

Pengaruh Pasang Surut Terhadap Profil Kecepatan Arus Melintang Di Sungai Berau, Kalimantan Timur

Ayi Tarya*, Harish H. Maulamulki, 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

Profil kecepatan arus melintang pada aliran sungai merupakan parameter penting yang diperoleh dalam pengukuran debit sungai dengan instrumen *Horizontal Acoustic Doppler Current Profiler* (H-ADCP). Dinamika sirkulasi arus di aliran sungai dibangkitkan oleh interaksi antara debit sungai, topografi dan pasang surut. Sungai Berau di Kalimantan Timur merupakan salah satu aliran sungai yang dominan dipengaruhi oleh pasang surut. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh pasang surut terhadap variasi profil kecepatan arus melintang sungai dan identifikasi tingkat kecocokan antara profil data kecepatan arus dengan persamaan parabolik. Metode penelitian yang digunakan yaitu dekomposisi kecepatan arus dengan *band pass filter* (BPF) dan *low pass filter* (LPF), dan pencocokan kurva (*curve fitting*) profil kecepatan arus sungai hasil pengukuran H-ADCP dengan persamaan parabolik. Hasil studi menunjukkan pasang surut berperan dalam menentukan arah kecepatan arus, dimana arus bergerak ke arah hulu saat kondisi pasang dan bergerak menuju ke hilir saat kondisi surut, dengan magnitudo kecepatan arus saat purnama mencapai 1,2 m/s dan saat perbani sekitar 0,5 m/s. Pasang surut mempunyai pengaruh yang signifikan terhadap kontribusi kecepatan arus, berdasarkan hasil BPF diperoleh 85% dari kecepatan arus total adalah arus yang dibangkitkan oleh pasang surut, sedangkan arus non-pasang surut berkontribusi hanya 15%. Hasil pencocokan kurva antara profil kecepatan arus dan persamaan parabolik diperoleh bahwa kondisi pasang surut purnama merupakan periode yang paling optimal, hal ini ditunjukkan dengan tingkat kecocokan mencapai 94%, nilai korelasi rata-rata (\bar{R}) adalah 0,95 dan panjang rata-rata profil kecepatan arus yang dapat didekati persamaan parabolik mencapai 125 m.

Kata kunci : Kecepatan, Pasang Surut, Persamaan Parabolik

Abstract

The Effect Of Tide On Velocity Profile In Cross-Section At Berau River, East Kalimantan

The cross-sectional velocity profile in river flow is an important parameter which obtained in measuring river discharge with the Horizontal Acoustic Doppler Current Profiler (H-ADCP) instrument. Circulation dynamic of river flow is generated by the interaction between river discharge, topography and tides. The Berau River in East Kalimantan is one of the river which has dominant influenced by tides. This study aims to determine the effect of tides on variations in the river cross-sectional velocity profile and to identify the degree of agreement between the flow velocity data profile and the parabolic equation. The research method is used the band pass filter (BPF) and low pass filter (LPF) for velocity data decomposition, and curve fitting of the velocity profile as measured by H-ADCP with parabolic equation. Parameter of the quality of curve fitting parabolic equation is determined by the degree of agreement, correlation coefficient (R), and the length of the velocity profile that can be approximated by the parabolic equation. The results of the study show the tides have a significant influence on the flow velocity in the Berau River. Tides play a role in determining the direction of flow velocity, the current moves upstream during high tide and flow moves downstream during low tide, with the magnitude of the velocity at spring tide reaching 1.2 m/s and around 0.5 m/s at neap tide. Tides have a significant influence on the contribution of current velocity, based on BPF result is obtained that 85% of the total current velocity is generated by tides, while non-tidal current contributes only 15%. The results of the curve fitting between the velocity profile and the parabolic equation show the spring tide

condition as the most optimal period, this is indicated by the agreement level reaching 94%, the mean correlation is 0.95 and the average length of the velocity profile which can be approached with the parabolic equation is 125 m.

Keywords: *Velocity, Tide, Parabolic Equation*

PENDAHULUAN

Delta dan estuari merupakan sistem yang kompleks. Interaksi antara pasang surut, debit sungai dan morfologi akan menghasilkan sirkulasi arus yang bervariasi secara longitudinal dan transversal, dan juga bervariasi terhadap waktu. Dinamika dan variasi kecepatan arus pasang surut dan arus debit sungai mempunyai peranan penting dalam angkutan sedimen, pola sebaran kualitas air, dan sirkulasi di estuari (Kukulka dan Jay 2003; Zhang *et al.*, 2011; Guo *et al.*, 2014; Pittaluga *et al.*, 2015; Leonardi *et al.*, 2015).

Horizontal Acoustic Doppler Current Profiler (H-ADCP) merupakan instrumen untuk mengukur kecepatan arus dan debit sungai secara kontinu (Nihei dan Kimizu, 2008; Hoitink *et al.*, 2009; Sassi *et al.*, 2011; Hidayat *et al.*, 2011). H-ADCP ditempatkan di dinding sungai untuk mengukur kecepatan arus secara melintang agar diperoleh kualitas data yang optimal. Penentuan debit sungai memerlukan proses ekstrapolasi profil kecepatan melintang sungai dan integrasi dengan luas penampang sungai. Metode ekstrapolasi dan pencocokan kurva (*curve fitting*) profil kecepatan arus yang sering digunakan pada studi sebelumnya yaitu logaritma standar (Lueck dan Lu, 1996; Lu *et al.*, 2000) dan *log-linear law* (Gross *et al.*, 1992; Wang *et al.*, 2001). Sedangkan, pada studi ini menggunakan metode parabolik untuk proses pencocokan kurva profil kecepatan arus.

Sungai Berau di Kalimantan Timur merupakan salah satu aliran sungai yang dominan dipengaruhi oleh pasang surut (Buschman *et al.*, 2009). Topik penelitian Buschman *et al.* (2009) difokuskan pada dinamika elevasi muka air yang disebabkan oleh pasang surut dan debit sungai. Pada studi berikutnya, Buschman *et al.* (2010; 2013) mengkaji pengaruh tunggang pasang surut terhadap distribusi debit sungai dan transpor sedimen di percabangan sungai di Delta Berau. Sedangkan, pada penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh pasang surut terhadap karakteristik kecepatan arus melintang di Sungai Berau. Sungai Berau merupakan jalur transportasi penting untuk distribusi batubara melalui kapal pengangkut dari tempat penimbunan ke muara

sungai (Setyanto *et al.*, 2007). Sehingga, pengetahuan dan informasi mengenai pengaruh pasang surut terhadap kecepatan arus pasang surut dapat digunakan dan dimanfaatkan untuk menunjang alur transportasi di Sungai Berau.

Selain itu, penelitian ini juga melakukan pencocokan kurva persamaan parabolik dengan data observasi profil kecepatan arus untuk menentukan tingkat kesesuaian dan panjang profil kecepatan arus yang dapat didekati dengan metode parabolik. Pendekatan parabolik merupakan metode yang optimal untuk profil kecepatan arus melintang di sungai (Kundu dan Goshal, 2012).

