as Google Maps images on 17 June 2014. These images were used for identifying the appearance of wave groups and by using a feature in Google Earth, it showed that the estimated distance between wave packets hitting the coast accounted for 147 m. This study showed the existence of solitary waves with height and wave period of 1.02 m and 13.85 seconds respectively, while the wave length reached 147.7 m. The wave energy and wave energy flux were 1123.12 Jm⁻² and 12018.94 Jm⁻¹s⁻¹, calculated by using the cnoidal wave theory and solved by the KdV equation. These solitary waves have large destructive forces on unstable cliffs along the coasts. Derived from coastal abrasion processes and shown by the ADCP backscatter intensity with the highest of 146 dB, the suspended sediments were likely to be transported by water currents with an average speed of 25.99 cm s⁻¹ in the dominant direction to the south - southeast; and the sediments were deposited along the coast of Bengkulu City.

Keyword: Solitary waves, suspended sediment, transient transport, Central Bengkulu , abrasion.

Pendahuluan

Provinsi Bengkulu terletak di sebelah Barat pegunungan Bukit Barisan. Wilayah administrasi Provinsi Bengkulu memanjang dari perbatasan Provinsi Lampung hingga berbatasan dengan Provinsi Sumatera Barat di sebelah utara dengan jarak lebih kurang 567 kilometer. Provinsi Bengkulu bagian timurnya berbukit-bukit dengan dataran tinggi yang subur, sedangkan bagian barat merupakan dataran rendah yang relatif sempit, memanjang dari utara ke selatan dan berbatasan langsung dengan Samudera Indonesia pada garis pantai sepanjang lebih kurang 525 kilometer (<http://bengkuluprov.go.id/ver1/>).

Kabupaten Bengkulu Tengah di Provinsi Bengkulu melewati jalan lintas barat (Jalinbar) Pulau Sumatera, dan memiliki panjang pantai sekitar 15 km (Fadilah et al., 2013). Sepanjang garis pantai terdapat wilayah yang sangat rentan terhadap abrasi baik akibat proses alami maupun melalui aktivitas manusia, antara lain pertumbuhan populasi yang menyebabkan eksploitasi yang meluas dari pantai hingga lautan (Kendon et al., 2014). Abrasi pantai adalah proses pengikisan pantai oleh fluks energi gelombang laut dan arus laut yang bersifat merusak (Wibowo, 2012). Kemunduran garis pantai terjadi di sepanjang pesisir sebesar 1,5 meter pertahun (Suwarsono, 2011). Proses abrasi ini mengakibatkan bentuk pantai berupa tebing dan hampir mencapai ketinggian dua meter dari dasar tebing pada keadaan pasang (Fadilah et al, 2013).

Pantai tebing dengan komposisi dominan lempung dapat digerus oleh gelombang dengan ketinggian antara 1 m sampai dengan 1,2 m (Carter & Guy, 1988). Dampak jangka panjang

hempasan gelombang dapat mengakibatkan penggerusan di bagian kaki tebing yang tersusun dari material yang didominasi lempung ataupun material nonkohesif lainnya. Berkaitan dengan waktu terabrasinya kaki tebing ini, sangat ditentukan oleh variabilitas muka air laut, tinggi gelombang, lamanya gelombang menghempas dan lebar pantai.

Wilayah pantai mempunyai banyak manfaat antara lain dalam bidang pariwisata, perikanan ataupun pelabuhan sekaligus banyak pula kerugiannya yaitu abrasi pantai (Onea & Rusu, 2019). Secara alamiah wilayah pantai mempunyai keseimbangan dinamis yang cenderung menyesuaikan bentuk profilnya sedemikian sehingga mampu menghancurkan energi gelombang yang datang. Gelombang yang datang akan mudah diredam oleh bentuk pantai yang stabil sedangkan pada kondisi pantai yang tidak stabil akan menimbulkan abrasi.

Faktor terbesar yang memengaruhi abrasi pantai adalah energi gelombang di sepanjang garis pantai. Energi gelombang ini terutama dikendalikan oleh kecepatan angin dan panjang *fetch*. Selain gelombang yang dibangkitkan oleh angin juga terdapat gelombang soliter yang mempunyai daya rusak yang besar. Gelombang soliter merupakan gelombang translasi dengan kecepatan partikel air hanya bergerak dalam arah penjalaran gelombang. Gelombang soliter tetap mempertahankan bentuknya saat menjalar pada kecepatan konstan. Gelombang tersebut merambat lurus tanpa mengalami perubahan yang berarti pada bentuk maupun kecepatannya untuk jarak yang cukup panjang serta dalam rentang waktu relatif lama hingga menghempas pantai (Drazin & Johnson, 1989). Energi kinetik gelombang soliter selalu lebih besar dan dapat mencapai 30%

dibandingkan dengan energi potensialnya (Lamb & Nguyen, 2009). Energi gelombang tersebut sangat besar karena seluruh badan air ikut terhempas memukul pantai.

Fenomena gelombang soliter pertama kali dijelaskan pada tahun 1834 oleh John Scott Russell (1808-1882) yang mengamati gelombang soliter di Union Canal di Skotlandia. Penemuan gelombang soliter ini tidak terlalu diperhatikan sampai dengan pertengahan tahun 1960an, kemudian keberadaan gelombang soliter menjadi penting pada penelitian-penelitian tentang sistem nonlinear (Dodd, 1982).

Kajian dalam tulisan ini adalah tentang abrasi dan implikasinya terhadap dinamika angkutan sedimen tersuspensi oleh gelombang soliter di perairan Bengkulu Tengah. Kajian ini diharapkan dapat menambah informasi tentang penyebab percepatan abrasi pantai agar penanggulangannya dapat dilakukan dengan tepat.

