

Karakteristik Transformasi Pasang Surut di Delta Berau, Kalimantan Timur

Ayi Tarya*, M. Faiq Yasna , Ivonne M. Radjawane, Hanif S. Sutiyoso

Program Studi Oseanografi, Fakultas Ilmu dan Teknologi Kebumihan, Institut Teknologi Bandung
Jl. Ganesha 10, Bandung, Jawa Barat 40132 Indonesia
Email: ayi.tarya@itb.ac.id

Abstrak

Karakteristik gelombang pasang surut akan mengalami transformasi ketika menjalar dari laut lepas ke perairan dangkal seperti pesisir pantai, estuari dan delta. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji transformasi elevasi pasang surut dari hilir ke hulu di Delta Berau meliputi komponen pasang surut utama semidiurnal dan diurnal (M2, S2, K1, dan O1), serta komponen pasang surut perairan dangkal M4 dan MS4. Metode analisis harmonik pasang surut menggunakan program T-TIDE di empat lokasi titik pengamatan (Tanjung Redeb, Batu Batu, Semanting dan Muara Tumbuk). Data elevasi pasang surut yang digunakan merupakan hasil observasi data lapangan pada waktu pengukuran dari 31 Mei – 27 September 2007. Hasil penelitian diperoleh bahwa amplitudo elevasi pasang surut mengalami peredaman dari arah hilir menuju hulu delta, komponen pasang surut semidiurnal M2 dan S2 berkurang 25%. Amplitudo komponen pasang surut diurnal O1 dan K1 berkurang 22%, sedangkan amplitudo komponen pasang surut perairan dangkal (M4 dan MS4) bertambah 370% dan 220% dari hilir ke hulu delta. Ketidaksimetrisan pasang surut diperlihatkan dengan perbedaan durasi waktu ketika menuju pasang (4-5 jam) dan menuju surut (7-8 jam) di Tanjung Redeb. Rasio amplitudo M4 dan M2 (Ar) diperoleh nilainya bertambah dari hilir ke hulu, dengan rasio maksimum bernilai 0,1 di Tanjung Redeb.

Kata kunci : Komponen Pasang Surut, Ketidaksimetrian, Amplitudo, Delta Berau

Characteristics of Tidal Transformation in The Berau Delta, East Kalimantan

Abstract

The characteristics of tidal waves will transform when they propagate from the open sea to shallow water such as coast, estuary and delta. The present study aims to examine the tidal transformation from downstream to upstream in the Berau Delta, including the main tidal components of semidiurnal and diurnal (M2, S2, K1, and O1), as well as the tidal components of shallow waters M4 and MS4 are using the T-TIDE harmonic analysis method at 4 locations (Tanjung Redeb, Batu Batu, Semanting dan Muara Tumbuk). The tidal elevations were obtained from field observations in the period from May 31 to September 27, 2007. The results showed that the tidal elevation amplitude decreased from downstream to upstream of the delta, and the M2 and S2 semidiurnal tidal components decreased by 25%. The amplitude of diurnal tidal components O1 and K1 decreased by 22%, while the amplitude of shallow water tidal components (M4 and MS4) increased by 370% and 220% from downstream to upstream of the delta. Tidal asymmetry is indicated by the difference in the duration of high tides (4-5 hours) and low tides (7-8 hours) in Tanjung Redeb, and the difference in duration of high and low tides decreases (more symmetry) from upstream to downstream of the delta. The ratio of M2 and M4 amplitude shows that the value increases from downstream to upstream, with a maximum ratio of 0.1 in Tanjung Redeb.

Keywords: Tidal Components, Asymmetry, Amplitude, Berau Delta

PENDAHULUAN

Pasang surut merupakan salah satu aspek penting dalam mempelajari karakteristik suatu

perairan pantai dan estuari. Pasang surut merupakan fenomena alam yang terjadi di seluruh belahan bumi akibat adanya gaya tarik menarik

benda-benda langit yang berlangsung secara periodik. Gelombang pasang surut mengalami transformasi ketika menjalar dari laut lepas dan memasuki perairan dangkal seperti pesisir pantai, estuari dan delta. Hal ini terjadi karena adanya interaksi antara komponen pasang surut utama dengan batimetri serta topografi yang akan membentuk komponen pasang surut perairan dangkal (Guo *et al.*, 2015; Cai *et al.*, 2018; Guo *et al.*, 2019).

