



OSEANOLOGI DAN LIMNOLOGI DI INDONESIA

Print ISSN: 0125-9830 Online ISSN: 2477-328X

Nomor Akreditasi: 712/AU3/P2MI – LIPI/10/2015

<http://jurnal-oldi.or.id>



Amplifikasi Pasang Surut dan Dampaknya terhadap Perairan Pesisir Probolinggo

Tidal Amplification and Its Impact to Probolinggo Coastal Waters

Edi Kusmanto, Muhammad Hasanudin & Wahyu Budi Setyawan

Pusat Penelitian Oseanografi, Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia

Email: edikusmanto@gmail.com

Submitted 13 April 2016. Reviewed 18 August 2016. Accepted 10 November 2016.

Abstrak

Banjir rob yang sering melanda pesisir Probolinggo merupakan fenomena yang menarik untuk dicermati. Banjir rob, rataian pasang surut, dan sedimentasi sangat berkaitan dengan pasang surut. Oleh karena itu, kajian tentang amplifikasi pasang surut dan prakiraan dampaknya terhadap perairan pesisir Probolinggo dilakukan. Pengukuran pasang surut dilakukan dengan RBR TWR-2050 setiap 5 menit selama 30 hari. Pengukuran arus dan kedalaman dengan *Acoustic Doppler Current Profiler* (ADCP) 1200 KHz di sepanjang lintasan perahu. Pengukuran turbiditas dengan turbidimeter yang terpasang pada CTD SBE 19 Plus di 19 titik stasiun. Kisaran pengukuran pasang surut mencapai 3,00 m, jauh lebih tinggi daripada Laut Jawa. Sebagai pembanding, kisaran pasang surut pelabuhan Tanjung Perak, Surabaya, 1,76 m. Berdasarkan nilai Formzahl (0,85) dan analisis *power spectra*, perairan Probolinggo diklasifikasikan sebagai pasang surut campuran condong harian ganda. Ada indikasi amplifikasi pasang surut akibat resonansi periode alami Selat Madura selama 12,46 jam terhadap konstituen pasang surut M2 dengan periode 12,42 jam yang menyebabkan amplitudo pasang surut perairan Probolinggo mencapai 3 m. Dampak amplifikasi tersebut antara lain arus yang selalu mengarah ke pesisir, baik saat pasang maupun saat surut yang mengakibatkan penyebaran sedimen tersuspensi yang relatif tinggi di sepanjang pesisir dan di sekitar area pelabuhan. Sedimentasi yang intensif menyebabkan kelandaian dan pembentukan lokasi-lokasi rataian pasang surut yang luas, hingga 3 km dari garis pantai. Selain itu, fenomena amplifikasi pasang surut berdampak pada penggenangan air di daratan rendah ketika amplifikasi pasang surut terjadi secara simultan dengan hujan yang intensif yang menyebabkan banjir rob di desa-desa pesisir Probolinggo.

Kata kunci: amplifikasi pasang surut, konstituen M2, rataian pasang surut, banjir rob.

Abstract

Rob flood that frequently struck the coast of Probolinggo is an interesting phenomenon. Tidal flood, tidal flats, and sedimentation is strongly associated with the tides. Therefore, this study of tidal amplification and its estimated impacts on the coastal waters of Probolinggo was conducted. Tidal measurements were done with RBR TWR-2050 every 5 minutes for 30 days. Measurements of flow and depth were performed with the *Acoustic Doppler Current Profiler* (ADCP) 1200 KHz along the trajectory of the boat. Measurements of turbidity with turbidimeter mounted on a CTD SBE 19 Plus at 19 stations. The results

showed that tidal range reached 3.00 m, much higher than in Java Sea. As a comparison, the tidal range of Tanjung Perak port in Surabaya was 1.76 m. Based on the value of Formzahl (0.85) and analysis of power spectra, Probolinggo waters were classified as mixed tide prevailing semidiurnal. There was indication of tidal amplification due to resonance of natural period of Madura Strait for 12.46 hours on M2 tidal constituent with a period of 12.42 hours that caused the tidal amplitude of Probolinggo waters reached 3 m. Impact of such amplification included the current direction which always leads to the coast, both at high and low tides that resulted in relatively high distribution of suspended sediment along the coast and around the port area. Intensive sedimentation caused the flatness and vast formation of tidal flats, up to 3 km from the coastline. Moreover, the phenomenon of tidal amplification impacted on the tidal inundation in the lower mainland when the tidal amplification occurred simultaneously with the intense rain which caused the tidal flood in the coastal villages of Probolinggo.

Keywords: tidal amplification, constituents M2, tidal flats, rob flood.

Pendahuluan

Kota Probolinggo terletak pada ketinggian 0 sampai 50 m dpl. Seluruh wilayah relatif berlereng (0–2%), semakin ke wilayah selatan, ketinggian dari permukaan laut semakin besar. Sungai-sungai utama yang mengalir ke perairan pesisir adalah Sungai Kedunggaleng, Umbul, Banger, Legundi, Kasbah, dan Pancur. Panjang aliran sungai rata-rata mencapai 4,94 km; yang terpanjang adalah Sungai Banger, mencapai 6,40 km, dan yang terpendek adalah Sungai Pancur, hanya 3,20 km (Situs Resmi Kab. Probolinggo, 2012). Sungai-sungai tersebut pada umumnya bermuara di perairan pesisir Probolinggo.

Sungai-sungai tersebut membawa material tersuspensi, baik yang berasal dari kikisan tanah akibat air hujan maupun material yang berasal dari letusan gunung api. Pengalihan material berupa bahan yang membentuk padatan tersuspensi dan mengalir melalui aliran sungai ke kawasan pesisir akhirnya terdistribusi mengikuti pola sirkulasi dan terendapkan membentuk sedimentasi di perairan Probolinggo.

Perairan Probolinggo terletak di Selat Madura bagian selatan dan merupakan jalur utama di wilayah utara yang menghubungkan Pulau Jawa dengan Pulau Bali. Ditinjau dari topografi dasar perairannya, kedalaman maksimumnya mencapai 26 m, sedangkan Selat Madura di bagian utara dekat Surabaya – Gresik sangat dangkal (0–10 m) dan berkisar dari 100 hingga 800 m di mulut selat bagian timur. Bagian ujung timur selat ini terhubung dengan perairan dalam, yaitu Laut Flores.

Pasang surut di perairan Probolinggo mempunyai peranan penting dalam pembentukan pola sirkulasi air laut ataupun pola pendistribusian material tersuspensi. Pasang surut merupakan suatu fenomena pergerakan naik turun permukaan

air laut secara berkala yang diakibatkan oleh kombinasi gaya gravitasi dan gaya tarik-menarik benda-benda langit, terutama matahari, bumi, dan bulan. Pengaruh benda-benda angkasa lain dapat diabaikan karena jaraknya sangat jauh atau ukurannya lebih kecil. Faktor lain yang merupakan faktor non astronomi yang memengaruhi pasang surut perairan semiterutup seperti teluk adalah bentuk garis pantai, topografi dasar perairan, tekanan atmosfer, angin, densitas air laut, arus laut, penguapan, dan curah hujan (Mihardja & Safwan, 1989). Sifat pasang surut perambatan gelombang pasang surut menuju perairan dangkal yang berbentuk semiterutup dapat berubah, mengalami amplifikasi atau peredaman, tergantung mekanisme resonansi daerah tersebut (Pariwono, 1989).