Metodologi

Data yang digunakan pada penelitian ini adalah data primer dan data sekunder. Pengambilan data primer dilakukan di perairan pantai Bengkulu pada tanggal 18 - 20 Juli 2014 yang mewakili musim muson tenggara. Pengukuran arus secara spasial dilakukan dengan *Acoustic Doppler Current Profiler* (ADCP) tipe 1200KHz dengan interval kedalaman 25 cm mulai dari permukaan hingga kedalaman 21 meter. Pengukuran arus dan batimetri dilakukan di sepanjang lintasan perahu yang bergerak dengan kecepatan antara 4 - 5 knot setiap dua detik. Kedalaman perairan diukur dengan *Echosounder Single Beam Swath Bathy* 500 DF dan penentuan posisi dilakukan dengan GPS Garmin 276C, sedangkan sedimen tersuspensi diestimasi menggunakan intensitas *backscatter* akustik ADCP 1200 KHz. Sinyal akustik ADCP yang berupa intensitas gema dalam satuan *count* setelah dikonversi ke dalam satuan desibel (*dB*) digunakan untuk mengidentifikasi tingkat kekeruhan. Satu *count* setara dengan 0,43 *dB* pada RD Instruments (Dwinovantyo et al., 2017).

Tinggi dan periode gelombang diukur dengan *Tide and Wave Recorder* RBR tipe TWR2050. Alat ini dipasang stationary pada titik tetap pada posisi 102,18038° BT dan 3,65000° LS

pada kedalaman 9 m dengan interval setiap 30 menit. Arah gelombang diukur dengan kompas setiap 30 menit sehingga diperoleh arah dominannya.

Perhitungan tinggi dan periode gelombang yang digunakan adalah H_{33} dan T_{33} atau tinggi dan periode rerata dari 33% nilai tertinggi dari pencatatan gelombang, yang juga disebut sebagai tinggi dan periode gelombang signifikan H_s atau $H_{1/3}$ dan T_s atau $T_{1/3}$ ((Anonim, 1984). Persamaan untuk tinggi gelombangnya (Anonim, 1984) adalah:

$$H_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N H_j^2} \quad (1)$$

Tinggi gelombang signifikan, disajikan seperti berikut:

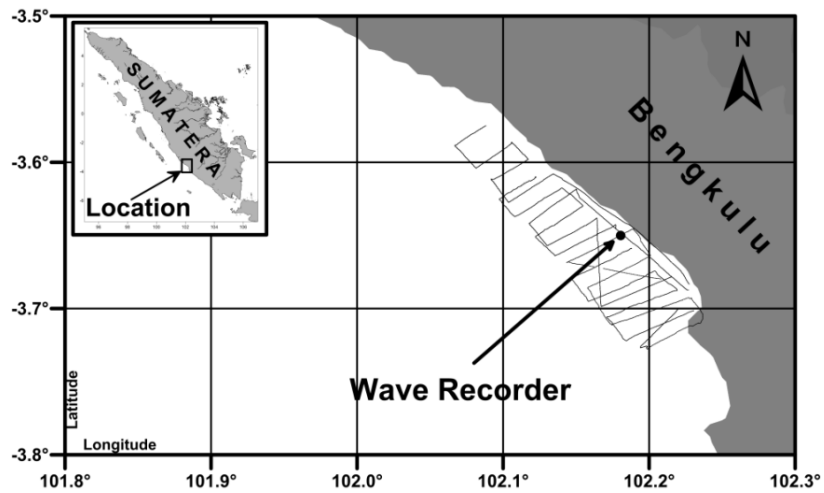
$$H_{1/3} = 1.416 H_{rms} \approx \sqrt{2} H_{rms} \quad (2)$$

H_{rms} = root mean square of wave height

Data sekunder yaitu citra dari satelit *Astrium* yang dikompilasi oleh *Google Earth* digunakan sebagai alat bantu dalam mengidentifikasi kemunculan paket-paket gelombang (*wave group*). Alat ukur yang ada di *Google Earth* diaplikasikan untuk mengestimasi jarak antarpaket gelombang. *Google Maps image* yang digunakan pada tulisan ini adalah citra pada bulan Juni 2014 yang masih dalam rentang musim muson tenggara.

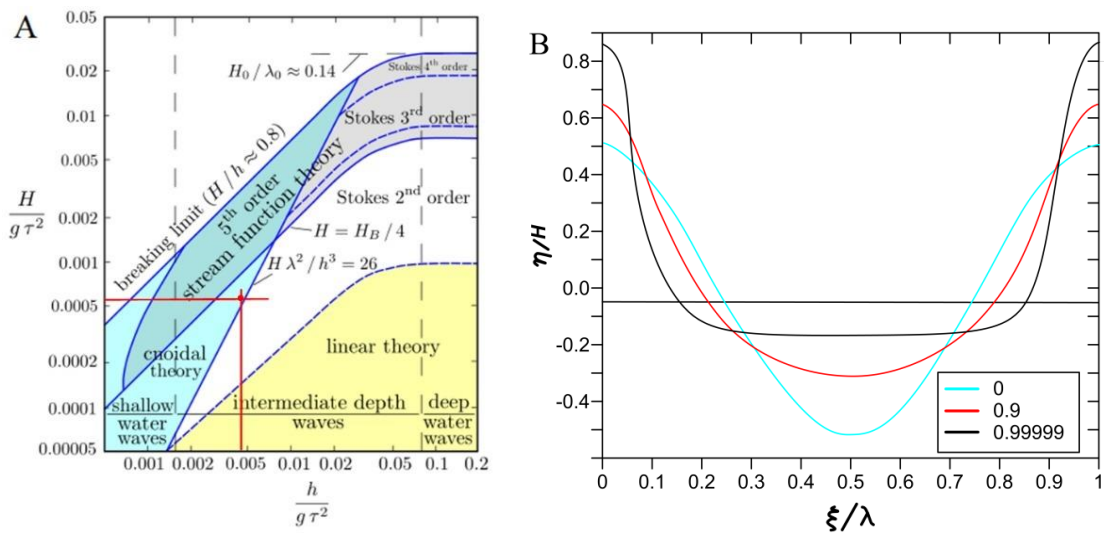
Untuk mengetahui teori gelombang yang tepat sebagai penyelesaian gelombang dari data yang diperoleh di perairan pesisir Bengkulu Tengah, digunakan grafik *Region of Validity* oleh Le Méhauté (Holthuijsen, 2007). Jika diketahui besarnya tinggi gelombang H , periode gelombang τ dan kedalaman laut h , maka kita dapat menggunakan grafik tersebut dengan menghitung parameter tak berdimensi $h/g\tau^2$ sebagai absis dan $H/g\tau^2$ sebagai ordinat kemudian tarik garis horizontal ke kanan dari nilai $H/g\tau^2$ dan tarik garis vertikal dari nilai $h/g\tau^2$. Titik perpotongan dari kedua garis tersebut merupakan daerah teori gelombang yang cocok digunakan.