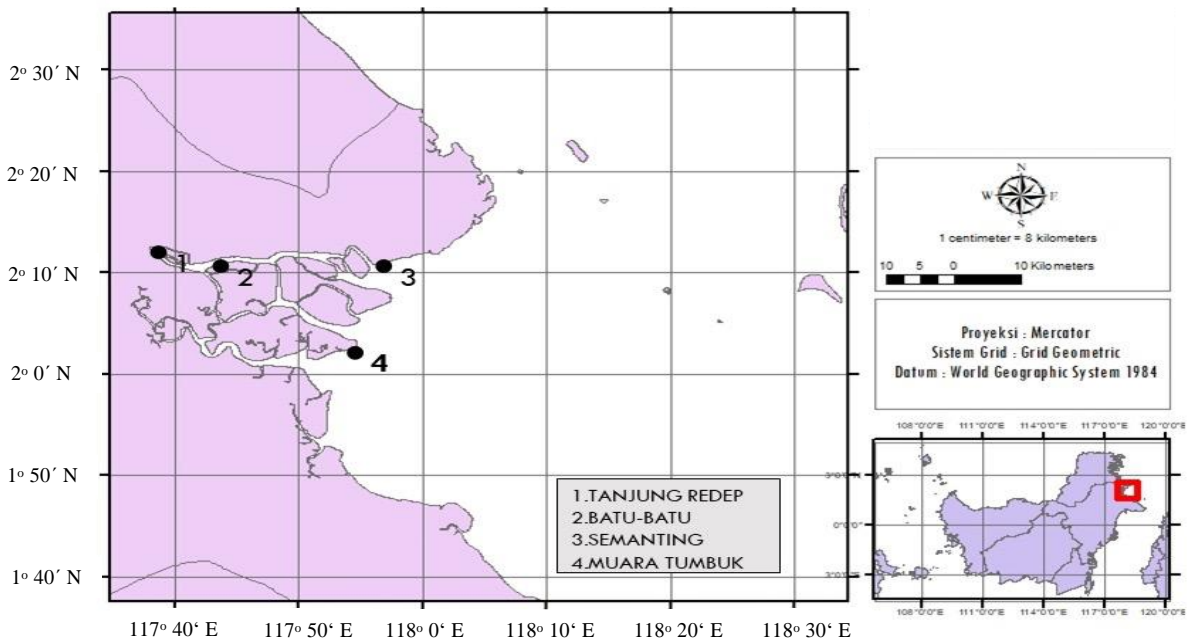
Pembangkitan komponen pasang surut perairan dangkal diakibatkan oleh proses non-linier yang terkait dengan gesekan dasar, adveksi dan konservasi massa (Guo *et al.*, 2019). Superposisi antara komponen pasang surut utama dan perairan dangkal dapat menyebabkan elevasi pasang surut terdistorsi dari bentuk sinusoidalnya, yang dapat mengakibatkan ketidaksimetrisan pasang surut. Perbedaan durasi waktu dan amplitudo antara saat pasang dan surut merupakan indikasi pasang surut asimetris (Nidzieko, 2010; Guo *et al.*, 2019).

Ketidaksimetrisan pasang surut sering menjadi faktor dominan dalam mekanisme angkutan dan pengendapan sedimen, dalam jangka waktu yang lama dapat mengakibatkan proses pendangkalan di daerah pesisir dan muara (Zhou *et al.*, 2018; McLachlan *et al.*, 2020) dan menjadi faktor utama dalam dinamika morfologi di estuari dan delta (Guo *et al.*, 2016; Gatto *et al.*, 2017). Selain itu, kajian deformasi gelombang pasang surut dan asimetri pasang surut juga dapat memperdalam pemahaman tentang dinamika pasang surut di perairan dangkal dan juga memiliki peranan dalam penyediaan informasi untuk perencanaan dan pengelolaan wilayah pesisir (Guo *et al.*, 2015). Oleh karena itu, kajian untuk memahami karakteristik transformasi dan deformasi pasang surut di estuari dan delta merupakan topik yang penting untuk dilakukan. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji transformasi pasang surut dari hilir ke hulu di Delta Berau, meliputi komponen pasang surut utama semidiurnal dan diurnal (M2, S2, K1, dan O1), serta identifikasi pembangkitan komponen pasang surut perairan dangkal M4 dan MS4. Delta Berau merupakan alur transportasi sungai yang penting untuk kapal tongkang dan tunda dalam pengangkutan dan distribusi batubara dari daerah penampungan di hulu ke muara sungai (Setyanto *et al.*, 2007). Informasi mengenai transformasi pasang surut dari hulu ke hilir merupakan hal yang penting untuk dilakukan agar dapat menunjang optimalisasi alur transportasi di Delta Berau.

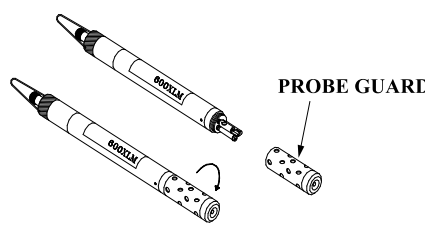
MATERI DAN METODE

Daerah kajian pada penelitian ini adalah Delta Berau, Kalimantan Timur yang secara geografis terletak diantara $117^{\circ}36'$ – $118^{\circ}0'$ BT dan 2° – $2^{\circ}16'$ LU (Gambar 1). Delta Berau terbentuk karena endapan sedimen yang berasal dari Sungai Berau (Buschman *et al.*, 2012). Sungai Berau merupakan pertemuan dari Sungai Kelay dan Sungai Sengah yang bertemu di Tanjung Redeb. Delta Berau memiliki bentuk formasi delta yang hampir sama dengan Delta Mahakam yaitu termasuk ke dalam bentuk delta yang didominasi oleh pasang surut dan debit sungai (Buschman *et al.*, 2012). Delta Berau memiliki tipe pasang surut campuran condong semidiurnal dengan tunggang pasut 1 m ketika pasang perbani dan 2,5 m ketika pasang purnama (Tarya *et al.*, 2010). Debit Sungai Berau bervariasi antara 200–2.000 m³/s, dengan nilai rata-rata 605 m³/s (Buschman *et al.*, 2010), dan berperan dalam angkutan sedimen dan penyebaran *river plume* ke muara delta dan perairan Berau dan sekitarnya (Tarya *et al.*, 2015).