MATERI DAN METODE

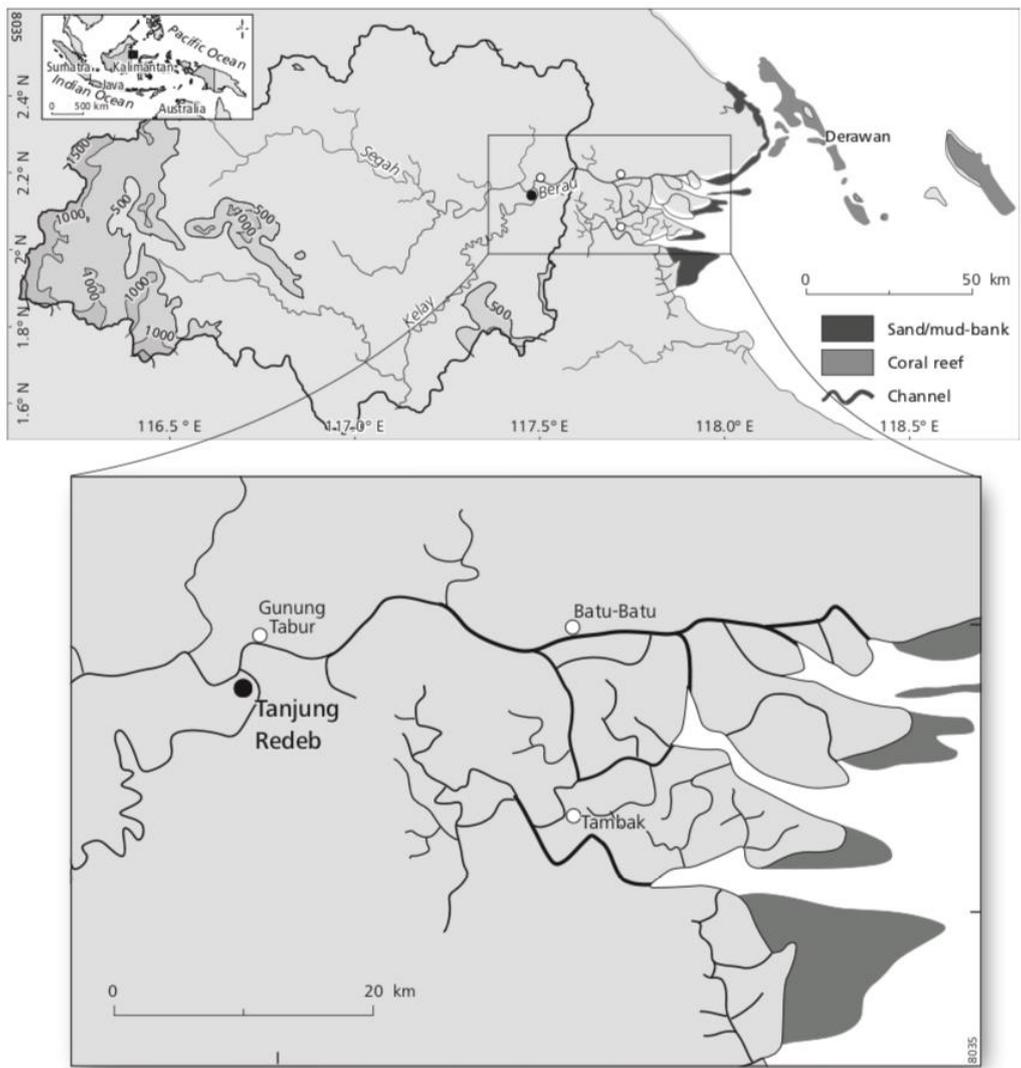
Penelitian ini dilakukan di Sungai Berau, Kalimantan Timur. Sungai Berau merupakan gabungan dari Sungai Kelay dan Sungai Segah, kedua sungai ini bergabung di daerah Tanjung Redeb. Sungai Berau memiliki panjang sekitar 60 km membentang dari Tanjung Redeb sampai ke arah hilir dan angkutan sedimen yang terdeposisi di muara membentuk Delta Berau. Daerah hulu Sungai Berau memiliki lebar kurang lebih 400 m dengan kedalaman rata-rata sebesar 7 m, sedangkan di bagian hilir lebar sungai mencapai 1 km dengan kedalaman 9 m. Debit Sungai Berau bervariasi antara 200–2000 m³/det, dengan rata-rata debit 605 m³/det (Buschman *et al.*, 2010). Lokasi daerah kajian dapat dilihat pada Gambar 1, titik lokasi pengukuran H-ADCP berada di Gunung Tabur yang berada sekitar 5 km dari Tanjung Redeb. Pengukuran kecepatan arus dilakukan dari tanggal 16 Oktober sampai 29 November 2006. Hasil pengukuran data 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 debit sungai dan pasang surut di Sungai Yangtze, China. Kemudian, Cai *et al.* (2018) menggunakan data tahun 1999 dan 2001 untuk mengetahui pengaruh interaksi pasang surut dan debit sungai terhadap variasi kenaikan muka air di Sungai Pearl, China.

Instrumen Alat Ukur

Instrumen yang digunakan untuk mengukur kecepatan arus adalah RD Instrument H-ADCP 600 kHz, terdiri dari tiga *beam* dan satu sensor tekanan. H-ADCP dipasang di sebuah dermaga pada kedalaman 1,55 m dari tinggi muka air terendah, sehingga instrumen selalu berada di dalam kolom air sepanjang pengukuran. Spesifikasi dan konfigurasi H-ADCP yang digunakan selama pengukuran dapat dilihat pada Tabel 1.

H-ADCP memiliki tiga *beam* mengarah pada arah yang berbeda dengan kemiringan sudut

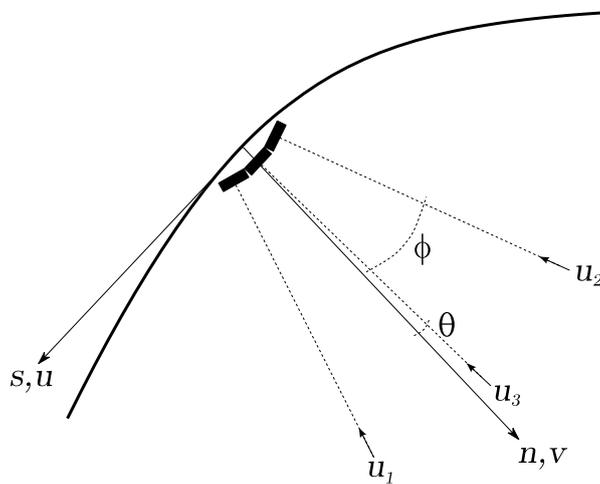
masing-masing sebesar 25°, sketsa pengukuran H-ADCP tampak atas seperti ditunjukkan pada Gambar 2 dan Gambar 3 merupakan tampak samping dari pengukuran menggunakan H-ADCP di titik lokasi penelitian. Profil batimetri sungai dalam arah melintang (*cross-section*) atau menyeberangi sungai yang ditunjukkan merupakan kedalaman sungai yang dilakukan oleh Buschman *et al.* (2009). *H* adalah kedalaman sungai, *d* adalah kedalaman H-ADCP, dan η adalah tinggi elevasi muka air. Segitiga berwarna hitam menunjukkan area jangkauan yang dapat diukur oleh H-ADCP, yaitu sejauh 150 m dari pinggir sungai.



Gambar 1. Daerah kajian penelitian di Sungai Berau, Kalimantan Timur. Gunung Tabur merupakan lokasi pengukuran kecepatan arus dengan menggunakan H-ADCP (Adaptasi dari : Buschman *et al.*, 2009).