Derajat nonlinearitas gelombang diukur dengan bilangan Ursell, U yang menggabungkan antara kecuraman gelombang dan kedalaman air relatif, $U = (H/\lambda)/(h/\lambda)^3 = H\lambda^2/h^3 = (H/h)(\lambda/h)^2$. Bilangan Ursell untuk teori Cnoidal dan teori Stokes berlaku antara $10 < U < 26$.



Gambar 1. Lintasan pengukuran arus dan topografi dasar perairan dan posisi pengukuran gelombang di perairan Bengkulu Tengah, Juli 2014.

Figure 1. Track of current and sea bottom topography data acquisition and the position of wave recorder in Central Bengkulu Waters at July 2014.



Gambar 2. Grafik *Region of Validity* sebagai batasan aplikasi beberapa teori gelombang sesuai dengan Le Méhauté tahun 1976 (Holthuijsen, 2007). Daerah yang berwarna biru cerah merupakan daerah yang sesuai dengan teori gelombang Cnoidal; warna kuning cerah untuk teori gelombang Airy dan garis tebal biru adalah batas orde dari teori gelombang Stokes. Garis abu-abu cerah adalah daerah pendekatan numerik untuk fungsi gelombang stream orde kelima A) dan profil gelombang Cnoidal untuk tiga nilai parameter eliptik m ; biru $m = 0$, merah $m = 0.9$ dan hitam $m = 0.99999$ B).

Figure 2. Region of Validity graph. The ranges of applicability of the various wave theories according to Le Méhauté, 1976 (Holthuijsen, 2007). The lightblue area gives the range of validity of Cnoidal wave theory; light yellow for Airy wave theory and the dashed blue lines demarcate between the required order in Stokes' wave theory. The lightgray shading gives the range extension by numerical approximations using fifth order stream function theory A) and Cnoidal wave profiles for three values of the elliptic parameter m ; blue $m = 0$, red $m = 0.9$ and black $m = 0.99999$ B).

Karakteristik gelombang pada teori Korteweg dan de Vries (KdV) dinyatakan dengan fungsi eliptis Jacobian cn karena itu disebut sebagai teori gelombang Cnoidal. Persamaan Korteweg dan de Vries (KdV) adalah persamaan yang menjelaskan tentang evolusi gelombang

panjang pada gelombang permukaan. Persamaan tersebut diperuntukkan terutama pada gelombang dengan amplitudo kecil namun mempunyai panjang gelombang (λ) yang sangat panjang

dibandingkan dengan kedalamannya dan bergerak dalam arah penjaranya (Ali & Kalisch, 2014).

Persamaan tersebut dapat dinyatakan sebagai variabel dimensional sebagai berikut:

$$\partial_t \eta + \sqrt{gh} \partial_x \eta + \frac{3}{2} \sqrt{\frac{g}{h}} \eta \partial_x \eta + \frac{1}{6} h^2 \sqrt{gh} \partial_x^3 \eta = 0 \quad (3)$$

Dengan η adalah elevasi permukaan sebagai fungsi x dan t , tanda positif menunjukkan arah ke atas (kebalikan dari gravitasi), x adalah koordinat horizontal, t adalah waktu, g gravitasi bumi, h rata-rata kedalaman. Persamaan (3) kemudian di nondimensionalisasi dengan mensubstitusi besaran berikut:

$$\dot{\eta} = \frac{\eta}{h}, \quad \dot{x} = \frac{x}{h} \quad \dot{t} = \sqrt{\frac{g}{h}} t \quad (4)$$

maka persamaan (3) menjadi:

$$\partial_t \dot{\eta} + \partial_x \dot{\eta} + \frac{3}{2} \dot{\eta} \partial_x \dot{\eta} + \frac{1}{6} h^2 \partial_x^3 \dot{\eta} = 0 \quad (5)$$

Penyelesaian persamaan differensial parsial (5) yang merupakan bentuk gelombang Cnoidal dapat disajikan sebagai bentuk berikut (Khorsand & Henrik, 2014):

$$\eta(x, t) = \eta_2 + H \operatorname{cn}^2\left(\frac{x-ct}{\Delta} \mid m\right) \quad (6)$$

Notasi H adalah tinggi gelombang, λ adalah panjang gelombang, c adalah kecepatan fase dan η_2 adalah elevasi lembah gelombang. Selanjutnya cn adalah fungsi eliptik Jacobi dan $K(m)$ adalah integral eliptik lengkap suku pertama, kedua parameter tersebut tergantung pada parameter eliptik m . Parameter eliptik m , merupakan penentu bentuk gelombang Cnoidal. Untuk m sama dengan nol gelombang Cnoidal menjadi fungsi cosinus, sedangkan untuk nilai-nilai m mendekati satu gelombang Cnoidal menjadi fungsi gelombang soliter atau sering disebut soliton (Gambar 2B).

Sebagai konsekuensi dari persamaan KdV maka elevasi lembah gelombang, η_2 dan parameter luasan, Δ dinyatakan dengan suku H , h , dan m sebagai berikut:

$$\eta_2 = \frac{H}{m} \left(1 - m - \frac{E(m)}{K(m)}\right) \quad \text{dan} \quad \Delta = \frac{\lambda}{2K(m)} = h \sqrt{\frac{4}{3} \frac{mh}{H}} \quad (7)$$

Notasi $K(m)$ adalah integrasi dari fungsi eliptik orde pertama dan $E(m)$ adalah orde keduanya.