Data elevasi pasang surut yang digunakan dalam penelitian ini merupakan hasil survei lapangan penelitian *East Kalimantan Programme* yang merupakan kerjasama riset antara Indonesia dan Belanda. Lokasi pengukuran elevasi pasang surut berada di empat lokasi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1, yaitu: Tanjung Redeb (Titik No 1), Batu Batu (Titik No 2), Semanting (Titik No 3), dan Muara Tumbuk (Titik No 4). Elevasi muka air diperoleh dengan menggunakan alat ukur multiparameter *Optical Monitoring Sonde* (OMS) YSI 600 (Gambar 2). Pengukuran data lapangan dilakukan pada rentang waktu dari 31 Mei – 27 September 2007. Pengukuran elevasi pasang surut dilakukan dengan interval 5 menit selama periode pengamatan 31 sampai 60 hari di 4 lokasi (Tabel 1). Data pasang surut tersebut masih relevan untuk digunakan pada studi ini karena variasi pasang surut perubahannya relatif kecil dalam periode waktu yang lama (Guo *et al.*, 2015; Cai *et al.*, 2018). Guo *et al.* (2015) menggunakan data pasang surut tahun 1998 untuk mengkaji interaksi ketidaksimetrisan pasang surut dan debit sungai di Sungai Yangtze, China. Kemudian, Cai *et al.* (2018) menggunakan data pasang surut tahun 1999 dan 2001 untuk mengetahui pengaruh interaksi ketidakinieran pasang surut dan debit sungai terhadap variasi kenaikan muka air di Sungai Pearl, China.



Gambar 1. Peta daerah kajian Delta Berau, Kalimantan Timur. Empat lokasi pengamatan elevasi pasang surut yaitu: Tanjung Redeb (1), Batu-Batu (2), Semanting (3), dan Muara Tumbuk (4).



Gambar 2. Optical Monitoring Sonde YSI 600 (YSI Incorporated, 2012)

Metode Pengolahan Data

Data tekanan yang didapatkan dari alat ukur OMS memiliki satuan psia (*pound per square ince*), dikonversi menjadi satuan Pascal (Pa) dengan menggunakan persamaan sebagai berikut (YSI Incorporated, 2012):

$$1 \text{ psia} = 6894,76 \text{ Pa} \quad (1)$$

Data tekanan yang sudah diperoleh dalam satuan Pa, selanjutnya dikonversi menjadi elevasi muka air dengan menggunakan persamaan di bawah ini :

$$h = (P * 6894,76) * 0,0001 - 10 \quad (2)$$

Data elevasi muka air yang diperoleh dari persamaan 1 dan 2 kemudian dikurangi dengan kedalaman perairan untuk mendapatkan elevasi

pasang surut di lokasi pengamatan. Data elevasi pasang surut kemudian dilakukan perata-rataan dengan interval 30 menit dan analisis harmonik komponen pasang surut dengan menggunakan Program T-TIDE (Pawlowicz *et al.*, 2002) untuk memperoleh amplitudo dan fase komponen pasang surut.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Komponen Pasang Surut

Hasil analisis harmonik komponen pasang surut dengan program T-TIDE di empat lokasi pengamatan ditunjukkan pada Tabel 2, diperoleh 35 komponen pasang surut. Komponen pasang surut utama semidiurnal M2 merupakan komponen pasang surut yang memiliki amplitudo tertinggi dengan kontribusi terhadap total amplitudo pasang

surut yaitu 35% di Tanjung Redeb, 35% di Batu-Batu, 44% di Muara Tumbuk, dan 38% di Semanting. Komponen pasang surut semidiurnal berikutnya yang cukup besar kontribusinya yaitu S2 dengan kontribusi yaitu: 13% (Tanjung Redeb), 25% (Batu-Batu), 23% (Muara Tumbuk), dan 29% (Semanting). Untuk komponen pasang surut diurnal K1 dan O1 memiliki kontribusi masing-masing sekitar 6–10% di empat lokasi pengukuran. Amplitudo komponen pasang surut perairan dangkal yang diperoleh cukup signifikan yaitu MSF, M4, dan MS4 dengan magnitudo berkisar antara 2–11 cm di empat stasiun pasang surut.

Karakteristik Pasang Surut di Delta Berau

Karakteristik perubahan amplitudo dan penjaralan gelombang pasang surut di Delta Berau dapat diketahui melalui kenaikan atau penurunan amplitudo dan perbedaan fase komponen pasang surut semidiurnal, diurnal, dan perairan dangkal. Untuk hasil analisis harmonik komponen semidiurnal ditunjukkan pada Gambar 3. Amplitudo maksimum komponen semidiurnal M2 dan S2 yaitu 89,50 cm, dan 64,15 cm berada di Batu Batu, sedangkan amplitudo minimum komponen M2 berada di Tanjung Redeb sebesar 67,14 cm dan komponen S2 adalah 30,20 cm. Fenomena bertambahnya amplitudo M2 dan S2 dari Muara Tumbuk ke Batu–Batu dan dari Semanting ke Batu Batu menunjukkan bahwa amplitudo pasang surut mengalami amplifikasi dari muara ke arah Batu Batu. Sedangkan dari Batu Batu ke Tanjung Redeb terjadi fenomena berkurangnya amplitudo M2 dan S2, yang menunjukkan bahwa amplitudo pasang surut mengalami peredaman ke arah hulu. Peredaman pasang surut ini ditunjukkan dengan amplitudo komponen M2 yang mengalami penurunan sebesar 20% dari Muara Tumbuk ke Tanjung Redeb dan sebesar 18% dari Semanting menuju Tanjung Redeb. Komponen S2 mengalami penurunan sebesar 30% dari Muara Tumbuk ke Tanjung Redeb dan 27% dari Semanting menuju Tanjung Redeb (Gambar 3a dan 3b).