Tabel 1. Spesifikasi H-ADCP dan konfigurasi pengukuran kecepatan arus

Spesifikasi Instrumen	
Merek	Teledyne RD Instruments
Nomor Seri	3B 00 00 03 C2 E 3 DC 09
Tipe	Horizontal-Acoustic Doppler Current Profiler
Frekuensi	600 KHz
Jumlah <i>Beam</i>	3
Sudut <i>Beam</i>	25°
Konfigurasi Pengukuran Data	
Jumlah bin	150 bin
Lebar tiap bin	1 meter
Interval Pengukuran	1 menit
Lama Pengukuran	43 hari



Gambar 2. Sketsa tampak atas pengukuran H-ADCP, di mana *u* adalah kecepatan arus saat pasang (ke arah hulu) dan juga sebagai dengan sumbu *s*; *v* adalah kecepatan arus menuju pinggir sungai (melintang) dan juga sebagai sumbu *n*; ϕ adalah sudut antara *beam* H-ADCP; θ adalah perbedaan sudut antara sumbu *n* dan *beam* H-ADCP, dan u_1 , u_2 , dan u_3 adalah kecepatan radial dari tiga *beam* yang terukur selama pengamatan (Sumber : Sassi *et al.*, 2011).

Pengolahan Data

H-ADCP mengukur dan merekam informasi antara lain, waktu pengukuran, *heading*, *pitch*, *roll*, jumlah bin, lebar bin, tekanan, u_1 , u_2 , dan u_3 . Pengukuran H-ADCP dilakukan dengan langkah waktu satu menit yang kemudian dirata-ratakan per jam. *Heading*, *pitch*, dan *roll* menunjukkan nilai kemiringan sudut yang diakibatkan oleh gaya gravitasi dan arus yang menyebabkan ADCP bergoyang. Posisi H-ADCP ini perlu dikoreksi agar nilai hasil pengukuran valid dan representatif. Jumlah dan lebar bin diperlukan untuk mengetahui hasil pengukuran kecepatan arus dari H-ADCP di masing-masing bin yang dilihat secara horizontal

(melintang) sungai. Nilai tekanan terukur dikonversi menjadi nilai tinggi elevasi muka air. Sementara itu, besarnya kecepatan arus dalam arah *u* dan *v* didapatkan dari u_1 , u_2 , dan u_3 yang dihitung menggunakan Persamaan 1 dan Persamaan 2 (Sassi *et al.*, 2011).

$$u = 1,18310(u_2 - u_1) \tag{1}$$

$$v = -0,34294(u_1 + u_2) - 0,37839(u_3) \tag{2}$$

Hasil pengolahan ini digunakan untuk melihat seberapa besar pengaruh pasang surut terhadap profil kecepatan arus. Plot kecepatan arus

dilakukan untuk mengetahui kondisi pasang, surut, dan *slack water*. Pada tahap ini data kecepatan yang digunakan yaitu kecepatan u dari seluruh bin. Hasil pengolahan kemudian dianalisis dengan membandingkan kondisi ketika pasang surut purnama dan perbani. Profil kecepatan arus dilihat dan dibandingkan kondisinya pada saat menuju pasang, pasang, menuju surut dan surut. Setelah itu proses pencocokan kurva dengan menggunakan metode *least square* dilakukan terhadap profil kecepatan tersebut. Dari hasil pencocokan kurva didapatkan nilai kecocokan antara persamaan parabolik dengan kondisi profil kecepatan arus yang terjadi pada kondisi pasang dan surut. Persamaan parabolik yang digunakan seperti pada Persamaan 3 (Vedula dan Achanta, 1985; Kundu dan Ghoshal, 2012).

$$u(n) = u_{max} - 6,3 \left(1 - \frac{n}{n_{max}}\right)^2 u^* \quad (3)$$

Simbol $u(n)$ adalah kecepatan arus horizontal sebagai fungsi jarak bin dari H-ADCP yang dipasang di dinding sungai (n), (u^*) adalah kecepatan geser, (u_{max}) adalah kecepatan arus maksimum, dan (n_{max}) adalah jarak dari H-ADCP yang dipasang di dinding sungai yang kecepatan arusnya bernilai maksimum.

Regresi Kuadrat Terkecil (Least Square Method)

Regresi linier atau metode kuadrat terkecil adalah salah satu metode untuk menentukan garis lurus terbaik dari sebaran data yang memiliki kecenderungan mendekati garis lurus atau persamaan linier. Secara umum bentuk dari persamaan linier tersebut ditunjukkan pada Persamaan 4 dengan x dan y merupakan variabel bebas dan tak bebas, sedangkan a merupakan parameter.

$$y = ax \quad (4)$$

Kemudian, Persamaan 3 dimodifikasi agar proses regresi dapat dilakukan secara mudah, yakni menggunakan metode regresi linier. Proses modifikasi dilakukan seperti pada Persamaan 5, yaitu $u(n) - u_{max}$ menjadi variabel (y) (Persamaan 6) dan $-\left(1 - \frac{n}{n_{max}}\right)^2$ menjadi variabel (x) yang merupakan jarak *bin* dari H-ADCP secara horizontal (n) (Persamaan 7) dan koefisien (a) merupakan $6,3u^*$ (Persamaan 8).

$$u(n) - u_{max} = -6,3u^* \left(1 - \frac{n}{n_{max}}\right)^2 \quad (5)$$

$$y = u(n) - u_{max} \quad (6)$$

$$x = -\left(1 - \frac{n}{n_{max}}\right)^2 \quad (7)$$

$$a = 6,3 u^* \quad (8)$$

Kecepatan arus (u) dan *bin* (n) yang telah dimodifikasi diregresi linier dengan menggunakan metode *least square*. Pada tahap pertama, 3 kecepatan arus dan jarak bin 1, bin 2, dan bin 3 dilakukan secara regresi linier dengan menggunakan Persamaan 5, kemudian dihitung koefisien korelasi (R) antara x dan y . Jika $R > 0,8$ atau $R < -0,8$ maka selanjutnya adalah menghitung koefisien korelasi antara kecepatan arus dan jarak *bin* 4. Apabila koefisien korelasi x dan y untuk kecepatan arus dan jarak bin 4 memenuhi syarat $R > 0,8$ atau $R < -0,8$ maka perhitungan koefisien korelasi berlanjut ke kecepatan arus dan jarak *bin* selanjutnya (bin 5) selama masih memenuhi syarat nilai R hingga bin terakhir. Ketika pada bin 5 nilai R sudah tidak memenuhi syarat, proses regresi kecepatan arus dan jarak bin berhenti pada bin 5, dan h atau panjang profil dapat dihitung. h adalah jarak bin terakhir yang memenuhi syarat R . Kecepatan arus dan jarak bin 1 sampai bin terakhir yang memenuhi syarat R digunakan untuk pencocokan kurva sehingga didapatkan konstanta a , dan selanjutnya nilai u^* dapat diketahui mengacu pada Persamaan 8. Syarat $R > 0,8$ atau $R < -0,8$ digunakan karena angka 0,8 menunjukkan bahwa profil horizontal kecepatan arus memenuhi kriteria dan bersifat parabolik (Vedula dan Achanta, 1985; Kundu dan Ghoshal, 2012).