Pasang surut memengaruhi proses fisik seperti penghempasan air laut ke pantai akibat gelombang dan pembilasan massa air di muara, laguna, dan teluk. Pasang surut juga memengaruhi aktivitas biologis seperti zonasi tanaman dan kegiatan makan burung, ikan, dan organisme laut yang lain, serta proses yang terkait dengan perendaman dan pengeringan permukaan daratan di zona intertidal, yaitu daerah yang terletak antara pasang tertinggi dan surut terendah (Davidson & Arnott, 2010).

Selat Madura merupakan perairan yang berbentuk teluk semiterutup dengan selat sempit di bagian utaranya. Selat menyempit di bagian barat, sehingga dapat diabaikan dan dapat dianggap sebagai teluk semiterutup. Teluk semiterutup memiliki amplitudo pasang surut yang tinggi. Setelah air laut pasang memasuki perairan teluk, gelombang pasang progresif menjadi terkondisikan pada teluk yang berbentuk seperti celah sempit yang merambat dari mulut teluk ke garis-garis pantai dan menginduksi energi pasang surut untuk mempercepat arus. Percepatan

ini terus berlanjut untuk jarak yang signifikan antara mulut teluk dengan tepi pantai di ujung teluk yang mengakibatkan amplifikasi pasang surut (Goodbred & Yoshiki, 2012).

Kajian tentang fenomena pasang surut dan amplifikasinya serta prakiraan dampak yang ditimbulkannya telah dilakukan di perairan pesisir Probolinggo. Dampak amplifikasi yang akan dibahas dalam tulisan ini adalah pola sirkulasi, pola distribusi material yang tersuspensi, pendangkalan yang ditunjukkan oleh rata-rata lumpur dan banjir rob. Kajian ini diharapkan dapat menjawab penyebab pembentukan rata-rata lumpur di pesisir Gending, Dringu, dan area pelabuhan, serta banjir rob di Kota Probolinggo.

Metodologi

Data pasang surut, batimetri, arus, dan kekeruhan yang digunakan adalah data hasil penelitian yang dilakukan pada bulan Mei 2012 dan Agustus 2015. Lingkup wilayah penelitian adalah perairan Probolinggo menggunakan sarana kapal nelayan. Posisi diukur dengan GPS Garmin 276C.

Pengukuran fluktuasi tinggi permukaan laut dilakukan secara terus-menerus di titik yang telah ditetapkan di dermaga perikanan, Dinas Perikanan dan Kelautan Probolinggo di posisi 113,225 BT dan 7,728 LS menggunakan *Tide and Wave Recorder* RBR tipe TWR2050 dengan interval 5 menit selama 30 hari, mulai tanggal 5 Mei 2012 jam 0:10 WIB hingga 6 Juni 2012 jam 23:50 WIB. Sebagai pembandingan, dilakukan juga pengukuran pasang surut di pelabuhan Tanjung

Perak, Surabaya. Pengukuran dilakukan selama 14 hari, mulai tanggal 15 Agustus 2015 jam 19:00 WIB pada saat bulan gelap hingga tanggal 29 Agustus 2015 jam 19:21 WIB pada saat bulan purnama. Tipe pasut ditentukan dengan rumus bilangan Formzahl, yaitu hasil bagi antara jumlah amplitudo komponen pasut K1 dan O1 dengan jumlah amplitudo M2 dan S2 dan diekspresikan dalam bentuk persamaan $F = (K1 + O1)/(M2 + S2)$. Selain bilangan Formzahl, dilakukan juga analisis *power spectra* yang bermanfaat dalam menentukan puncak-puncak pasang dalam skala harian dan faktor-faktor non pasang surut.

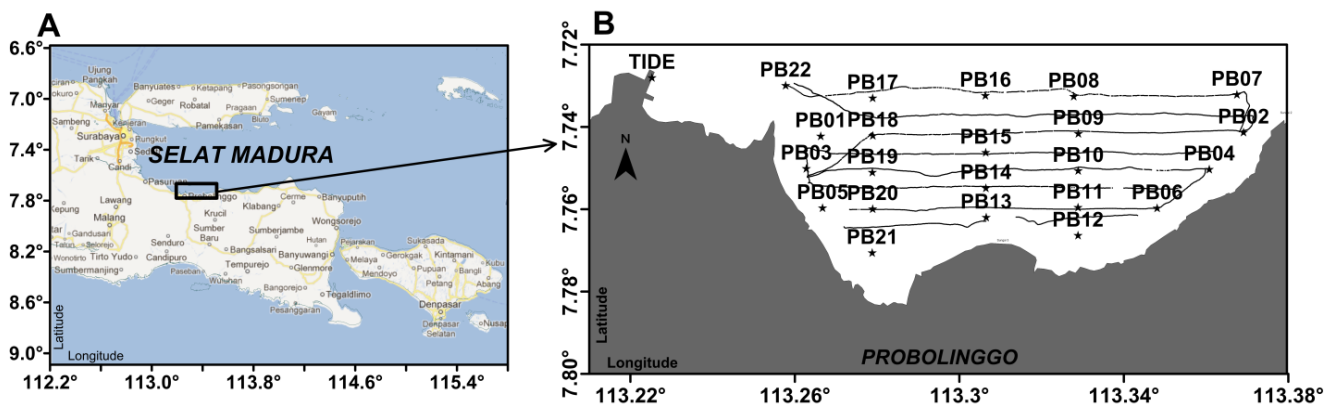
Pengukuran arus laut dan kedalaman perairan dilakukan dengan *Acoustic Doppler Current Profiler* (ADCP) 1200 KHz. Pengukuran arus dan batimetri dilakukan sepanjang lintasan perahu yang bergerak dengan kecepatan 4–5 knot. Pengukuran profil vertikal arus dilakukan dengan interval kedalaman 25 cm mulai dari permukaan hingga kedalaman 21 m.

Pengambilan data turbiditas dari 19 stasiun sampling dilakukan secara kontinyu dari permukaan hingga dekat dasar menggunakan turbidimeter yang terpasang pada alat *Conductivity Temperature Depth* (CTD) tipe SBE 19 plus V2 dari Seabird Electronic Inc.