Berdasarkan persamaan tersebut, maka panjang gelombang dan kecepatan fasenya dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$\lambda = h \sqrt{\frac{16}{3} \frac{mh}{H}} K(m) \quad \text{dan} \quad c = \sqrt{gh} \left[1 + \frac{H}{mh} \left(1 - \frac{1}{2}m - \frac{3}{2} \frac{E(m)}{K(m)}\right)\right] \quad (8)$$

Untuk gelombang nonlinier yang mempunyai λ yang sangat panjang, parameter m mendekati 1, persamaan eliptik Jacobi didekati dengan persamaan:

$$\operatorname{cn}(z|m) \approx \operatorname{sech}(z) - \frac{1}{4}(1-m)[\sinh(z) \cosh(z) - z] \tanh(z) \operatorname{sech}(z) \quad (9)$$

Dengan \cosh , \tanh dan sech adalah fungsi hiperbolik dengan $\operatorname{sech}(z) = 1/\cosh(z)$. Untuk $m=1$ persamaan (9) maka:

$$\operatorname{cn}(z|m) \rightarrow \operatorname{sech}(z) \quad (10)$$

Selanjutnya dengan menerapkan m mendekati 1, integrasi dari persamaan eliptik suku pertama $K(m)$ menjadi tak berhingga sehingga diabaikan, maka kecepatan fase dan elevasi lembah gelombang soliter dapat dinyatakan sebagai berikut (Barth & Hilf, 1995):

$$c = \sqrt{gh} \left(1 + \frac{1}{2} \frac{H}{h}\right) \quad \text{dan} \quad \eta_2 = 0 \quad (11)$$

Selain itu, kecepatan fase gelombang berkaitan dengan panjang gelombang λ dan periode τ yaitu:

$$\lambda = c \cdot \tau, \quad (12)$$

Maka panjang gelombang soliton dinyatakan sebagai berikut:

$$\lambda = \sqrt{gh} \left(1 + \frac{1}{2} \frac{H}{h}\right) \cdot \tau \quad (13)$$

Energi gelombang soliter total didefinisikan sebagai penjumlahan antara energi kinetik dan energi potensialnya. Energi gelombang soliter persatuan luas disajikan seperti berikut:

$$\frac{E}{b} = 1.54 \rho g (Hh)^{3/2} \quad (14)$$

Persamaan (14) adalah energi gelombang soliter persatuan luas b . Energi gelombang tersebut sangat dipengaruhi oleh tekanan

hidrostatik yang dinyatakan sebagai $p = \rho g(\eta - z)$.

Gelombang yang menjalar dari laut lepas menuju pantai membawa energi potensial dan energi kinetik. Energi yang transportasi dan menghempas pesisir sering disebut sebagai fluks energi gelombang. Fluks energi gelombang merupakan energi gelombang tiap satu satuan waktu yang bergerak dalam arah penjarannya. Fluks energi gelombang dapat dihitung dengan persamaan berikut (Holthuijsen, 2007):

$$P_{energy} = E \cdot n \cdot c \quad \text{dengan} \quad n = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{2kd}{\sinh(2kd)} \right) \quad (15)$$

Kecepatan penjaran gelombang nc dalam ungkapan ini adalah sama persis dengan kecepatan grup gelombang. Istilah kecepatan grup sering digunakan tanpa membedakan antara kecepatan grup dengan kecepatan transpor energi, sehingga persamaan (5) dapat dituliskan sebagai berikut:

$$P_{energy} = E \cdot c_g \quad (16)$$

P_{energy} adalah fluks energi gelombang persatuan waktu dan searah dengan arah penjaran gelombang dan c_g adalah kecepatan group gelombang.

Hasil

Topografi Dasar Perairan

Profil kedalaman di lokasi pengamatan gelombang pada irisan melintang dari titik A sampai dengan titik B dapat dilihat pada gambar berikut. Kedalaman perairan pada posisi A adalah 16 m dan pada daerah B adalah 7 m pada jarak 5063,7 m dari pantai. Di antara titik A dan B juga terdapat tonjolan topografi dasar laut dengan ketinggian antara 2 m sampai dengan 4 m. Pada irisan B ke C menjadi sangat dangkal secara

drastis membentuk tebing yang curam dengan jarak sekitar 848,9 m dari pantai (Gambar 4).

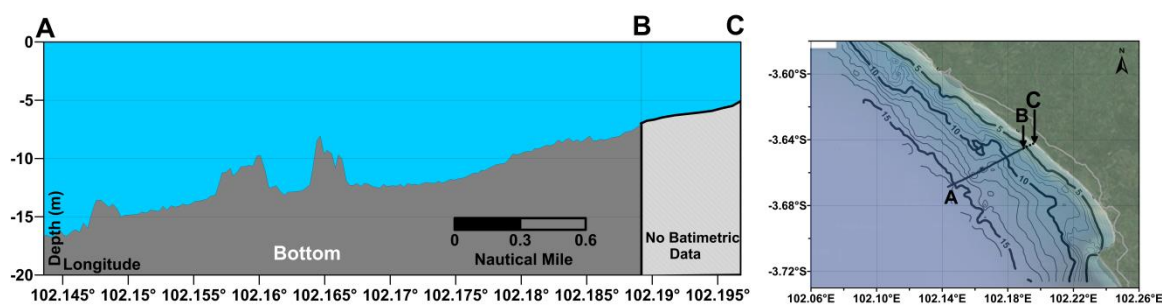
Gelombang Soliter

Gelombang yang terekam oleh citra satelit Astrium yang dikompilasi oleh *Google Earth* dan ditampilkan sebagai *Google maps image* pada tanggal 17 Juni 2014 mengindikasikan terjadinya gelombang soliter yang merambat ke pesisir dengan panjang gelombang hingga mencapai 147 m. Secara umum pada bulan tersebut sedang terjadi musim muson tenggara di perairan Indonesia.