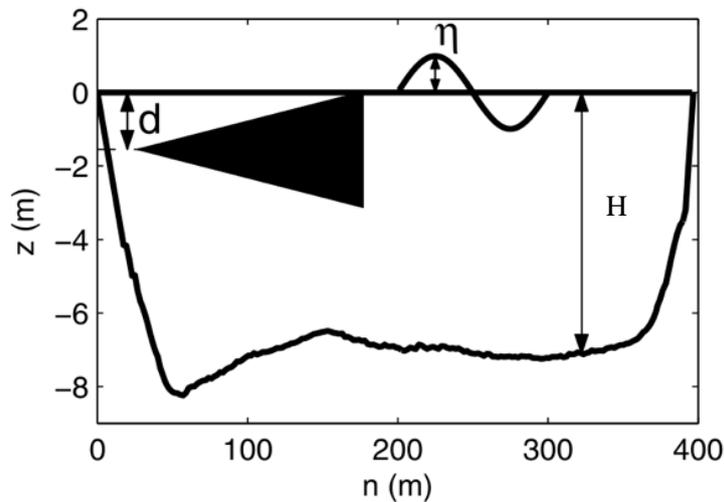
Ilustrasi tahap pengerjaan ditunjukkan pada Gambar 4, merupakan ilustrasi sungai tampak atas dengan garis panah adalah vektor kecepatan arus sungai, garis merah adalah garis pencocokan, dan W adalah lebar sungai. Gambar 4a merupakan contoh kasus untuk korelasi tiga bin pertama lebih dari 0,8 dan Gambar 4b merupakan contoh kasus untuk korelasi tiga bin pertama kurang dari 0,8. Pada Gambar 4a, tiga bin pertama memiliki korelasi lebih besar dari 0,8 sehingga proses pencocokan kurva dilanjutkan untuk bin selanjutnya, sedangkan pada Gambar 4b, kecepatan arus sungai pada bin ke-empat membuat korelasi menjadi kurang dari 0,8 sehingga proses pencocokan kurva tidak dilanjutkan dan berhenti

pada bin terakhir dengan korelasi lebih dari 0,8 yaitu bin ke-tiga. Jarak yang dapat dicapai oleh garis pencocokan disimbolkan oleh L yang berarti panjang profil kecepatan arus yang dapat didekati oleh metode parabolik.

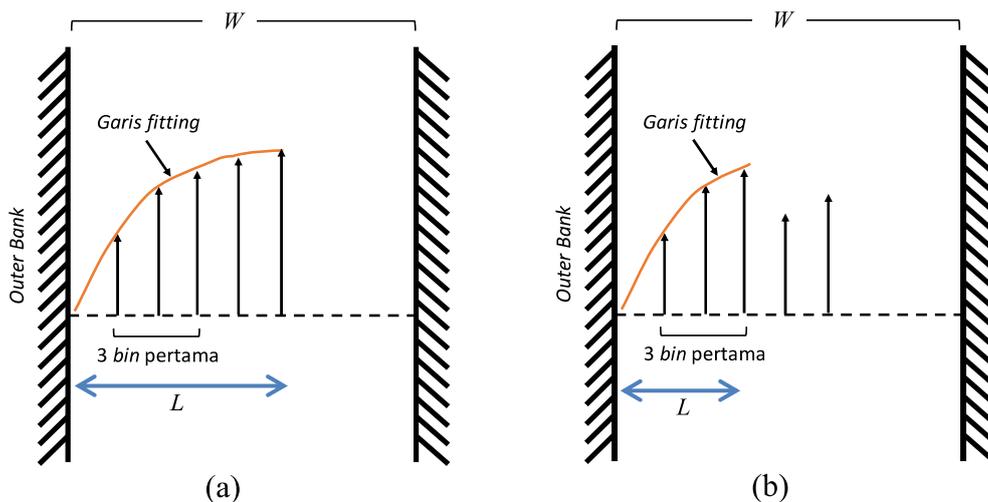
Parameter Penentuan Kualitas Metode Parabolik

Profil horizontal kecepatan arus hasil pengukuran didekati dengan persamaan parabolik. Kualitas pendekatan metode dapat ditentukan berdasarkan beberapa parameter yang ada pada Tabel 2. Parameter yang digunakan dalam menentukan

kualitas metode pendekatan profil horizontal antara lain, \bar{R} merupakan koefisien korelasi yang dirata-ratakan selama jangka waktu pengukuran, \bar{L} merupakan panjang profil horizontal kecepatan arus yang dapat didekati oleh metode parabolik yang dirata-ratakan, L_{mod} merupakan panjang profil horizontal kecepatan arus yang dapat didekati oleh metode parabolik yang paling banyak terjadi di lokasi penelitian, L_{max} merupakan panjang profil kecepatan arus yang dapat didekati oleh metode parabolik yang paling maksimal, jumlah L_{max} merupakan banyaknya



Gambar 3. Sketsa pengukuran kecepatan arus di sungai menggunakan H-ADCP (tampak samping).



Gambar 4. Ilustrasi tahap pencocokan kurva (*curve fitting*) profil kecepatan arus : (a) Korelasi 3 bin pertama antara persamaan parabolik dan data kecepatan arus yang melebihi 0,8, (b) Korelasi 3 bin pertama antara persamaan parabolik dan data kecepatan arus yang kurang dari 0,8.

Tabel 2. Parameter penentuan kualitas pencocokan kurva profil kecepatan arus

No	Parameter	Persamaan	Keterangan
1.	Koefisien korelasi (R)	$R = \frac{N \sum xy - (\sum x)(\sum y)}{\sqrt{N(\sum x^2) - (\sum x)^2} \sqrt{N(\sum y^2) - (\sum y)^2}}$	$R > 0,8$ atau $R < -0,8$
2.	Panjang profil kecepatan arus yang dapat didekati metode parabolik (L)	$L = L_0 + (N_b - 1)\Delta L$	L maksimum
3.	Kecocokan (%)	$\frac{N_a}{N_t}$	Kecocokan maksimum

waktu terbentuknya L yang bernilai maksimal, dan kecocokan yang merupakan persentase banyaknya waktu ketika suatu profil horizontal kecepatan arus dapat didekati dengan menggunakan metode parabolik terhadap waktu total pengukuran.

Simbol L merupakan panjang profil, L_0 merupakan jarak awal bin, Δh merupakan jarak antar bin, N banyak data arus dan jarak bin yang dikorelasikan, N_b merupakan jumlah data arus dan jarak bin yang dapat di *curve fitting*, N_a jumlah data profil parabolik yang terbentuk, N_t merupakan jumlah data total pengukuran, x merupakan jarak yang telah dimodifikasi sesuai metode, y merupakan kecepatan arus yang telah dimodifikasi sesuai metode, dan R adalah koefisien korelasi.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Profil Kecepatan Arus Melintang di Sungai Berau

Gambar 5 memperlihatkan variasi kecepatan arus rata-rata melintang di Sungai Berau selama periode pengukuran H-ADCP. Kecepatan arus menunjukkan gerak bolak-balik secara periodik mengikuti pasang dan surut dan variasi kondisi purnama dan perbani. Untuk mengetahui pengaruh pasang surut terhadap kecepatan arus dilakukan dekomposisi kecepatan arus menggunakan *band pass filter* (BPF) dengan periode *cut off* 11 jam dan 26 jam meliputi periode dari komponen pasang surut utama semidiurnal dan diurnal, yaitu K1, O1, S2, dan M2. Hasil BPF kecepatan arus di Sungai Berau ditunjukkan oleh garis merah pada Gambar 5, magnitudo arus pasang surut terlihat lebih signifikan dibandingkan dengan garis biru yang merupakan arus hasil *low pass filter* (LPF dengan periode *cut off* 26 jam) atau arus non-pasang surut. Kecepatan arus pasang surut memiliki kontribusi yang dominan yaitu sebesar 85%, sedangkan arus