Hasil

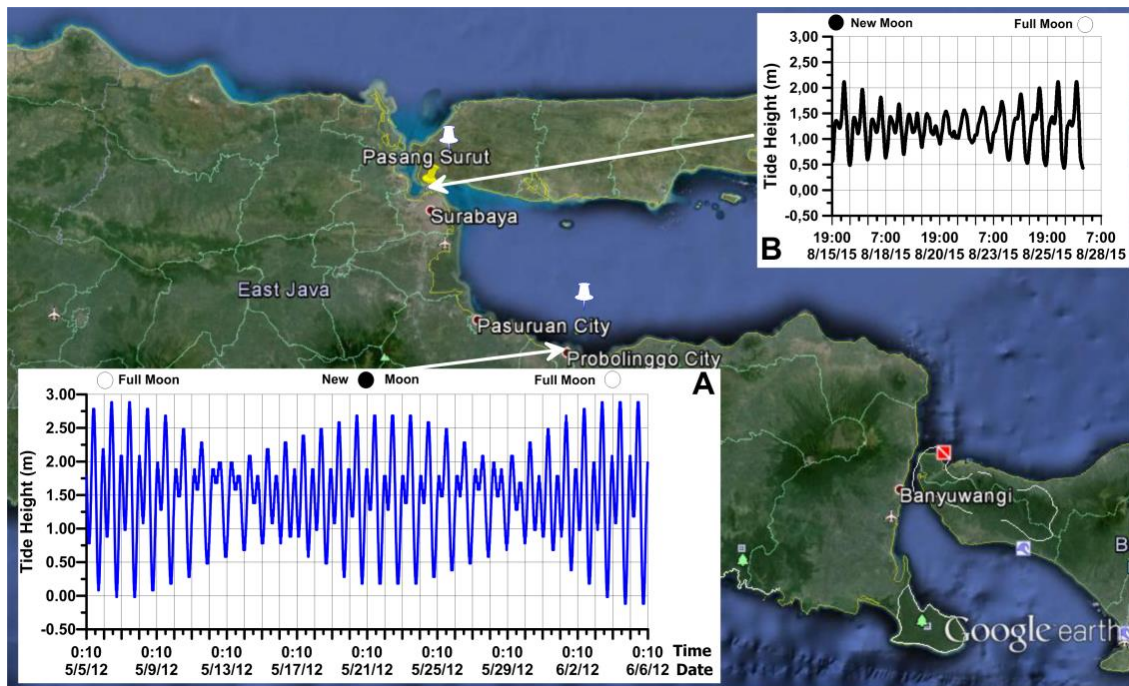
Tipe Pasang Surut Probolinggo

Kisaran pasut (*tidal range*) di perairan Probolinggo adalah 3,00 m dengan tinggi muka air laut rata-rata 1,6 m.



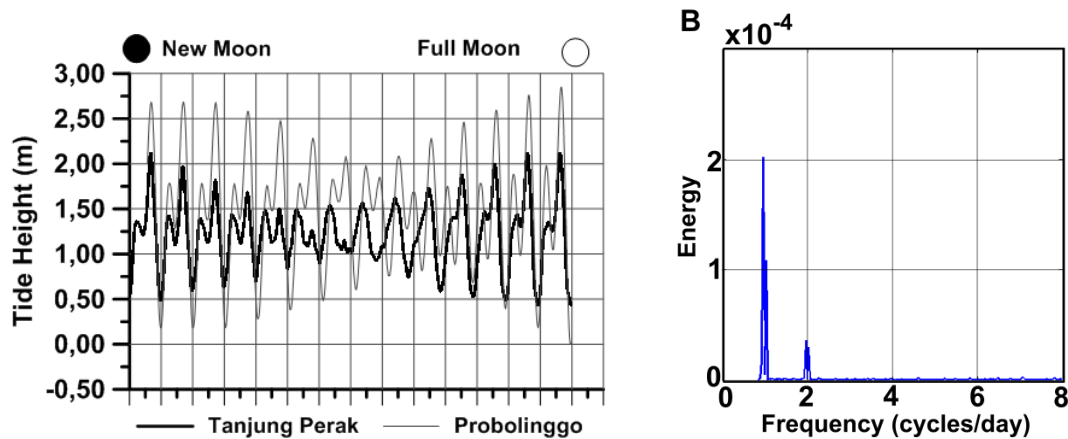
Gambar 1. A. Selat Madura. B. Garis lintasan pengukuran arus dan batimetri. PB: stasiun pengambilan data turbiditas. TIDE: stasiun pasang surut di perairan pantai Probolinggo, Mei 2012.

Figure 1. A. Madura Strait. B. Track lines for current and bathymetry measurements. PB: turbidity sampling stations. TIDE: tidal stations in Probolinggo coastal waters, May 2012.



Gambar 2. A. Data pasang surut di perairan Probolinggo, Mei 2012. B. Data pasang surut di pelabuhan Tanjung Perak, Surabaya, Agustus 2015.

Figure 2. A. Tidal data in Probolinggo waters, May 2012. B. Tidal data in Tanjung Perak harbour, Surabaya, August 2015.



Gambar 3. A. Perbandingan pasang surut pelabuhan Tanjung Perak, Surabaya, dengan perairan Probolinggo. B. *Power spectra* pasang surut perairan Probolinggo.

Figure 3. A. Comparison of tidal data in Probolinggo waters and Tanjung Perak harbour, Surabaya. B. Tidal power spectra in Probolinggo waters.

Di pelabuhan Tanjung Perak, Surabaya, pada saat bulan gelap hingga bulan terang, kisaran pasut adalah 1,76 m dengan tinggi muka air laut rata-rata 0,88 m (Gambar 2). Perbedaan tinggi kisaran pasang surut antara pelabuhan Tanjung Perak dan perairan Probolinggo saat bulan gelap hingga bulan terang adalah 1,14 m (Gambar 3A).

Mengingat pasang surut merupakan efek gaya pembangkit bergejala periodik, maka pasang

surut dapat dinyatakan sebagai jumlah linier gelombang-gelombang stasioner yang bergerak. Setiap gelombang harus mewakili setiap gaya gerak periodik dan dinamakan komponen pasang surut. Dalam jangka waktu yang lama kombinasi suku-suku pasang surut yang mungkin terjadi dapat berupa kombinasi frekuensi yang menimbulkan variasi komponen pasang surut. Berdasarkan periode pengulangannya, gelombang

pasang surut dapat dikelompokkan ke dalam tiga komponen utama (Khusuma, 2008), yaitu komponen semidiurnal (setengah harian), komponen diurnal (harian), dan komponen periode panjang (dwi mingguan atau lebih). Berdasarkan tipenya, pasut dapat dibagi menjadi empat tipe (Khusuma, 2008), yaitu tipe pasang surut harian tunggal (*diurnal tide*), pasang surut harian ganda (*semidiurnal tide*), pasang surut campuran condong harian tunggal (*mixed tide prevailing diurnal*), dan pasang surut campuran condong harian ganda (*mixed tide prevailing semidiurnal*).

Analisis pasang surut di daerah Probolinggo menggunakan analisis harmonik untuk mendapatkan amplitudo dan fase dari tiap komponen pasang surut. Gaya penggerak pasang surut dapat diuraikan sebagai hasil gabungan sejumlah komponen harmonik pasang surut dan dikelompokkan menjadi 3 bagian, yaitu komponen tengah harian, harian, dan periode panjang. Beberapa komponen harmonik penting diperlihatkan dalam Tabel 1.

Berdasarkan penghitungan, nilai Formzahl untuk data pasang surut Probolinggo adalah 0,85 dan analisis *power spectra* menunjukkan bahwa terdapat dua puncak dengan frekuensi 1 dan 2 kali dalam sehari (Gambar 3B), sehingga perairan Probolinggo dapat diklasifikasikan sebagai pasang surut campuran condong harian ganda (*mixed tide prevailing semidiurnal*) yang berarti terjadi dua kali pasang dan dua kali surut dalam 24 jam.