Gelombang yang menghempas pantai Bengkulu ketika memasuki perairan dangkal, amplitudo gelombang menjadi semakin tinggi, puncaknya menjadi semakin tajam dan lembahnya menjadi semakin datar (Gambar 3). Gelombang tersebut kemungkinan besar adalah soliton. Soliton adalah gelombang soliter adalah jenis gelombang panjang yang mempertahankan bentuknya dan menjalar pada kecepatan konstan (Wang et. al., 2018). Soliton walaupun mengalami perubahan bentuk namun sangat kecil sehingga diabaikan. Soliton disebabkan oleh efek nonlinier dan efek dispersif dalam medium (Drazin & Johnson, 1992).

Berdasarkan persamaan (2) dari data pengukuran tinggi dan periode maka dihasilkan tinggi gelombang signifikan terendah 0,72 m dan tertinggi adalah 1,48 m dengan periode signifikan terendah 11,66 detik dan tertinggi adalah 16,02 detik. Gelombang ini beresilasi secara terus menerus dengan variasi periode gelombang yang relatif kecil (4,36 detik) selama penelitian sehingga dapat dikatakan cenderung konstan.

Arah dominan gelombang terutama dari arah barat hingga barat daya ($\sim 255^\circ$) yang merupakan laut lepas, Samudera Hindia.



Gambar 3. Profil kedalaman di pesisir Bengkulu pada bulan Juli 2014.

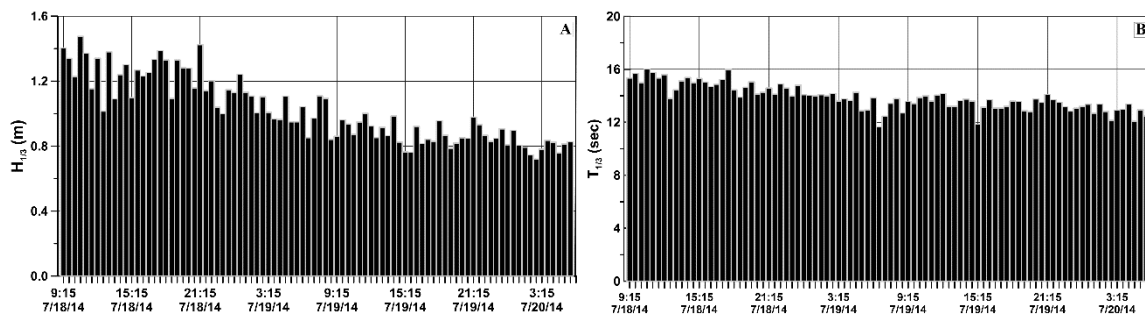
Figure 3. Depth profile of Bengkulu coast at July 2014.



Sources: Google map image 17/6/2014

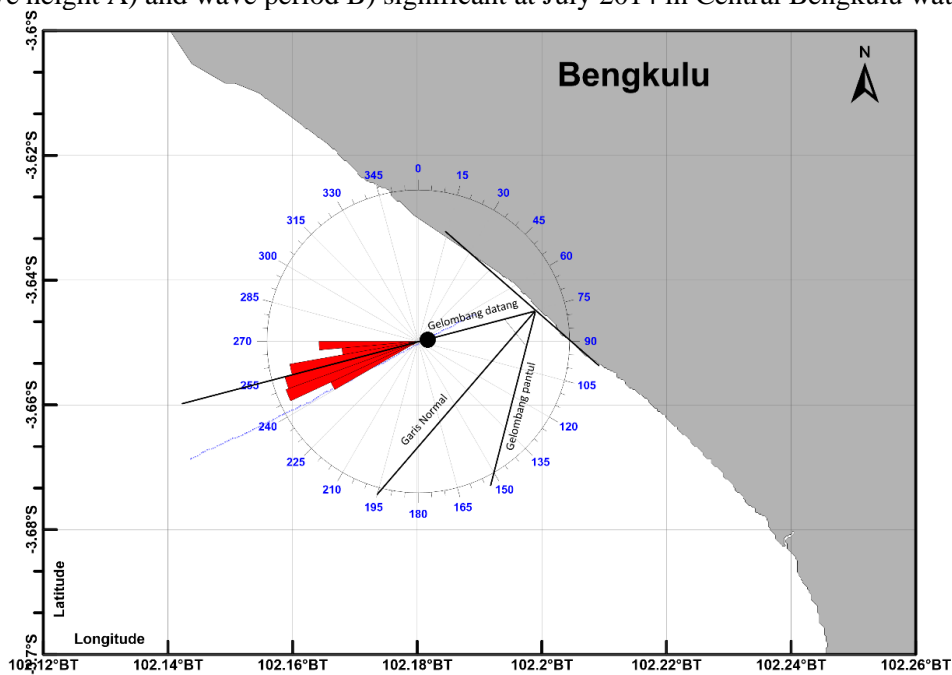
Gambar 4. Bentuk gelombang dari citra satelit Astrium yang dikompilasi oleh Google Earth dan ditampilkan sebagai Google maps image pada tanggal 17 Juni 2014.

Figure 4. Waveforms from Astrium satellite images compiled by Google Earth and displayed as Google maps image on June 17th, 2014.



Gambar 5. Tinggi A) dan periode B) gelombang signifikan bulan Juli 2014 di perairan Bengkulu Tengah.

Figure 5. Wave height A) and wave period B) significant at July 2014 in Central Bengkulu waters.



Gambar 6. Diagram rose arah gelombang bulan Juli 2014 di perairan Bengkulu Tengah.

Figure 6. Rose diagrams of wave direction July 2014 in Central Bengkulu Waters.

Pembahasan

Parameter tak berdimensi gelombang di perairan Bengkulu Tengah pada bulan Juli 2014 dengan tinggi rata-rata 1,02 m, periode 13,85 detik dan kedalaman rata-rata 9 m, mempunyai nilai $h/g\tau^2$ dan $H/g\tau^2$ masing-masing adalah 0,0048 dan 0,00053. Apabila ditarik garis pada sumbu absis dan ordinatnya (garis merah), maka perpotongan antara kedua garis tersebut berada pada teori gelombang Cnoidal (Gambar 2A). Teori gelombang Cnoidal dikembangkan pertama kali oleh Korteweg dan de Vries (1895).