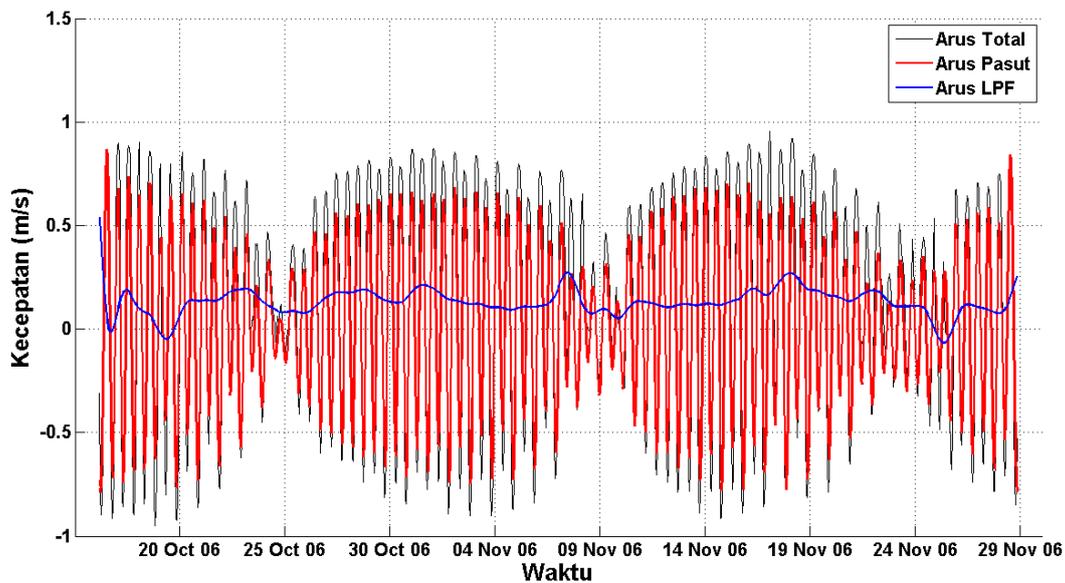
non-pasang surut berkontribusi hanya sekitar 15%. Kecepatan arus hasil LPF merupakan arus non-pasang surut seperti debit sungai, gradien densitas, angin, dan lain-lain. Kecepatan arus hasil LPF yang hampir sepanjang waktu bernilai positif (arus mengarah ke muara), maka arus non-pasut tersebut adalah disebabkan oleh debit sungai yang selalu mengalir menuju muara.

Gambar 6 merupakan contoh data profil kecepatan arus pada kondisi pasang surut purnama. Plot kecepatan arus menunjukkan magnitudo semakin membesar ke arah tengah sungai (menjauhi pinggiran sungai). Gambar 7 menggambarkan variasi profil kecepatan arus kondisi pasang surut purnama selama 24 jam. Kecepatan arus bernilai negatif menunjukkan kecepatan arus ke arah hulu dan kecepatan arus bernilai positif menunjukkan kecepatan arus bergerak ke arah muara. H-ADCP mengukur kecepatan arus untuk 150 bin dengan lebar satu meter setiap bin-nya sehingga H-ADCP mengukur kecepatan arus hingga jarak sekitar 150 meter dari dinding sungai. Dari 24 jam profil kecepatan arus pada kondisi purnama, terlihat bahwa 13 profil kecepatan arus menunjukkan kondisi surut, 8 profil kecepatan arus menunjukkan kondisi pasang, dan 3 profil kecepatan arus menunjukkan kondisi *slack*. Profil kecepatan arus saat *slack* pada jam 6, jam 10, dan jam 23 memperlihatkan magnitudo arus yang relatif kecil (< 0,2 m/s) dan arah arus yang tidak teratur. Kecepatan arus saat kondisi surut mencapai 1,2 m/s, sedangkan saat kondisi pasang mencapai 1 m/s.

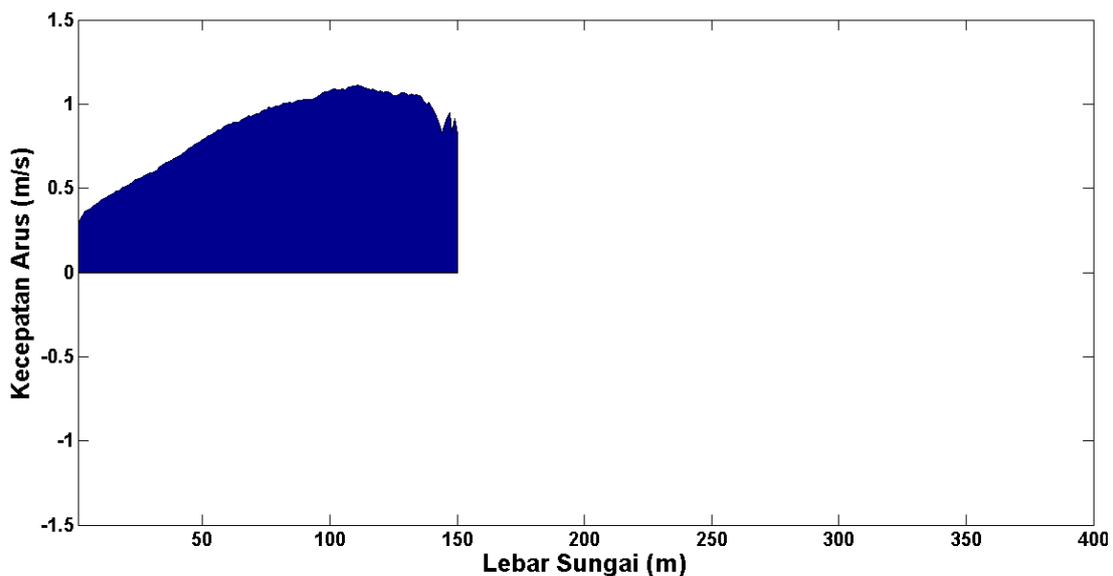
Kondisi pasang, surut, dan *slack* pada saat kondisi pasang surut perbani dapat dilihat pada Gambar 8. Dari 24 profil kecepatan arus diperoleh 15 profil arus saat kondisi surut, 6 profil arus menggambarkan kondisi pasang dan 3 profil arus kondisi *slack*. Efek gaya tarik bulan yang mengecil saat perbani terhadap dinamika kecepatan arus

sangat terlihat dengan jelas dari profil kecepatan arus. Kecepatan arus saat perbani berkurang sekitar 50% dibandingkan dengan kecepatan arus saat kondisi purnama. Kecepatan arus saat pasang dan surut sekitar 0,5 m/s, sedangkan saat kondisi *slack* kecepatan arus sekitar 0,1 m/s. Kecepatan arus saat purnama lebih besar daripada saat perbani karena