Kisaran pasang surut di perairan Probolinggo relatif tinggi dibandingkan dengan kisaran pasang surut di perairan Laut Jawa dan sekitarnya. Kenaikan pasut dalam kurun waktu tahun 2005–2011 di perairan Surabaya Bagian Barat mulai dari Kecamatan Semampir hingga ke arah utara yang meliputi Kabupaten Gresik dan Tuban adalah 1,87 m, sedangkan di Surabaya Bagian Timur, mulai dari Kecamatan Kenjeran hingga Kabupaten Sidoarjo kisaran pasut rata-rata 2,91 m. Dengan demikian, perbedaan tinggi pasang surut antara zona barat dan zona timur mencapai 1,04 m (Sulma, 2012).

Pembahasan

Amplifikasi Pasang Surut

Pasang surut yang merupakan gelombang panjang yang merambat dari laut dalam ke perairan teluk dengan kedalaman konstan yang dibatasi oleh daratan di salah satu ujungnya dapat mengalami resonansi (Dean & Dalrymple, 1984).

Salah satu sifat gelombang untuk jenis gelombang yang terperangkap yaitu terdapat frekuensi gelombang dengan karakteristik tertentu sesuai dengan mode osilasi bebas. Mode inilah yang kemudian menyebabkan resonansi gelombang pada mode Helmholtz di daerah teluk dengan bentuk tertentu (perairan teluk semitertutup). Gelombang bisa terperangkap di sekitar teluk atau pulau oleh topografi dasar laut (Mei, 1983).

Variasi amplitudo pasang surut di perairan teluk terutama berasal dari empat proses fisik, yaitu resonansi gelombang berdiri dari refleksi gelombang datang saat pasang, efek gesekan, konvergensi geometri (pengurangan luas penampang ke arah pesisir), dan efek inersia (van Rijn, 2011). Resonansi dan konvergensi geometri pantai menyebabkan peningkatan amplitudo pasang surut jauh lebih besar dibandingkan dengan pasang surut di laut terbuka. Resonansi gelombang berdiri mudah dipahami dalam hal saluran prismatik sederhana, yaitu gelombang dapat digambarkan sebagai hasil dari superposisi antara gelombang datang dan gelombang yang dipantulkan (Holleman & Mark, 2014).

Ketika gelombang pasang terhalang atau terperangkap di sebuah pantai di ujung teluk, gelombang tersebut akan terpantul dan membentuk sebuah gelombang berdiri (Holleman & Mark, 2014). Mekanisme amplifikasi pasang surut di Probolinggo diilustrasikan dalam Gambar 4. Kolom kiri yang menunjukkan satu paket gelombang pasang memasuki teluk dari laut terbuka. Kolom tengah yang menunjukkan refleksi dari gelombang pasang sebelumnya bergerak dari teluk. Kolom kanan menunjukkan kombinasi yang dihasilkan dari dua gelombang, dengan asumsi tidak ada redaman akibat gesekan. Apabila gelombang datang dan gelombang pantul mempunyai fase yang sama, maka akan terjadi penguatan, sedangkan jika fasenya berbeda akan terjadi pelemahan.

Sifat gelombang berdiri antara lain bentuk gelombangnya tidak bergerak melalui medium. Gelombang tersebut merupakan gelombang berjalan yang dipantulkan kembali sepanjang lintasannya sendiri. Gelombang ini, apabila antara puncak dan lembah tidak ada rentang pasang surut, disebut sebagai node. Bentuk gelombang hanya naik dan turun, kecuali pada node. Kejadian sebaliknya disebut antinode. Jika node dari gelombang ini terjadi di dekat pintu masuk teluk, kisaran pasang akan sangat diperkuat. Jika titik antinode terbentuk dekat pintu masuk teluk, maka tidak akan ada peningkatan pasang yang signifikan. Bentuk dan tinggi gelombang pasang

surut akibat situasi ini tergantung pada panjang dan kedalaman teluk (Hicks, 2006).

Kecepatan vertikal terbesar atau amplitudo terbesar terdapat di ujung teluk yang tertutup, sedangkan bagian yang terbuka mempunyai amplitudo yang sama dengan laut terbuka. Kecepatan horizontal maksimum ditemukan di

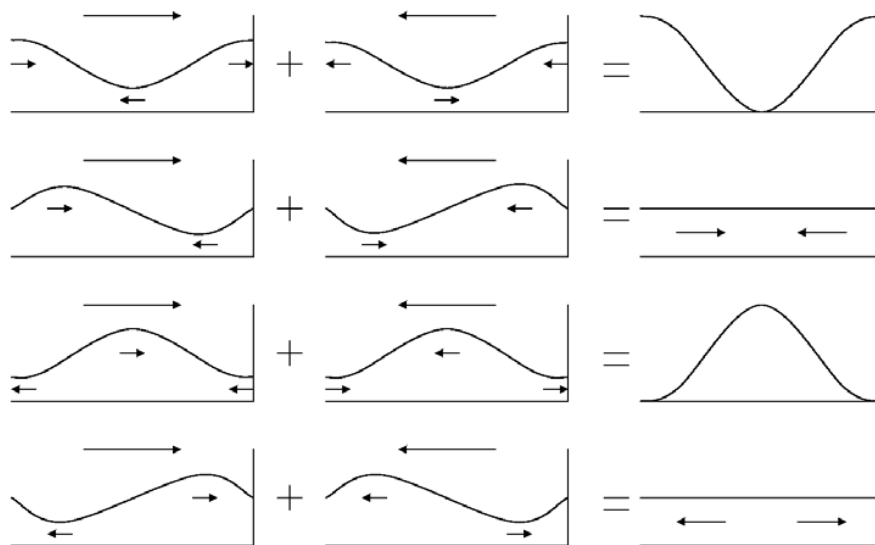
pintu masuk air laut yang ditunjukkan oleh node dalam Gambar 5. Secara temporal kecepatan arus pasang surut maksimum ditemukan di pintu masuk. Air laut akan masuk dan keluar dengan cepat untuk mengisi atau mengosongkan perairan teluk.

Tabel 1. Komponen harmonik pasang surut utama di perairan Probolinggo dan pelabuhan Tanjung Perak, Surabaya.

Table 1. Harmonic components in Probolinggo waters and Tanjung Perak harbour, Surabaya.

Components	Symbol	Period (hours)*	Probolinggo Amplitude	Probolinggo Phase	Tanjung Perak Amplitude	Tanjung Perak Phase
Semidiurnal						
- Principal lunar	M2	12.421	0.600	263.610	0.262	265.520
- Principal solar	S2	12.000	0.290	338.850	0.180	345.660
- Larger lunar elliptic	N2	12.658	0.111	164.160	0.039	159.580
- Luni-solar semidiurnal	K2	11.967				
Diurnal						
- Luni-solar diurnal	K1	23.934	0.510	303.490	0.372	325.740
- Principal lunar diurnal	O1	25.819	0.247	214.040	0.260	207.030
- Principal solar diurnal	P1	24.066				
- Larger lunar elliptic	Q1	26.868				
Long-period						
- Lunar fortnightly	Mf	327.850				
- Lunar monthly	Mm	661.310				
- Solar semiannual	Ssa	4383.050				

*Sumber: Stewart, 2003



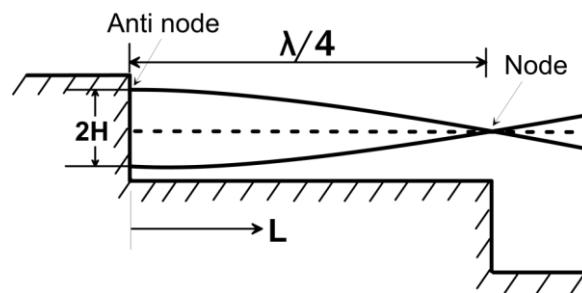
Gambar 4. Ilustrasi proses perambatan gelombang di teluk (Hicks, 2006).