Dengan memasukkan data gelombang rata-rata pada bulan Juli 2014 di perairan Bengkulu Tengah dengan percepatan gravitasi sebesar $9,8 \text{ m/detik}^2$ maka diperoleh kecepatan penjalaran gelombang, $c = 10,70 \text{ m/detik}$ sehingga nilai panjang gelombang rata-ratanya adalah $\lambda = 147,7 \text{ m}$. Hasil yang diperoleh tersebut berkesesuaian dengan panjang gelombang dari citra satelit *Google Maps image*. Energi gelombang rata rata persatuan luas adalah $E = 1123,12 \text{ J/m}^2$ sedangkan fluks energi gelombang yang menghempas pantai Bengkulu yang dihitung menggunakan persamaan (6) rata-rata sebesar $12018.94 \text{ J/(m.detik)}$.

Transpor Sesaat Sedimen Tersuspensi

Pantai di Bengkulu Tengah merupakan pantai yang berbentuk tebing dengan komposisi dominan lempung. Pantai yang berbentuk tebing tersebut yang pada awalnya mempunyai komposisi material yang kohesif, namun pantai ini terbuka maka lama kelamaan akibat gempuran gelombang yang terus menerus maka pertahanan antara material akan melemah yang pada akhirnya akan terjadi abrasi yang hebat (Carter & Guy, 1988). Proses abrasi pantai merupakan proses yang krusial, pelepasan material dari kaki tebing menghasilkan kemiringan pantai yang tidak stabil.

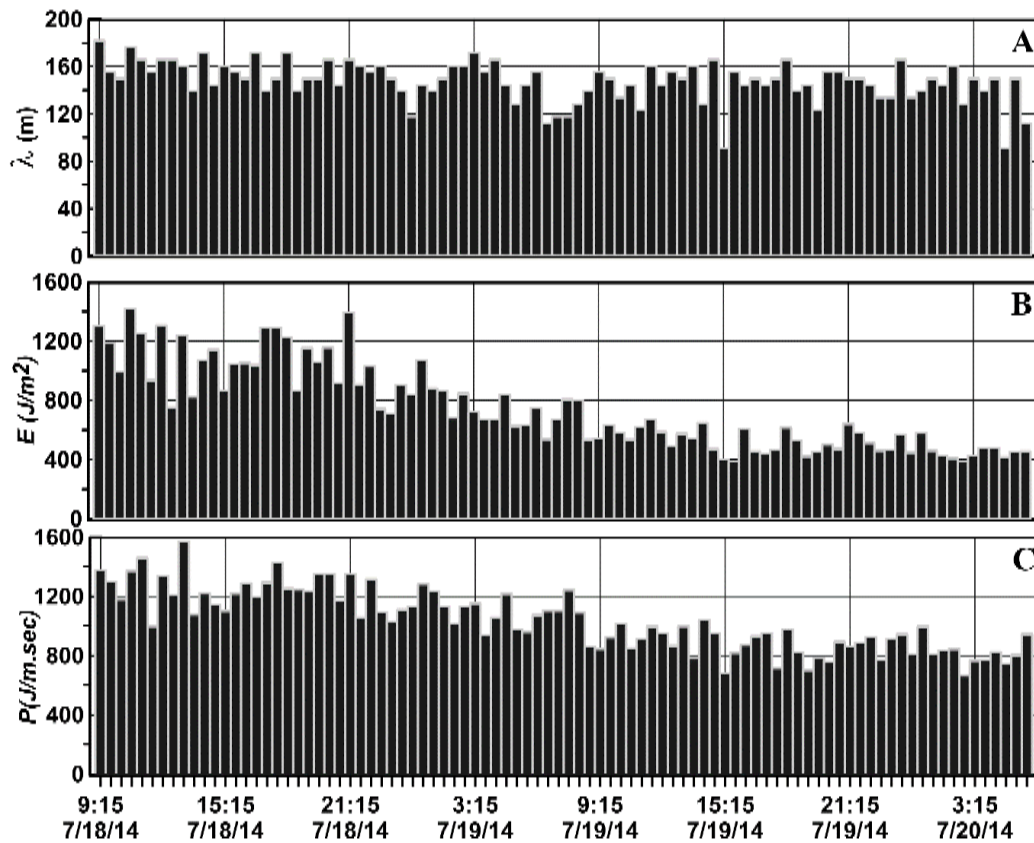
Secara skematik terdapat perbedaan mendasar antara transpor energi gelombang soliter pada pantai yang stabil dan pantai yang bertebing. Gelombang soliter pada pantai dengan *slope*, Gambar 8A akan pecah ketika ketinggian gelombang mencapai $0,714$ dari kedalaman perairannya, $H = 0,714 h$ (McCormick, 2007). Kecepatan gelombang soliter yang mendekati

pantai setelah pecah sama dengan $40\% \sim 70\%$ dari kecepatan gelombang datang (Yu & Hwung, 2006) sedangkan pada pantai yang bertebing, gelombang soliter tidak pecah hingga membentur dinding tebing pantai sehingga mempunyai daya rusak yang besar (Gambar 8B).

Dampak hempasan gelombang soliter terhadap pantai adalah abrasi pantai yang serius, akan tetapi masih belum banyak diketahui tentang metode bagaimana mengevaluasi atau memperkirakan jumlah erosi pantai yang disebabkan oleh gelombang soliter (JaeNam et. al., 2017). Gelombang yang menghempas pantai Bengkulu memiliki fluks energi gelombang yang kuat sehingga mampu menggerus dinding jalan Jalur lintas barat (Jalinbar) yang memiliki jenis batuan dan lapisan tanah yang berbeda-beda (Suwarsono, 2011). Dampak jangka panjang hempasan gelombang bersama dengan arus susur pantai merupakan faktor utama tergerusnya kaki tebing yang rentan akan runtuh dan terbawa menjauh dari pesisir (Gambar 9). Abrasi akan berlanjut dan cenderung mengalami percepatan akibat hempasan gelombang soliter pada musim monsun tenggara karena kerentanan pantai makin besar. Hempasan gelombang membuat kecuraman tebing semakin besar dan akan mudah runtuh.