Amplifikasi amplitudo pasang surut merupakan hasil dari ketidakseimbangan antara konvergensi topografi (lebar, kedalaman, dan panjang) estuari dan gaya gesekan dasar. Jika pengaruh konvergensi topografi lebih besar daripada gesekan dasar, maka pasang surut akan mengalami amplifikasi. Ketika gesekan dasar lebih besar daripada efek konvergensi, maka pasang surut akan mengalami peredaman (Guo *et al.*, 2019). Perbedaan fase komponen M2 dan S2 di Muara Tumbuk (hulu) dan Tanjung Redeb (hilir) sebesar 54,5° dan 58,8°, sehingga waktu yang dibutuhkan oleh gelombang pasang surut komponen M2 dan S2 merambat dari hilir (Muara Tumbuk) ke hulu (Tanjung Redeb) yaitu: 1,88 dan 1,96 jam (Gambar 3).

Amplitudo komponen O1 dan K1 semakin berkurang dari hilir (Muara Tumbuk dan Semanting) ke hulu (Tanjung Redeb) (Gambar 4). Nilai amplitudo maksimum O1 dan K1 yaitu: 13,83 cm dan 20,66 cm berada di hulu (Semanting dan Muara Tumbuk), sedangkan nilai amplitudo minimum berada di hulu (Tanjung Redeb) sekitar 11,07 cm (O1) dan 15,51 cm (K1). Amplitudo komponen K1 yang mengalami penurunan sebesar 19% dari Muara Tumbuk ke Tanjung Redeb dan sebesar 20% dari Semanting menuju Tanjung Redeb (Gambar 4a). Untuk komponen O1 mengalami penurunan sebesar 25% dari Muara Tumbuk ke Tanjung Redeb dan sebesar 24% dari Semanting menuju Tanjung Redeb (Gambar 4b).

Amplitudo pasang surut semidiurnal dan diurnal mengalami peredaman dari hilir ke arah hulu delta, peredaman amplitudo ini disebabkan oleh kedalaman Delta Berau semakin dangkal ke arah hulu, sehingga pengaruh gesekan dasar mengalami kenaikan (semakin signifikan) ke arah hulu. Hal ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Talke dan Jay (2020). Jika nilai elevasi muka air lebih besar dari sepersepuluh kedalaman total perairan ($\zeta > H/10$), maka gesekan dasarnya akan menjadi faktor dominan yang mempengaruhi dinamika pasang surut (amplitudo dan keterlambatan fase). Teori tersebut sesuai

Tabel 1. Lokasi, periode dan lama pengamatan elevasi pasang surut

Titik pengamatan	Koordinat	Periode Pengamatan	Lama Pengamatan (Hari)
Tanjung Redeb	2,201° LU dan 117,644° BT	31 Mei – 31 Juli 2007	60
Batu-Batu	2,183° LU dan 117,710° BT	1 Agustus – 3 September 2007	35
Semanting	2,179° LU dan 117,941° BT	3 Agustus – 27 September 2007	54
Muara Tumbuk	2,067° LU dan 117,897° BT	30 Juni – 31 Juli 2007	31

Tabel 2. Hasil analisis harmonik komponen pasang surut di empat lokasi pengamatan meliputi Tanjung Redeb, Batu-Batu, Muara Tumbuh dan Semanting

Komponen	Tanjung Redeb		Batu Batu		Muara Tumbuh		Semanting	
	Amp (cm)	Fase (°)	Amp (cm)	Fase (°)	Amp (cm)	Fase (°)	Amp (cm)	Fase (°)
MM	1,225	237,86	1,444	347,48	1,125	102,46	1,341	74,24
MSF	11,393	57,91	7,302	66,57	2,629	214,95	2,428	50,12
ALP1	0,283	359,97	0,362	313,46	0,405	211,34	0,356	251,23
2Q1	1,403	195,24	0,879	52,27	1,035	85,78	0,322	231,88
Q1	2,032	273,77	3,138	237,39	2,351	221,28	2,790	232,07
O1	11,069	284,92	12,287	250,23	13,830	238,74	13,691	238,05
NO1	0,954	325,58	0,826	274,99	1,029	251,14	1,192	275,79
K1	15,513	309,86	16,382	283,68	20,661	272,72	20,491	272,84
J1	1,101	339,57	1,458	346,18	2,184	272,58	1,368	315,42
OO1	0,757	325,05	1,201	2,53	0,343	306,37	0,701	352,42
UPS1	0,083	204,49	0,370	35,40	0,188	64,70	0,189	353,01
EPS2	0,921	250,86	1,949	243,01	0,953	110,13	0,862	212,16
MU2	8,150	305,23	7,368	248,42	2,610	221,20	2,462	205,45
N2	9,340	202,88	12,185	183,31	11,757	144,85	12,916	165,98
M2	67,140	222,21	89,495	190,01	83,959	167,76	82,068	168,93
L2	1,542	199,31	2,497	2,02	1,122	267,20	1,456	333,82
S2	30,198	298,41	64,148	254,66	42,856	239,57	41,790	240,72
ETA2	1,477	324,23	1,834	5,55	2,539	283,94	1,122	0,07
MO3	2,177	29,78	1,457	304,84	1,0183	260,06	1,001	298,20
M3	0,786	73,78	0,653	355,36	1,073	336,96	0,759	341,75
MK3	2,887	78,52	1,783	33,71	0,5044	57,50	0,557	28,42
SK3	0,960	89,93	1,069	51,66	0,7407	338,50	0,642	48,15
MN4	1,261	18,32	0,202	239,67	0,2448	81,86	0,148	198,81
M4	7,140	273,83	3,692	246,08	1,5093	170,74	1,699	203,19
SN4	1,053	46,88	1,136	351,77	0,543	250,35	0,484	289,23
MS4	6,841	74,55	6,251	329,53	2,179	236,62	2,130	264,31
S4	1,007	151,11	2,202	48,94	0,8619	333,34	1,479	337,79
2MK5	1,992	149,61	0,217	183,67	0,1562	76,40	0,189	159,50
2SK5	0,457	240,78	0,046	135,44	0,1315	342,58	0,261	244,95
2MN6	0,919	337,47	0,370	338,25	0,1487	76,42	0,381	57,04
M6	1,809	36,36	1,436	309,88	0,1081	129,11	0,223	99,31
2MS6	2,576	102,07	2,934	20,88	0,3399	115,02	1,131	78,52
2SM6	0,916	197,70	1,999	95,57	0,3086	145,32	1,183	139,22
3MK7	0,556	272,08	0,205	155,04	0,2594	5,85	0,253	63,05
M8	0,352	168,30	0,501	352,54	0,2127	91,04	0,268	218,01