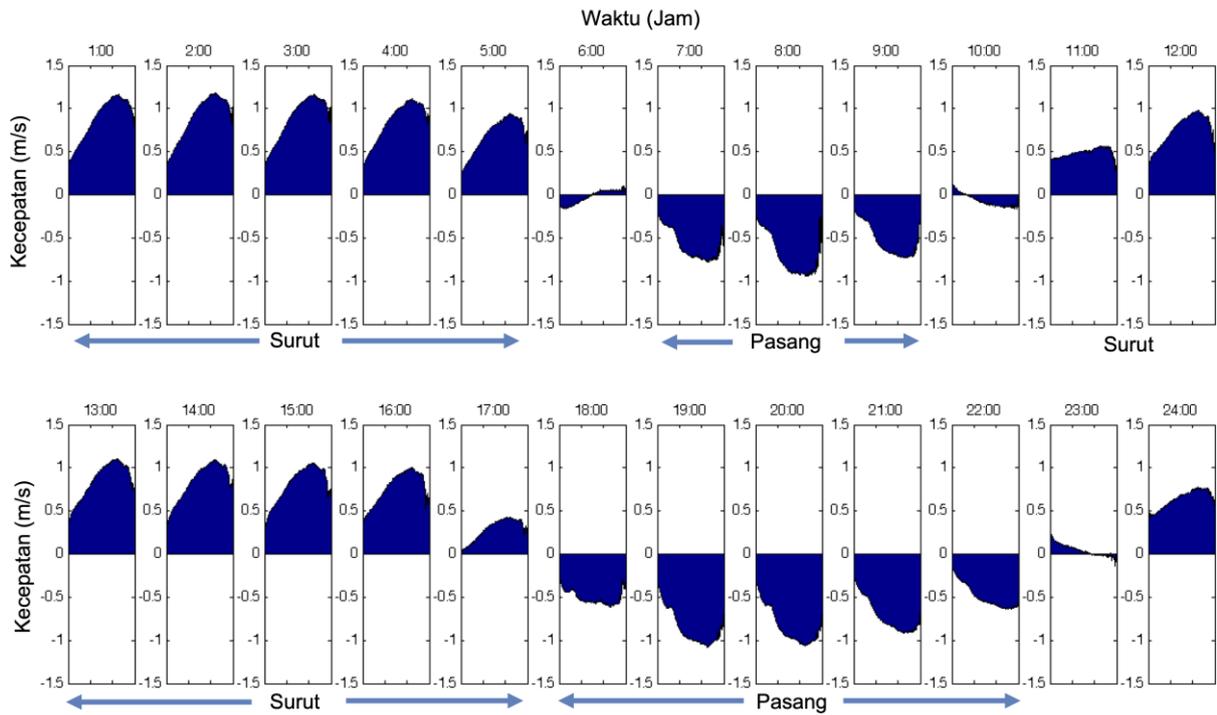
saat purnama posisi bumi, bulan dan matahari berada dalam satu garis lurus, sehingga gaya tarik bulan dan matahari maksimum. Kondisi ini menyebabkan gradien elevasi muka air yang lebih besar dibandingkan saat perbani, perbedaan elevasi muka air yang besar saat purnama akan membangkitkan kecepatan arus lebih kuat.



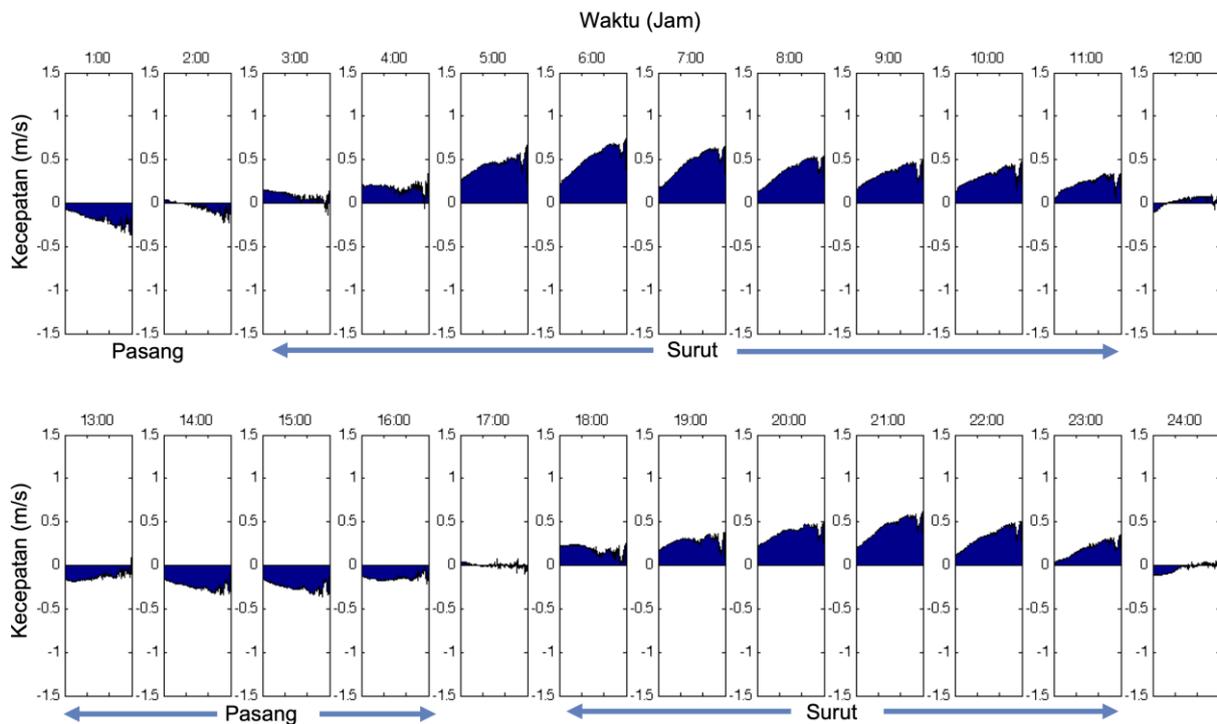
Gambar 5. Kecepatan arus rata-rata melintang sungai. Warna hitam adalah arus total, warna merah arus pasang surut (hasil band pass filter) dan warna biru adalah arus non-pasang surut. (hasil low pass filter).



Gambar 6. Sampel profil kecepatan arus kondisi pasang surut purnama.



Gambar 7. Profil kecepatan arus melintang di Sungai Berau kondisi pasang surut purnama untuk pengukuran selama 24 jam.



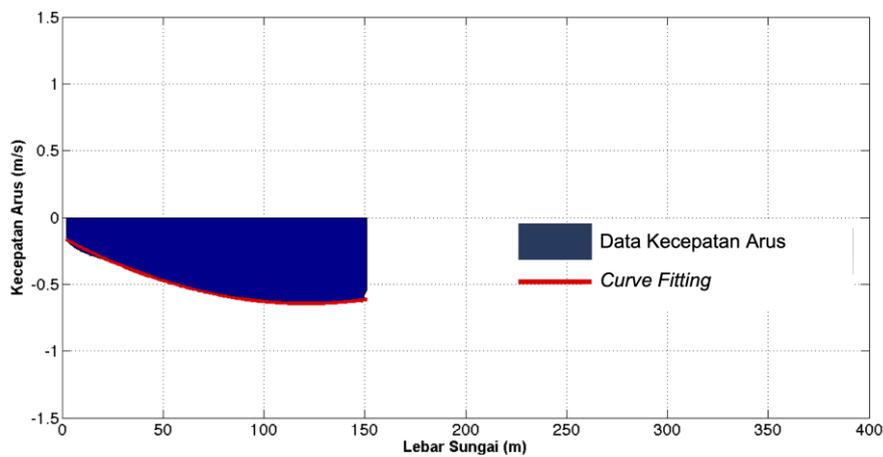
Gambar 8. Profil kecepatan arus melintang di Sungai Berau kondisi pasang surut perbani untuk pengukuran selama 24 jam.