Figure 4. Illustration of wave propagation in gulf (Hicks, 2006).

Persamaan untuk kecepatan gelombang pada gelombang air dangkal adalah $C = \sqrt{gh}$ (Stewart, 2003). Karena $C = L/T$ maka $L = T \times \sqrt{gh}$. L adalah panjang teluk dan konstan, T adalah periode, g adalah percepatan gravitasi, dan h adalah kedalaman perairan. Pasang surut adalah gelombang panjang yang merupakan fenomena alam di bumi yang mengikuti persamaan gerak untuk skala besar yang dinyatakan dengan bilangan Rossby, $Ro = U/(L.f)$, dengan U adalah kecepatan arus (dalam oseanografi) atau angin (dalam meteorologi), L adalah skala panjang (*length scale*), dan $f = 2 \Omega \sin \phi$ adalah parameter gaya Coriolis, dengan Ω adalah kecepatan sudut rotasi bumi sebesar $7,3 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ dan ϕ adalah posisi lintang. Efek gaya Coriolis perlu

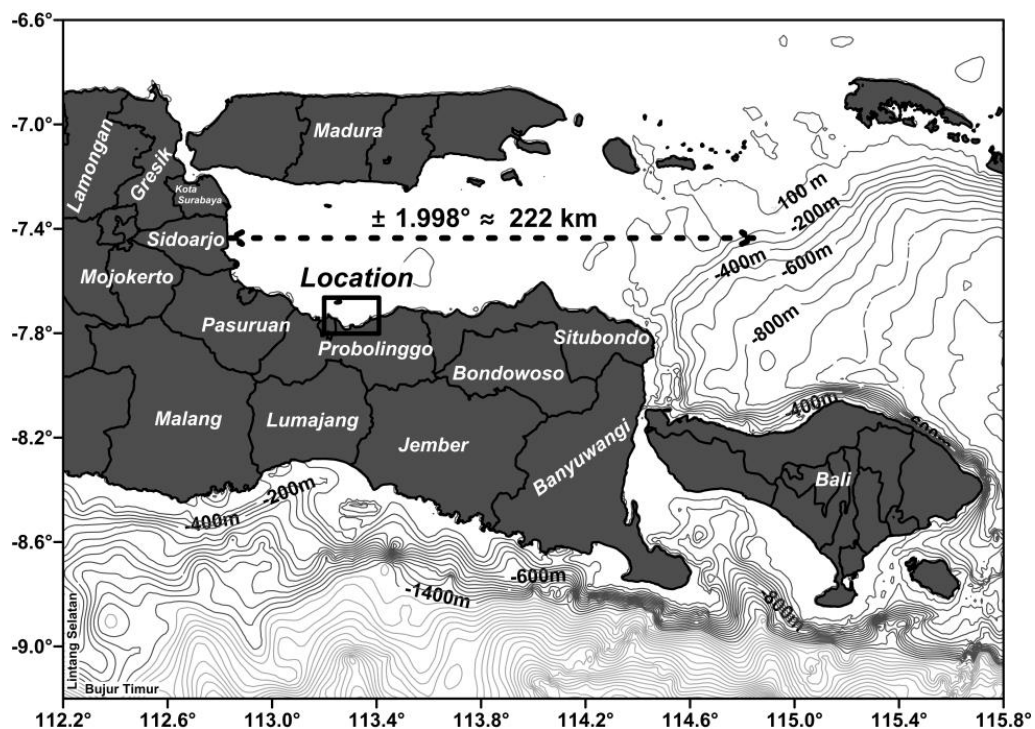
dipertimbangkan dalam hidrodinamika pasang surut untuk area yang luas (Lin et al., 2000). Karena perairan Probolinggo merupakan daerah yang sempit, maka pengaruh gaya Coriolis dapat diabaikan.

Studi pasang surut yang dilakukan di Teluk Thailand oleh Yanagi dan Takao (1998) menemukan bahwa periode pasang surut konstituen semidiurnal dan diurnal jauh lebih pendek daripada periode inersia dan untuk lebar teluk yang lebih sempit daripada panjang deformasi Rossby, maka gaya Coriolis tidak berpengaruh terhadap fenomena pasang surut.



Gambar 5. Skema osilasi pasang surut di teluk (Lin et al., 2000).

Figure 5. Schema of tidal oscillation in gulf (Lin et al., 2000).



Gambar 6. Perairan semitertutup Selat Madura dengan perairan Probolinggo di bagian selatannya.

Figure 6. Semi-enclosed sea of Madura Strait with Probolinggo waters in the south.

Untuk menelaah geometri teluk yang semiterutup, persamaan struktur gelombang berdiri dapat digunakan. Ketika gelombang panjang dengan amplitudo $H/2$ mencapai teluk dengan topografi dasar yang dangkal, terjadi superposisi antara gelombang datang dan gelombang yang dipantulkan. Jarak antara tepi pantai di teluk ke node dapat diekspresikan dengan $\pi/2$, sehingga $kL = \pi/2$. Karena $\lambda = 2\pi$, maka $L = \lambda/4$, dengan λ = panjang gelombang (Dean & Dalrymple, 1984). Dengan demikian, panjang teluk adalah seperempat panjang gelombang, $L = \lambda/4$ dan kecepatan fase gelombang air dangkal adalah $C = \sqrt{gh} = \lambda/T$, sehingga periode gelombangnya adalah $T = 4L/\sqrt{gh}$ (Gambar 5).

Dengan menerapkan persamaan Dean and Dalrymple (1984) maka periode alamiah perairan Selat Madura dengan jarak dari ujung selat hingga kedalaman 200 m adalah 222 km (Gambar 6), percepatan gravitasi $9,8 \text{ m/s}^2$, kedalaman rata-rata 40 m, maka diperoleh periode $T = 12,46$ jam (Gambar 6). Periode 12,46 jam ini merupakan periode inersia atau periode alami teluk yang nilainya mendekati periode konstituen M2 dengan $T = 12,42$ jam. Dengan demikian, teluk ini merupakan resonator gelombang pasang surut M2.