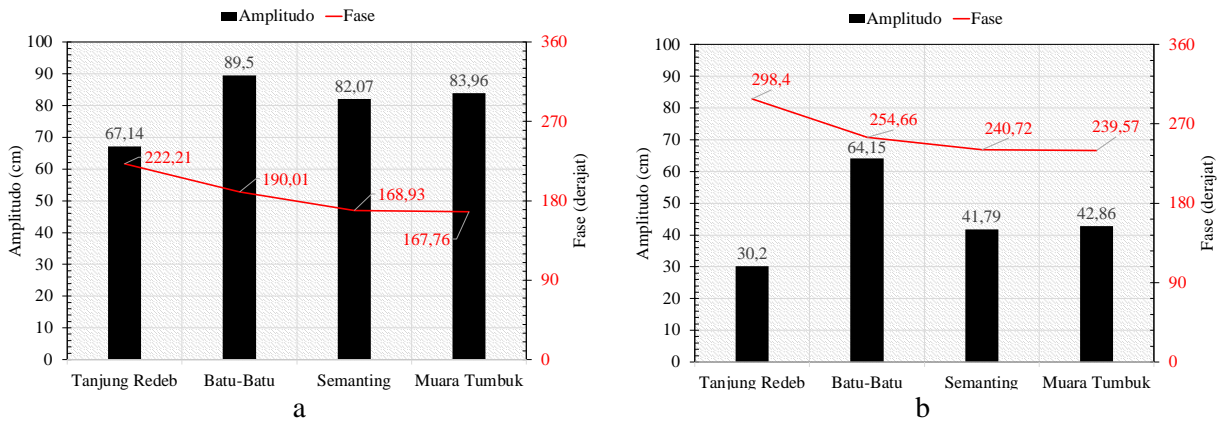
dengan kondisi yang terjadi di Delta Berau, rasio nilai elevasi muka air lebih besar dari sepersepuluh kedalaman total perairan di Tanjung Redeb ($\zeta > H/10 = 0,48 \text{ m} > 0,35 \text{ m}$), sehingga efek gesekan dasar berperan dalam meredam amplitudo pasang surut. Perbedaan fase komponen O1 dan K1 di Muara Tumbuh (hilir) dan Tanjung Redeb (hulu) memiliki perbedaan $46,87^\circ$ dan $39,14^\circ$. Sehingga waktu yang dibutuhkan oleh gelombang pasang

surut komponen O1 dan K1 untuk merambat dari hilir (Muara Tumbuh) ke hulu (Tanjung Redeb) adalah 3,36 dan 2,6 jam (Gambar 4).

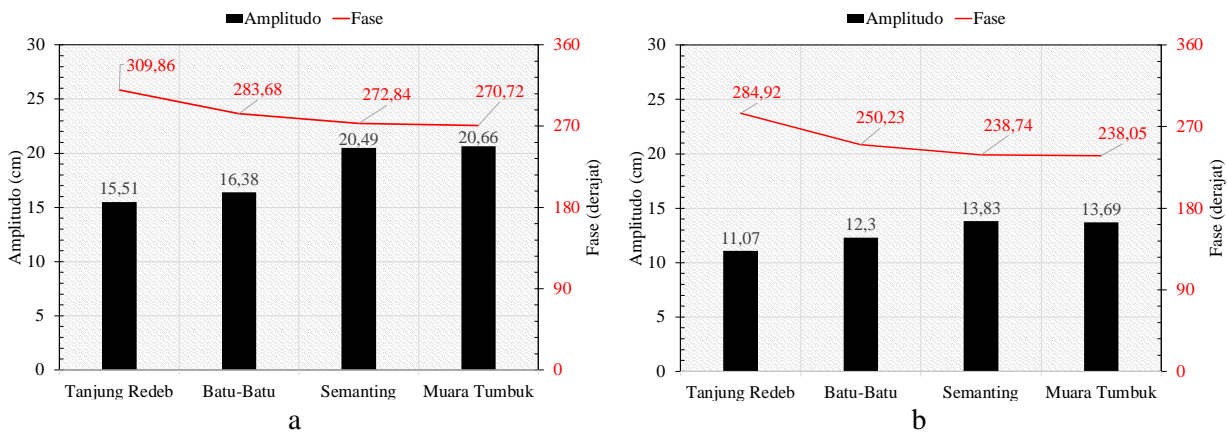
Dari Gambar 5 diperoleh bahwa amplitudo maksimum komponen M4 sebesar 7,14 cm dan komponen MS4 sebesar 6,84 cm berada di Tanjung Redeb. Amplitudo minimum berada di hilir (Muara Tumbuh) yaitu 1,51 cm untuk komponen M4 dan komponen MS4 yaitu 2,13 cm di Semanting.