Profil Parabolik Kecepatan Arus di Sungai Berau

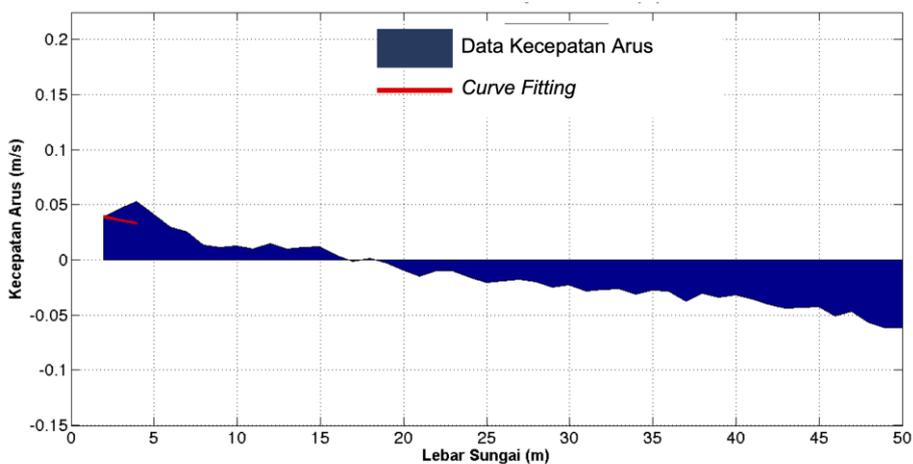
Contoh pencocokan kurva profil kecepatan arus di Sungai Berau dengan persamaan parabolik (Persamaan 3) disajikan pada Gambar 9 dan 10. Gambar 9 memperlihatkan profil kecepatan arus paling optimal dengan nilai L dan R paling maksimum (kondisi purnama). Profil kecepatan arus menunjukkan hasil pencocokan kurva parabolik yang maksimal untuk seluruh bin (hingga bin ke-150). Sedangkan pada Gambar 10 memperlihatkan pencocokan kurva profil kecepatan arus yang tidak optimal dengan nilai L yang hanya mencapai bin ke-tiga dan R paling kecil (kondisi perbani), sehingga garis merah (*curve*

fitting) tidak dapat dilanjutkan untuk bin selanjutnya karena korelasinya yang kecil ($R < |0,8|$).

Gambar 11 dan 12 memperlihatkan elevasi pasang surut ketika profil kecepatan arus yang mampu didekati dan tidak dapat didekati oleh persamaan parabolik pada saat purnama dan perbani. Titik warna merah merupakan kondisi elevasi pasang surut saat profil kecepatan arus yang terbentuk dapat didekati oleh persamaan parabolik untuk seluruh bin atau L bernilai maksimum. Kondisi ketika profil horizontal dapat didekati namun tidak untuk seluruh bin ditandai dengan lingkaran kecil berwarna hijau. Sedangkan titik



Gambar 9. Pencocokan kurva (*curve fitting*) profil kecepatan arus untuk kondisi yang paling optimal. Garis merah merupakan hasil pencocokan kurva data kecepatan arus hasil pengukuran dengan persamaan parabolik.



Gambar 10. Pencocokan kurva (*curve fitting*) profil kecepatan arus untuk kondisi yang paling minimum. Garis merah merupakan hasil pencocokan kurva data kecepatan arus hasil pengukuran dengan persamaan parabolik.

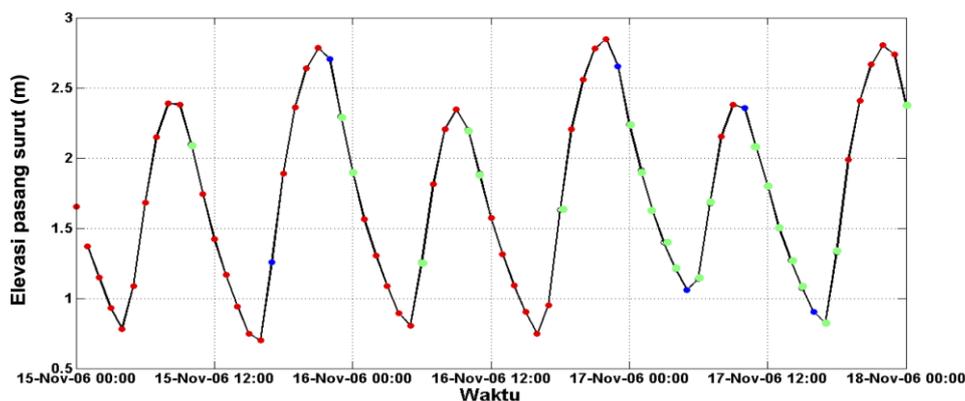
warna biru merupakan elevasi pasang surut di saat profil kecepatan arus yang terbentuk sama sekali tidak dapat didekati oleh persamaan parabolik atau $L = 0$.

Pada saat kondisi purnama (Gambar 11) dapat dilihat banyak ditemukan titik merah dan titik hijau dibandingkan titik biru, artinya pada saat kondisi purnama sebagian besar profil kecepatan arus memenuhi persamaan parabolik. Dari total 72 jam pengukuran, terdapat 44 titik berwarna merah yang artinya 61% waktu pengukuran profil horizontal yang terbentuk dapat didekati oleh persamaan parabolik secara penuh (maksimal), titik hijau ditemukan ada 22 data yang menunjukkan 31% dari data pengukuran dapat didekati sebagian dengan persamaan parabolik, sedangkan titik warna biru hanya ditemukan sebanyak 6 titik yang artinya hanya ada 8% data pengukuran tidak dapat didekati oleh persamaan parabolik.