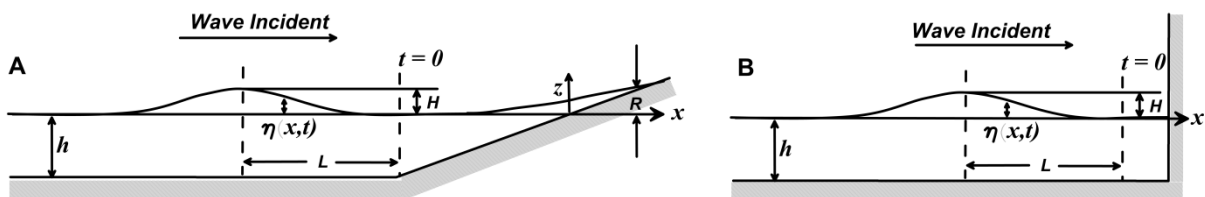
Kecepatan arus yang diperoleh dari hasil pengukuran dengan ADCP 1200 KHz dengan kecepatan rata rata $25,99 \text{ cm/detik}$ dengan arah dominan ke selatan – tenggara, Gambar 10A. Hasil abrasi pantai yang berupa sedimen yang tersuspensi ditunjukkan oleh data *backscatter* ADCP 1200 KHz dengan kisaran antara $114 - 146 \text{ dB}$ (Gambar 10 B). Sedimen yang tersuspensi kemungkinan besar terbawa mengikuti arus ke selatan - tenggara dan kemungkinan besar pengendapan tidak terjadi di perairan Bengkulu Tengah namun akan terbawa ke pantai di sekitar pesisir Kota Bengkulu.

Sedimentasi di Pantai Panjang dan Pelabuhan Pulau Baai terjadi akibat adanya suplai material yang berasal dari abrasi di bagian utara (Hasanudin & Kusmanto, 2018). Partikel yang tersuspensi tersebut dibawa oleh arus yang bekerja di perairan Pesisir Bengkulu dan terendapkan di wilayah yang tenang atau ketika terjadi surut terendah atau saat pasang tertinggi.



Gambar 7. Panjang gelombang, energi dan fluks energi gelombang soliter di perairan Bengkulu Tengah pada bulan Juli 2014.

Figure 7. Wavelength, wave energy and energy transport of soliter wave in Central Bengkulu Waters in July 2014.



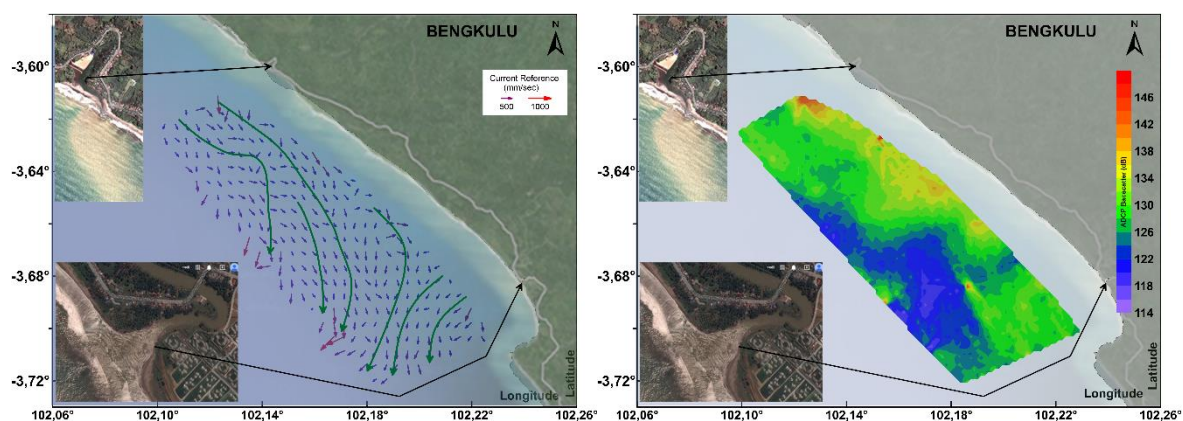
Gambar 8. Skematik hempasan gelombang soliton pada pantai dengan slope A) dan pada pantai yang bertebing B).

Figure 8. The schematic of solitary wave at the stable coast A) and at the cliffs coast B).



Gambar 9. Kondisi pesisir Bengkulu Tengah pada bulan Juli 2014.

Figure 9. Central Bengkulu coast conditions at June 2014.



Gambar 10. Pola arus A) dan level turbiditas B) di lokasi abrasi pantai Bengkulu Tengah, bulan Juli 2014.
Figure 10. Current pattern A) and turbidity level B) in abrasion coast of Central Bengkulu at July 2014.

Kesimpulan

Gelombang yang menghempas pantai Bengkulu Tengah adalah gelombang soliter tersebut dicirikan oleh amplitudo gelombang yang semakin tinggi dengan puncak yang semakin tajam dan lembahnya menjadi semakin datar ketika memasuki perairan dangkal. Gelombang soliter yang menghempas pantai Bengkulu Tengah terjadi pada bulan Juni dan Juli 2014. Kedua peristiwa tersebut terjadi pada musim muson tenggara. Indikasi kehadiran gelombang soliter teridentifikasi dari *Google Maps image* pada tanggal 17 Juni 2014 oleh adanya kemunculan paket-paket gelombang (*wave group*) dengan estimasi jarak antarpaket gelombang yang menghempas pantai mencapai 147 m. Hasil pengukuran *in situ* pada bulan Juli 2014, panjang gelombang, energi dan fluks energi gelombang soliter masing-masing mencapai 147,7 m, 1123,12 J/m² dan 12018,94 J/(m.detik) melalui perhitungan menggunakan teori gelombang Cnoidal yang dipecahkan dengan persamaan KdV. Gelombang tersebut mengakibatkan abrasi yang hebat ketika menghempas pantai yang tidak stabil dan bertebing di Bengkulu Tengah. Hasil abrasi yang berupa sedimen yang tersuspensi kemungkinan besar terbawa mengikuti arus ke selatan - tenggara dan kemungkinan besar pengendapan tidak terjadi di perairan Bengkulu Tengah namun akan terbawa ke pantai di sekitar pesisir Kota Bengkulu.