Amplitudo komponen M4 mengalami kenaikan sebesar 5,63 cm (370%) dari Muara Tumbuh ke Tanjung Redeb (Gambar 5a), sedangkan

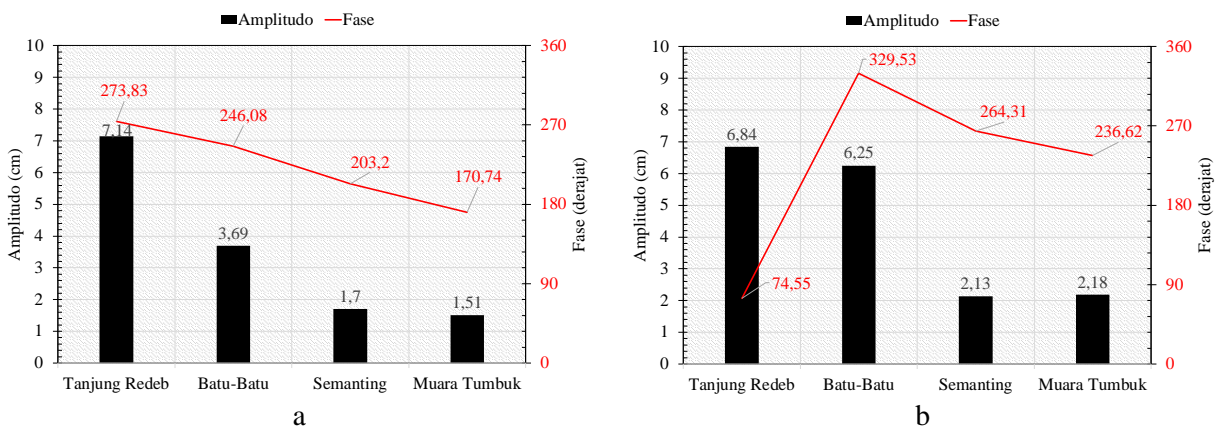
komponen MS4 mengalami kenaikan sebesar 4,71 cm (220%) dari Semanting ke Tanjung Redeb (Gambar 5b).



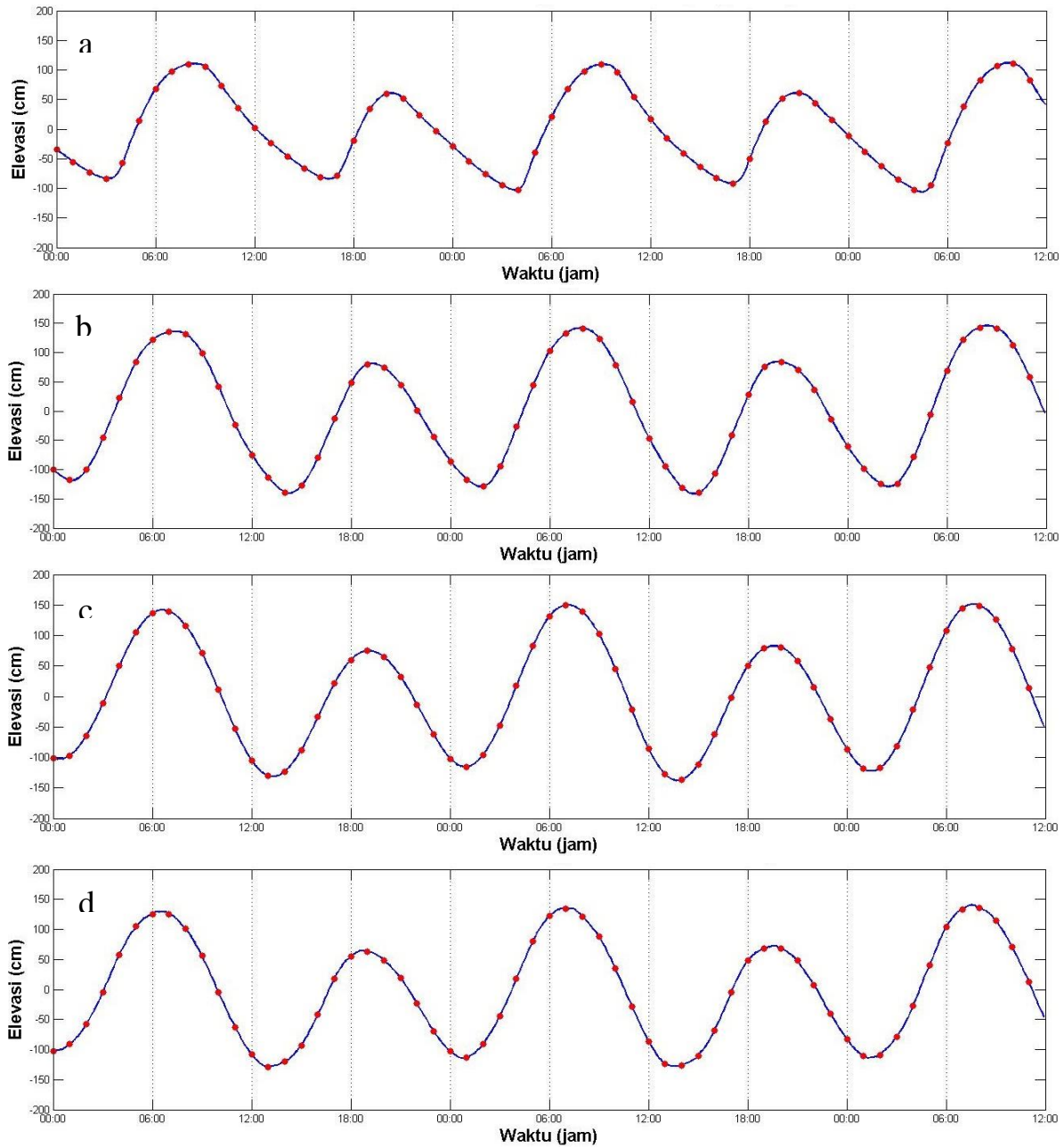
Gambar 3. Amplitudo dan fase komponen pasang surut semidiurnal M2 (a) dan S2 (b) di empat stasiun pengamatan pasang surut dari hulu ke hilir.