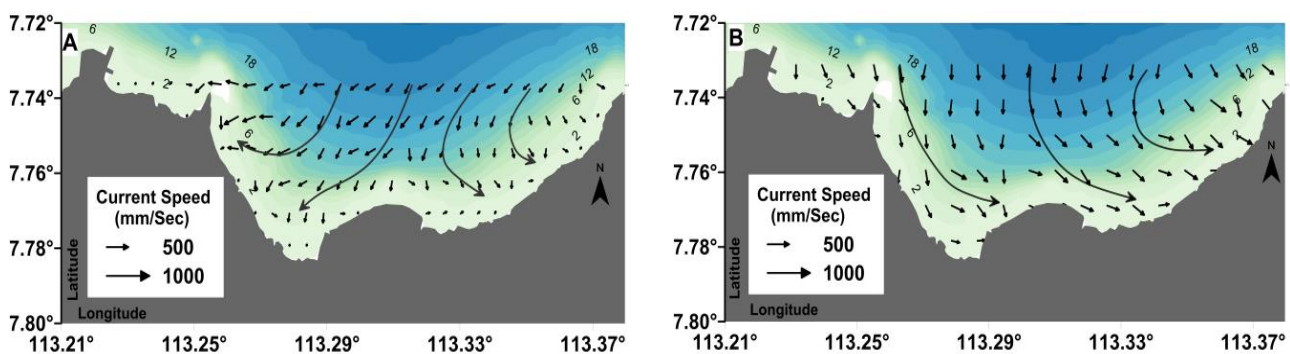
Dampak Amplifikasi Pasang Surut

Amplifikasi pasang surut di Selat Madura sangat berpengaruh pada kecepatan dan arah arus di perairan Probolinggo. Pada saat pasang, air laut masuk ke perairan melalui perairan bagian timur menuju perairan pesisir Probolinggo, kemudian sebagian membelok ke selatan dan menyusuri pantai kembali ke arah timur melalui tepi pantai,

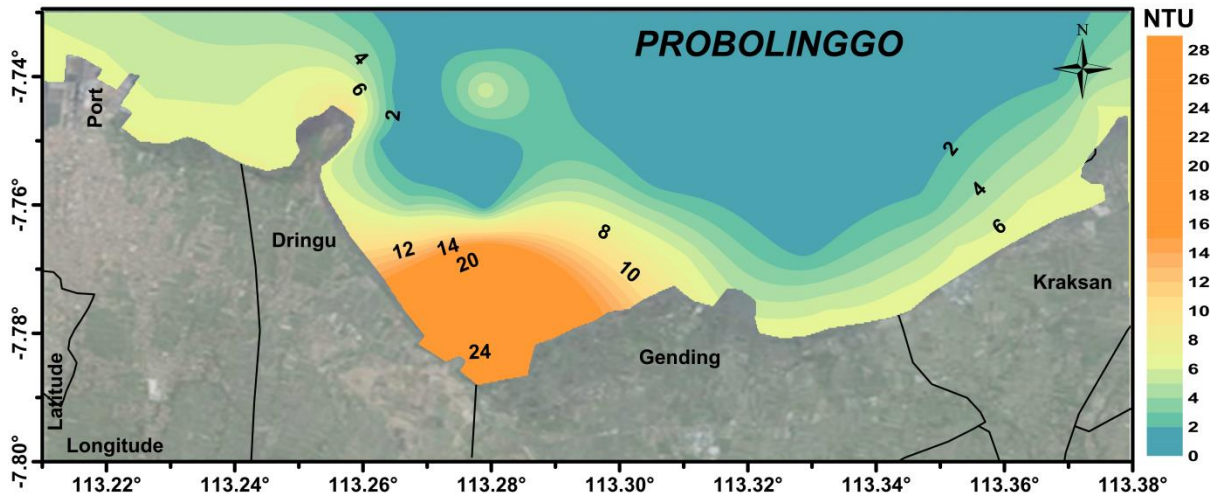
sebagian lagi menyusuri pantai menuju ke arah barat. Pada saat surut, arus dari arah utara mengalir ke selatan, kemudian menyusuri pantai ke arah timur. Sirkulasi massa air di perairan ini selalu mengarah ke pesisir, baik saat pasang maupun saat surut. Kecepatan arus maksimum yang terdeteksi antara $66,3 \text{ cm/s}$ pada saat surut dan $80,4 \text{ cm/s}$ saat pasang (Gambar 7).

Pola sirkulasi tersebut menyebabkan konsentrasi TSS yang selalu lebih tinggi di perairan pesisir. Pada saat arus melemah ketika terjadi perubahan dari pasang menuju surut atau sebaliknya, pengendapan yang intensif akan terjadi, sehingga dijumpai lokasi-lokasi rataan pasang surut (*tidal flat*) atau disebut juga rataan lumpur (*mudflat*). Konsentrasi TSS tinggi terdapat di perairan Dringu. Pengendapan material yang terbawa oleh sungai sudah terendapkan sejak mencapai muara sungai. Penyebaran TSS yang diperoleh dari penelitian yang dilakukan pada bulan Mei 2012 berasal dari arah muara dan menyebar ke perairan yang lebih dalam di wilayah timur laut Dringu yang kemungkinan besar akan terendapkan di daerah ini dan akan terbentuk sedimentasi yang pada akhirnya menyatu dengan muara Dringu (Gambar 8).

Penyebaran TSS yang relatif tinggi juga dijumpai di sekitar pelabuhan Probolinggo, sehingga dikhawatirkan menyebabkan pendangkalan area pelabuhan. Penyebaran TSS terjadi di sepanjang pesisir Probolinggo, mulai dari Tanjung Gending hingga ke sebelah barat pelabuhan. Penyebaran TSS ini terjebak di perairan pesisir dan pada konsentrasi rendah di perairan yang lebih dalam.



Gambar 7. A. Pola arus di perairan Probolinggo saat pasang dan B. saat surut selama penelitian, Mei 2012.
Figure 7. A. Current pattern of Probolinggo waters at high tide and B. at low tide during data acquisition, May 2012.



Gambar 8. Penyebaran *total suspended solid* (TSS) di perairan Probolinggo, Mei 2012.
Figure 8. Total suspended solid (TSS) distribution in Probolinggo waters, May 2012.

Sedimentasi yang intensif di perairan pesisir Probolinggo menyebabkan kelandaian di daerah sebelah barat Tanjung Gending yang merupakan daerah dengan kemiringan rendah (kemiringan maksimal 3°) yang terlihat dari beberapa irisan menegak berupa profil kedalaman. Profil kedalaman A-B menunjukkan bahwa kedalaman di daerah ini menurun secara berangsur-angsur dari kedalaman 0 hingga 26 m dengan kemiringan 1° . Jika dilihat dari kemiringannya, daerah ini relatif datar karena kedalamannya berubah hanya sekitar 26 m dengan jarak sejauh 4.5 km dari pantai.