Persantunan

Ucapan terima kasih disampaikan kepada Kepala Pusat Penelitian Oseanografi LIPI atas penggunaan data pada penelitian yang didanai oleh DIPA Pusat Penelitian Oseanografi tahun anggaran 2014 serta Priyadi Dwi Santoso dan Muhadjirin yang membantu pelaksanaan di lapangan

Daftar Pustaka

- Ali, A., & Kalisch, H. (2014). On the formulation of mass, momentum and energy conservation in the KdV equation, *Journal of Acta Appl. Math.*, 133(1), 113–131. DOI 10.1007/s10440-013-9861-0.
- Anonim (1984). *Shore Protection Manual Volume 1*. Coastal Engineering Research Center, Department of the Army, Waterways Experiment Station, Corps of Engineers, PO Box 631, Vicksburg, Mississippi, 39180, Washington DC 201314. 337 pp.
- Barth, H. & Hilf, E.R. (1995). *Solitary wave calculations for erosion strength*. Oldenburg, Germany, Carl von Ossietzky Universiteit Oldenburg.
- Carter, C. H. & Guy, D. E. (1988). Coastal erosion: Processes, timing and magnitudes at the bluff toe, *Journal of Marine Geology*, 84(1-2), 1–17.
- Dodd, R. K. (1982). *Soliton and Non Linear Wave Equations*. New York: Academic Press. 630 pp.

- Drazin, P. G. & Johnson, R. S. (1989). *Soliton: An Introduction*. New York: Cambridge University Press. 226 pp.
- Dwinovantyo, A., Manik, H. M., Tri, P., & Susilohadi. (2017). Quantification and Analysis of Suspended Sediments Concentration Using Mobile and Static Acoustic Doppler Current Profiler Instruments. *Journal of Advances in Acoustics and Vibration*, 1-14, DOI 10.1155/2017/4890421.
- Fadilah, S. & Dwi, P. S. (2013). Identifikasi Kerusakan Pantai Kabupaten Bengkulu Tengah, Provinsi Bengkulu, *Prosiding Seminar Nasional Pengelolaan Sumberdaya Alam dan Lingkungan*, 337-341. Semarang, Indonesia.
- Hasanudin, M. & Kusmanto, E. (2018). Abrasi dan Sedimentasi Pantai di Kawasan Pesisir Kota Bengkulu. *Oseanologi dan Limnologi di Indonesia*, 3(3), 245-252. DOI 10.14203/oldi.2018.v3i3.197.
- Holthuijsen, L. H. (2007). *Waves in Oceanic and Coastal Waters*. Delft University of Technology and UNESCO-IHE. Cambridge University Press, The Edinburgh Building, Cambridge CB2 8RU, UK, 387 pp.
- JaeNam, C, Kyu, N. H. & Seung, O. L. (2017). Experimental Assessment of Suspended Sediment Concentration Changed by Solitary Wave, *Journal of Marine Science and Technology*, 25(6), 649-655.
- Kendon, E.J., Roberts, N.M., Fowler H.J., Roberts, M.J., Chan, S.C., & Senior, C.A. (2014). Heavier Summer Downpours with Climate Change Revealed by Weather Forecast Resolution Model, *Journal of National Climate Changes*, 4, 570–576.
- Khorsand, Z. & Henrik, K. (2014). On the Shoaling of Solitary Waves in the KdV Equation, *Coastal Engineering Proceedings of 34th Conference on Coastal Engineering Seoul Korea* (1-10). Korea.
- Lamb, K. G. & Nguyen, V. T. (2009). Calculating Energy Flux in Internal Solitary Waves with an Application to Reflectance, *Journal of Physical Oceanography*, 559-580. DOI: 10.1175/2008JPO3882.1.
- McCormic, M. E. M. (2007). *Ocean Wave Energy Conversion*, John Wiley & sons, Inc., New York.
- Onea, F. & Rusu, E. (2019). The Expected Shoreline Effect of a Marine Energy Farm Operating Close to Sardinia Island. *Journal of Water*, 11(2303), 1-20. DOI 10.3390/w11112303.
- Suwarsono (2011). Zonasi Karakteristik Kecepatan Abrasi dan Rancangan Teknik Penanganan Jalan Lintas Barat Bengkulu Bagian Utara sebagai Jalur Transportasi Vital. *Jurnal Makara Teknologi*, 15 (1), 31-38.
- Wang, Q.S., Li, M. H., & Li, D. W., (2018). Solitary Wave Generation and Propagation under Hypergravity Fields. *Journal of Water*, 10 (1381), 1-18. DOI 10.3390/w10101381.
- Website Resmi Pemerintah daerah provinsi Bengkulu. (2013). Letak Geografis dan iklim, <http://bengkuluprov.go.id/ver1/>. diakses 12 Desember 2018.
- Wibowo, A.Y. (2012). *Makalah: Dinamika Pantai (Abrasi dan Sedimentasi)*. Fakultas Teknik dan Ilmu Kelautan. Universitas Hang Tuah. Surabaya, 1-16.
- Yu, H. C. & Hwung, H. H. (2006). Experiments on the Run-up of Solitary Waves over Sloping Bottoms. *Third Chinese-German Joint Symposium on Coastal and Ocean Engineering*, (pp. 1-14). National Cheng Kung University, Tainan.