Gambar 4. Amplitudo dan fase komponen pasang surut semidiurnal K₁ (a) dan O₁ (b) di empat stasiun pengamatan pasang surut dari hulu ke hilir.



Gambar 5. Amplitudo dan fase komponen pasang surut perairan dangkal M4 (a) dan MS4 (b) di empat stasiun pengamatan pasang surut dari hulu ke hilir.



Gambar 6. Elevasi pasang surut di empat lokasi pengukuran dari hulu ke hilir: Tanjung Redeb (a), Batu Batu (b), Semanting (c), dan Muara Tumbuk (d).

Ketidaksimetrisan Pasang Surut di Delta Berau

Berdasarkan data pengukuran elevasi pasang surut di empat lokasi (Gambar 6), terlihat bahwa variasi elevasi pasang surut menunjukkan ketidaksimetrisan pasang surut saat menuju pasang tertinggi dan menuju surut terendah di Tanjung Redeb (Gambar 6a). Durasi waktu yang dibutuhkan dari kondisi surut terendah menuju pasang tertinggi (4 s.d. 5 jam). Durasi kondisi tersebut jauh lebih cepat dibandingkan dengan

durasi waktu yang dibutuhkan dari kondisi pasang tertinggi menuju surut terendah (7 s.d. 8 jam). Pada lokasi pengamatan di Batu–Batu (Gambar 6b), terlihat ketidaksimetrisan pasang surut saat menuju pasang tertinggi dan menuju surut terendah. Durasi waktu yang dibutuhkan dari kondisi surut terendah menuju pasang tertinggi (5 s.d. 6 jam) lebih pendek durasinya dibandingkan dengan durasi waktu yang dibutuhkan dari kondisi pasang tertinggi menuju surut terendah (6 s.d. 7 jam). Sedangkan di lokasi

pengamatan Semanting dan Muara Tumbuh (Gambar 6c dan 6d) yang merupakan daerah hilir delta. Durasi waktu yang dibutuhkan dari kondisi surut terendah menuju pasang tertinggi dan durasi waktu yang dibutuhkan dari kondisi pasang tertinggi menuju surut terendah relatif hampir sama yaitu sekitar 6,5 jam.

Perbedaan durasi waktu dari pasang tertinggi menuju surut terendah dan dari surut terendah menuju pasang tertinggi dari hulu ke hilir semakin berkurang. Hal ini menunjukkan bahwa semakin ke arah hilir pasang surut semakin simetris, sedangkan semakin ke arah hulu semakin asimetris. Ketidaksimetrisan pasang surut ini merupakan suatu fenomena yang sering terjadi di estuari dan delta. Hal ini disebabkan karena pada saat pasang terjadi pertemuan massa air yang bergerak dari laut dan debit air sungai yang bergerak menuju ke arah hilir sungai. Penumpukan massa air di estuari dan mengakibatkan muka air laut akan semakin cepat mengalami kenaikan saat waktu menuju pasang. Sedangkan pada saat surut, massa air meninggalkan estuari menuju laut, akan tetapi massa air dari arah hulu tetap bergerak ke arah estuari, sehingga waktu yang dibutuhkan relatif lebih lama ketika menuju surut.

Karakteristik ketidaksimetrisan berdasarkan durasi waktu saat pasang dan surut dapat diidentifikasi berdasarkan perhitungan perbedaan fase antara komponen pasang surut utama M2 dan komponen perairan dangkal M4 yang didefinisikan sebagai $\phi = 2\theta_{M_2} - \theta_{M_4}$ (Nidzieko, 2010; Guo *et al.*, 2019). Ketidaksimetrisan pasang surut dikategorikan sebagai *flood dominant* (durasi pasang lebih pendek daripada durasi surut) jika $0 < \phi < 180$ derajat dan *ebb dominant* (durasi pasang lebih panjang daripada durasi surut) jika $180 < \phi < 360$ derajat. Di lokasi Tanjung Redeb dan Batu-Batu didapatkan nilai ϕ yaitu $164,78^\circ$ dan $133,94^\circ$. Dari nilai ϕ di dua lokasi tersebut ketidaksimetrisan pasang surut diklasifikasikan sebagai *flood dominant*. Hal ini konsisten dengan grafik pasang surut di Tanjung Redeb dan Muara Tumbuh (Gambar 6a dan 6b) yang menunjukkan durasi waktu menuju pasang lebih pendek daripada durasi menuju surut.

Efek gesekan dasar terhadap ketidaksimetrisan pasang surut dapat diketahui dengan menggunakan perhitungan nilai rasio perbandingan antara amplitudo komponen pasang surut perairan dangkal M4 dan komponen pasang surut semidiurnal M2 ($Ar = M4/M2$) (Guo *et al.*,

2019). Jika rasio perbandingan amplitudo M4 terhadap M2 bernilai nol, maka pasang surut tidak mengalami distorsi (Nidzieko, 2010; Guo *et al.*, 2019). Jika nilai Ar (lebih besar dari 0) dan semakin bertambah maka gesekan akan berpengaruh terhadap ketidaksimetrisan pasang surut. Dari hasil perhitungan Ar , menunjukkan bahwa perbandingan amplitudo M4 terhadap M2 dari muara menuju hulu semakin bertambah (Semanting = 0,002, Batu-Batu = 0,05 dan Tanjung Redeb = 0,1). Bertambahnya nilai Ar ini menunjukkan bahwa dari muara ke hulu efek gesekan dasar semakin kuat dan ke arah hilir efek gesekan semakin lemah. Hal ini konsisten dengan transformasi pasang surut di Delta Berau, dimana distorsi pasang surut terjadi di hulu delta.