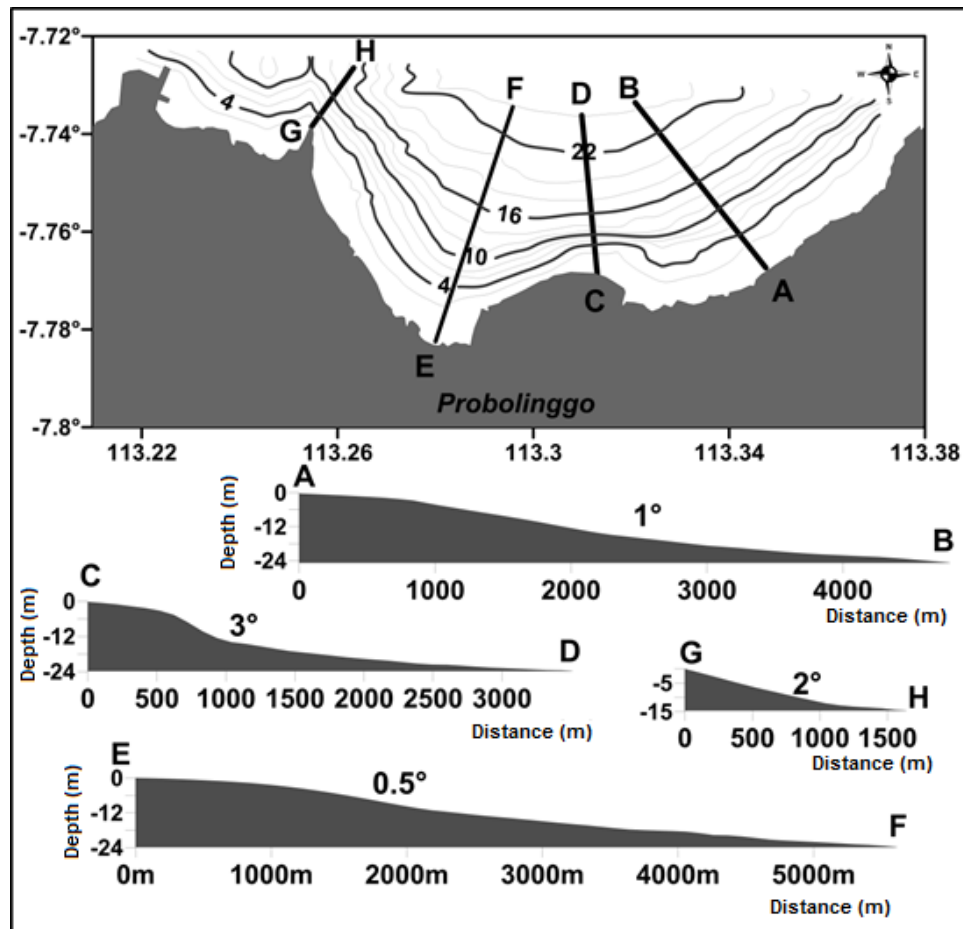
Profil kedalaman C-D memperlihatkan bahwa kedalaman di daerah ini relatif datar hingga jarak 500 m dari pantai dan kemudian dari jarak 500 hingga 600 m dari pantai terlihat kenaikan topografi dasar laut dari kedalaman 1,5 menjadi 1 m. Hal ini kemungkinan disebabkan oleh sedimentasi di daerah ini (Gambar 9). Selanjutnya, dari jarak 600–1.000 m dari pantai kedalamannya menurun dengan cepat, yaitu berubah dari 1 hingga 20 m dengan kemiringan 3° . Setelah itu, kedalamannya berangsur-angsur menurun hingga 26 m pada jarak 3 km dari garis pantai.

Daerah Dringu dengan profil kedalaman E-F memperlihatkan bahwa kedalaman di daerah ini menurun secara berangsur-angsur dari 0 hingga 26 m dengan kemiringan $0,5^\circ$. Jika dilihat dari kemiringannya, maka daerah ini sangat datar karena kedalamannya berubah hanya sekitar 26 m untuk jarak 6 km dari garis pantai.

Profil kedalaman G-H mempunyai kedalaman yang relatif datar hingga jarak 900 m dari pantai. Kemudian dari jarak 900–1.500 m dari pantai terdapat kenaikan topografi dasar laut dari kedalaman 6 m menjadi 4 m, yang kemungkinan terjadi karena sedimentasi daerah ini. Kemudian, kedalaman pada jarak 1.500–1.700 m menurun secara lebih cepat, yaitu dari 4 m menjadi 10 m dengan kemiringan 2° . Setelah itu, kedalamannya berangsur-angsur menurun hingga 11 m pada jarak 1,9 km dari garis pantai.

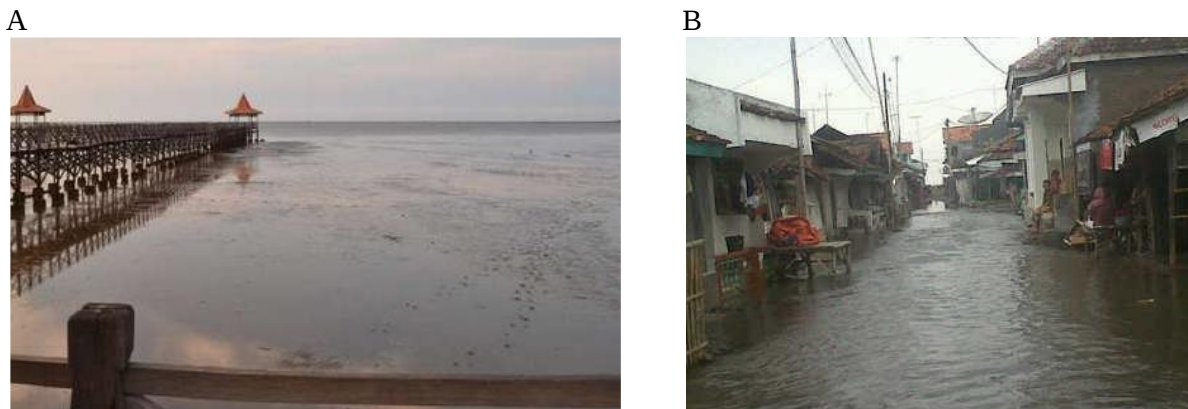
Amplifikasi pasang surut menyebabkan arah arus selalu menuju ke pesisir, baik ketika pasang maupun ketika surut. Pola arus tersebut akan menyebabkan TSS terdistribusi di sepanjang pesisir, baik pesisir timur maupun pesisir barat teluk. TSS akan mengendap dan menyebabkan sedimentasi yang intensif. Sedimentasi ini menyebabkan ratahan pasang surut (*tidal flat*) atau ratahan lumpur (*mudflat*) yang luas terbentuk hingga 3 km dari garis pantai di beberapa lokasi, seperti di pantai Bentar.

Indikator keberadaan sedimentasi yang aktif adalah kondisi dasar laut pesisir Probolinggo dengan kemiringan topografi dasar $1\text{--}3^\circ$ sepanjang 6 km dari tepi pantai hingga kedalaman 26 m, terutama di daerah Dringu dengan kemiringan $0,5^\circ$. Fenomena amplifikasi pasang surut juga berdampak pada penggenangan air di wilayah pesisir (banjir rob) ketika amplifikasi pasang surut terjadi secara simultan dengan air hujan.



Gambar 9. Profil batimetri perairan Probolinggo, Mei 2012.

Figure 9. Bathymetric profile of Probolinggo waters, May 2012.



Gambar 10. A. Rataan pasang surut atau rataan lumpur di pesisir pantai Bentar. B. Banjir rob di Desa Kalibuntu, Kecamatan Kraksaan, Kabupaten Probolinggo (Detik News, 2014).

Figure 10. A. Tidal flat or mudflat in Bentar beach, Probolinggo. B. Rob flood in Kalibuntu village, Kraksaan District, Probolinggo (Detik News, 2014).

Kenaikan pasang surut yang tinggi dapat menyebabkan genangan secara permanen atau episodik. Area dengan kenaikan pasang surut yang besar sangat rentan terhadap genangan yang permanen. Area tersebut juga rentan terhadap banjir berkala (Radjawane et al., 2009). Selain itu,

amplifikasi pasang surut merupakan faktor penting dalam penetrasi massa air laut ke arah daratan melalui muara sungai (van den Bruwaene et al., 2013).

Informasi tentang banjir rob yang menerjang tiga dusun di Desa Kalibuntu,

Kecamatan Kraksaan, Kabupaten Probolinggo, mengakibatkan akses perekonomian di kawasan tersebut lumpuh total karena jalan utama terendam banjir setinggi 60–100 cm. Banjir Rob ini sering terjadi, bahkan tiap bulan dua kali bencana ini menimpa warga (DetikNews, 2014). Pada saat itu bulan purnama terjadi pada 12 Juli 2014, sehingga daerah Probolinggo mengalami pasang maksimum setinggi 3 m. Pasang tertinggi dan surut terendah di perairan Probolinggo terjadi secara periodik dwi mingguan mengikuti pola bulan gelap dan bulan purnama.

Faktor lain yang menyebabkan amplifikasi adalah angin pasat tenggara yang bertiup sepanjang musim timur secara terus-menerus sepanjang bulan Juli–September. Penumpukan massa air terjadi akibat tiupan angin dengan gaya Coriolis yang bekerja ke kiri di selatan khatulistiwa ke arah pantai di sepanjang pesisir Probolinggo. Tiupan angin tersebut mendorong massa air ke pesisir dan bersuperposisi dengan gelombang pasang surut membentuk gelombang tegak. Gelombang ini merupakan penjumlahan dari dua gelombang berjalan dan menjalar ke arah yang berlawanan.

Kesimpulan

Perairan Probolinggo mempunyai kenaikan pasang surut 3,00 m dengan tinggi muka air laut 1,60 m. Berdasarkan nilai Formzahl (0,85) dan analisis *power spectra*, perairan Probolinggo diklasifikasikan sebagai pasang surut campuran dengan dominasi semidiurnal. Teluk Probolinggo merupakan resonator dari gelombang pasang surut M2. Dampak amplifikasi terhadap perairan pesisir Probolinggo antara lain adalah arah arus yang selalu ke pesisir, baik saat pasang maupun saat surut yang mengakibatkan penyebaran sedimen tersuspensi yang relatif tinggi di sepanjang pesisir Gending, Dringu, dan di sekitar area pelabuhan. Sedimentasi yang intensif menyebabkan kelandaian dan pembentukan rata-rata pasang surut atau rata-rata lumpur yang luas. Selain itu, fenomena amplifikasi pasang surut berdampak pada penggenangan air di daratan rendah (banjir rob) di desa-desa pesisir Probolinggo.

Persantunan

Ucapan terima kasih disampaikan kepada Kepala Pusat Penelitian Oseanografi LIPI atas penggunaan data pasang surut dan kekeruhan pada

penelitian yang didanai oleh DIPA Pusat Penelitian Oseanografi tahun anggaran 2012 dan juga kepada Badan Informasi Geospasial (BIG) atas data yang diperoleh pada pengukuran yang dilakukan pada bulan Agustus 2015.

Daftar Pustaka

- Davidson R & Arnott. 2010. *Introduction to Coastal Processes and Geomorphology*. Cambridge University Press, The Edinburgh Building, Cambridge CB2 8RU, UK, 442 pp.
- Dean RG & RA Dalrymple. 1984. *Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists*. Englewood Cliffs, New York. 353 pp.
- Detik News. 2014. Tiga Dusun di Probolinggo Diterjang Banjir Rob, Aktivitas Warga Lumpuh. <http://news.detik.com/berita-jawa-timur/2635685/tiga-dusun-di-probolinggo-diterjang-banjir-rob-aktivitas-warga-lumpuh>. (diakses 21 Maret 2016, 15:41 WIB).
- Goodbred SL Jr & SRA Yoshiki. 2012. *Tide-Dominated Deltas*. In Davis Jr & RW Dalrymple (Eds). *Principles of Tidal Sedimentology*. 129 DOI 10.1007/978-94-007-0123-6_7. Springer Science. 982–984.
- Hicks SD. 2006. *Understanding Tides*. US Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, National Ocean Service, NOAA. 83 pp.
- Holleman RC & TS Mark. 2014. Coupling of Sea Level Rise, Tidal Amplification, and Inundation. *Journal of Physical Oceanography*, American Meteorological Society, 44: 1439–1455. DOI: 10.1175/JPO-D-13-0214.1.
- Khusuma FH. 2008. Analisis Harmonik dengan Menggunakan Teknik Kuadrat Terkecil untuk Penentuan Komponen-komponen Pasut di Perairan Dangkal dari Data Topex/Poseidon. Program Studi Teknik Geodesi dan Geomatika Fakultas Ilmu dan Teknologi Kebumihan Institut Teknologi Bandung. Bandung.
- Lin MC, JJ Wen & KT Ting. 2000. Anomalous amplifications of semidiurnal tides along the western coast of Taiwan. *Journal of Ocean Engineering*, 28: 1171–1198.
- Mei CC. 1983. *The applied dynamics of ocean surface waves*. Chapter 6. Wiley, New York.
- Mihardja DK & H Safwan. 1989. *Dinamika Pasang Surut di Perairan Pantai*. In Otto SR Ongkosongo, Suyarso (Eds). *Pasang Surut*. Pusat Penelitian dan Pengembangan Oseanologi, Jakarta. 257 pp.

- Pariwono JI. 1989. *Kondisi Pasang Surut di Indonesia*. In Otto SR Ongkosongo, Suyarso (Eds). *Pasang Surut*. Pusat Penelitian dan Pengembangan Oseanologi, Jakarta. 257 pp.
- Radjawane IM, S Hadi & A Krishnasari. 2009. *Identifikasi Kerentanan Pesisir terhadap Kenaikan Muka Laut di Jakarta Utara*. Kenaikan Muka Laut Relatif dan Kerentanan Wilayah Pesisir dan Pulau-pulau Kecil di Indonesia: Status Report Hasil-hasil Penelitian, BRKP, Jakarta.
- Situs Resmi Pemerinah Kota Probolinggo. 2012. Letak Geografis, klimatologi, topograafi, dan hidrologi wilayah Kota Probolinggo, <http://probolinggokota.go.id>. (Diakses 21 Maret 2016).
- Stewart RH. 2003. *Introduction to Physical Oceanography*. Department of Oceanography, Texas A & M University. 344 pp.
- Sulma S. 2012. *Kerentanan Pesisir terhadap Kenaikan Muka Air Laut*. Tesis, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Indonesia, 116 pp.
- van den Bruwaene W, Y Plancke, T Verwaest & F Mostaert. 2013. *Interestuarine comparison: Hydrogeomorphology: Hydro- and geomorphodynamics of the tide estuaries*. Scheldt, Elbe, Weser and Humber. Version 4. WL Rapporten, 770_62b. Flanders Hydraulics Research: Antwerp, Belgium.
- van Rijn LC. 2011. Analytical and numerical analysis of tides and salinities in estuaries; Part I: Tidal wave propagation in convergent estuaries. *Ocean Dyn.*, 61: 1719–1741, doi:10.1007/s 10236-011-0453-0.
- Yanagi T & T Takao. 1998. Clockwise phase propagation of semi-diurnal tides in the gulf of Thailand. *J. Oceanography*, 54: 143–150.