KESIMPULAN

Komponen pasang surut utama mengalami penurunan nilai amplitudo dari hilir ke hulu. Peredaman amplitudo komponen semidiurnal M2 dan S2 sekitar 25% dan komponen diurnal K1 dan O1 sekitar 22%. Peredaman amplitudo pasang surut tersebut disebabkan oleh adanya efek gesekan dasar yang meningkat ke arah hulu. Sedangkan, komponen pasang surut perairan dangkal mengalami kenaikan nilai amplitudo dari hilir ke hulu untuk M4 sebesar empat kali lipat dan MS4 sebesar dua kali lipat. Perambatan gelombang pasang surut dari hilir ke hulu delta yang memiliki jarak sekitar 55 km, dibutuhkan waktu masing-masing sekitar 1,88 dan 1,96 jam untuk komponen semidiurnal M2 dan S2. Perambatan gelombang pasang surut untuk komponen diurnal O1 dan K1 yaitu 3,36 dan 2,60 jam. Kurva elevasi pasang surut dari hulu ke hilir delta semakin simetris, sedangkan semakin ke arah hulu delta semakin asimetris. Ketidaksimetrisan elevasi pasang surut terlihat jelas di daerah hulu (Tanjung Redeb). Hal ini ditunjukkan dengan perbedaan durasi waktu kondisi menuju pasang yaitu 4 sampai 5 jam, sedangkan kondisi menuju surut lebih lama yaitu 7 sampai 8 jam. Ketidaksimetrisan di hulu delta dikategorikan sebagai *flood dominant*. Rasio amplitudo komponen perairan dangkal M4 terhadap komponen semidiurnal M2 bertambah besar ke arah hulu delta, dengan rasio tertinggi terjadi di Tanjung Redeb sebesar 0,1. Kenaikan rasio ini menyebabkan efek gesekan dasar berperan besar dalam peredaman amplitudo pasang surut ke arah hulu.

DAFTAR PUSTAKA

- Buschman, F.A., Hoitink, A.J.F., van der Vegt, M. & Hoekstra, P. 2010. Subtidal flow division at a shallow tidal junction, *Water Resources Research*, 45. (W12515).
- Buschman, F.A., Hoitink, A.J.F., De Jong, S.M., Hoekstra, P., Hidayat, H. & Sassi, M.G. 2012. Suspended sediment load in the tidal zone of an Indonesian river. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(11):4191-4204.
- Gatto, V.M., van Prooijen, B.C. & Wang, Z.B. 2017. Net sediment transport in tidal basins: Quantifying the tidal barotropic mechanisms in a unified framework. *Ocean Dynamics*, 67:1385–1406.
- Guo, L.C., van der Wegen, M., Jay, D.A., Matte, P., Wang, Z.B., Roelvink, J. A. & He, Q. 2015. River-tide dynamics: Exploration of nonstationary and nonlinear tidal behavior in the Yangtze River estuary. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 120:3499–3521.
- Guo, L.C., van der Wegen, M., Wang, Z.B., Roelvink, J.A. & He, Q. 2016. Exploring the impacts of multiple tidal constituents and varying river flow on long-term, large scale estuarine morphodynamics by means of a 1D model. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 121:1000–1022.
- Guo, L., Wang, Z.B., Townend, I. & He, Q. 2019. Quantification of tidal asymmetry and its nonstationary variations. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 124(1):773-787.
- McLachlan, R.L., Ogston, A.S., Asp, N.E., Fricke, A.T., Nittrouer, C.A. & Gomes, V.J.C. 2020. Impacts of tidal-channel connectivity on transport asymmetry and sediment exchange with mangrove forests. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 233:106524.
- Nidzioko, N.J. 2010. Tidal asymmetry in estuaries with mixed semidiurnal/diurnal tides, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 115:C08006.
- Pawlowicz, R., Beardsley, B. & Lentz, S. 2002. Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T TIDE, *Computer Geosciences*, 28:929–937.
- Setyanto, A., Aryawan, A. & Purwanto, C. 2007. Karakteristik Sungai Berau Sebagai Alur Transportasi Batubara Di Kalimantan Timur. *Buletin Sumber Daya Geologi*, 2(1):12-16.
- Talke, S.A., & Jay, D.A. 2020. Changing tides: The role of natural and anthropogenic factors. *Annual review of marine science*, 12:121-151.
- Tarya, A., Hoitink, A.J.F. & Van der Vegt, M. 2010. Tidal and subtidal flow patterns on a tropical continental shelf semi-insulated by coral reefs, *Journal of Geophysical Research : Oceans*, 115:p.C09029.
- Tarya, A., Van der Vegt, M. & Hoitink, A.J.F. 2015. Wind forcing controls on river plume spreading on a tropical continental shelf, *Journal of Geophysical Research*, 120(1):16–35.
- YSI Incorporated. 2012. 6-Serie Multiparameter Water Quality Sondes User Manual. Diakses pada 10 Mei 2022,
- Zhou, Z., Coco, G., Townend, I., Gong, Z., Wang, Z.B. & Zhang, C.K. 2018. On the stability relationships between tidal asymmetry and morphologies of tidal basins and estuaries. *Earth Surface Processes and Landforms*, 43: 1943–1959.