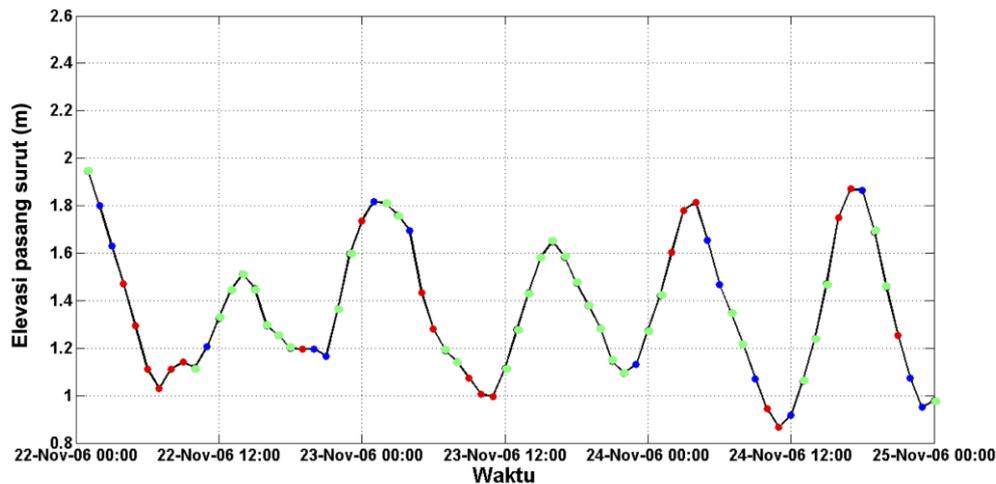
Kondisi yang berbeda ditemukan pada saat perbani (Gambar 12), jumlah titik merah pada saat perbani yaitu 21 titik (29%), titik hijau ada 36 (50%) dan titik biru sebanyak 15 (21%). Berdasarkan hasil pencocokan kurva pada kondisi purnama dan perbani, profil kecepatan arus secara maksimal mampu didekati oleh persamaan parabolik lebih sering ditemukan ketika purnama daripada saat perbani. Sedangkan, profil kecepatan arus yang sama sekali tidak dapat didekati oleh persamaan parabolik lebih sering ditemukan saat perbani dibandingkan saat purnama. Kondisi purnama menghasilkan kecepatan arus yang kuat dan gradien kecepatan yang besar antara di dekat

dinding dan bagian tengah sungai, sehingga profil kecepatan arus saat purnama lebih mendekati persamaan parabolik (Kundu dan Goshal, 2012).

Hasil uji kualitas profil kecepatan arus menggunakan parameter (Tabel 2) dapat dilihat pada Tabel 3, presentase kecocokan untuk arus total diperoleh di atas 87% saat kondisi purnama dan semua data pengamatan, sedangkan saat kondisi perbani persentase kecocokannya adalah dibawah 82%. Uji kualitas profil arus pasang surut diperoleh kecocokan di atas 84% untuk semua data pengamatan, dimana saat kondisi purnama melebihi kecocokan 93%. Nilai korelasi rata-rata (\bar{R}) untuk arus total adalah 0,86 (perbani), 0,94 (purnama) dan 0,95 (total data pengamatan), dan untuk arus pasang surut diperoleh \bar{R} mencapai 0,95. Panjang rata-rata profil kecepatan arus yang dapat didekati persamaan parabolik (\bar{L}), saat kondisi perbani menunjukkan angka yang paling kecil dibandingkan ketika purnama dan total data pengukuran \bar{L} saat kondisi perbani hanya sebesar 66 meter (arus total) dan 75 meter (arus pasang surut), sedangkan \bar{L} untuk arus total mencapai 109 meter dan untuk arus pasang surut sebesar 125 meter. Berdasarkan hasil kecocokan kurva parabolik diperoleh bahwa faktor yang mempengaruhi yaitu kondisi pasang surut dan kecepatan arus, ketika tunggang pasang surut maksimum saat purnama menyebabkan kecepatan arus yang kuat dan perbedaan kecepatan yang besar antara kecepatan arus di dekat dinding dan tengah sungai, sehingga gradien kecepatan yang tegas tersebut akan mendekati profil parabolik.



Gambar 11. Tinggi elevasi muka air kondisi pasang surut purnama pada tanggal 15-18 November 2006, titik merah menunjukkan profil kecepatan dapat didekati dengan persamaan parabolik untuk seluruh bin (L maksimum), titik hijau menunjukkan profil kecepatan dapat didekati persamaan parabolik namun tidak untuk seluruh bin dan titik biru adalah tidak dapat didekati oleh persamaan parabolik saat $L = 0$.



Gambar 12. Tinggi elevasi muka air saat kondisi perbani 22-25 November 2006, titik merah menunjukkan profil kecepatan dapat didekati dengan persamaan parabolik untuk seluruh bin (L maksimum), titik hijau menunjukkan profil kecepatan dapat didekati persamaan parabolik namun tidak untuk seluruh bin dan titik biru adalah tidak dapat didekati oleh persamaan parabolik saat $L = 0$.

Tabel 3. Hasil penentuan kualitas metode untuk pendekatan profil kecepatan arus

Arus	Waktu Pengukuran	\bar{R}	\bar{L} (m)	Kecocokan (%)	
				Pasang	Surut
Total	Total data pengamatan (1016 Jam)	0,92	105	87	91
	Purnama (216 Jam)	0,94	109	92	94
	Perbani (216 Jam)	0,86	66	70	82
Pasang surut	Total data pengamatan (1016 Jam)	0,95	112	88	93
	Purnama (216 Jam)	0,95	125	93	94
	Perbani (216 Jam)	0,90	75	84	88

KESIMPULAN

Pasang surut mempengaruhi arah kecepatan arus melintang di Sungai Berau secara periodik, arus bergerak ke arah muara saat kondisi pasang dan bergerak ke arah hilir saat kondisi surut. Selain itu, pasang surut juga memperlihatkan pengaruh terhadap variasi magnitudo kecepatan arus, kecepatan arus saat kondisi purnama mencapai 1,2 m/s, sedangkan kecepatan arus saat kondisi perbani berkurang 50% dibandingkan dengan kondisi purnama. Pasang surut memiliki peranan yang signifikan terhadap dinamika kecepatan arus di Sungai Berau, hal ini ditunjukkan dengan kontribusi arus pasang surut terhadap arus total yaitu 85%, sedangkan arus non-pasang surut hanya sebesar 15%. Kondisi pasang surut purnama menunjukkan hasil yang lebih optimal untuk metode parabolik dalam pendekatan profil kecepatan arus, dengan tingkat kecocokan sebesar

94% dan panjang rata-rata profil kecepatan arus yang dapat didekati persamaan parabolik mencapai 125 m. Hasil tersebut memperlihatkan bahwa arus yang kuat saat kondisi purnama membentuk profil kecepatan arus yang semakin mendekati persamaan parabolik.

DAFTAR PUSTAKA

Buschman, F.A., Hoitink, A.J.F., van der Vegt, M. & Hoekstra, P. 2009. Subtidal water level variation controlled by river flow and tides. *Water Resources Research*, 45(10):W10420.

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*, 46:W12515.

Buschman, F.A., van der Vegt, M., Hoitink, A.J.F. & Hoekstra, P. 2013. Water and suspended

- sediment division at a stratified tidal junction. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 118(3):1459-1472.
- Cai, H., Yang, Q., Zhang, Z., Guo, X., Liu, F. & Ou, S. 2018. Impact of river-tide dynamics on the temporal-spatial distribution of residual water level in the Pearl River channel networks. *Estuaries and Coasts*, 41(7):1885-1903.
- Guo, L., Van der Wegen, M., Roelvink, J.A. & He, Q. 2014. The role of river flow and tidal asymmetry on 1D estuarine morphodynamics. *Journal of Geophysical Research*, 119(11):2315–2334.
- Guo, L.C., van der Wegen, M., Jay, D.A., Matte, P., Wang, Z.B., Roelvink, D. & He, Q. 2015. River-tide dynamics: Exploration of nonstationary and nonlinear tidal behavior in the Yangtze River estuary. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 120(5):3499-3521.
- Gross, T.F., Isley, A.E. & Sherwood, C.R. 1992. Estimation of Stress and Bed Roughness During Storms on the Northern California Shelf. *Continental Shelf Research*, 12(2):389-413.
- Hidayat, H., Vermeulen, B., Sassi, M.G., Torfs, P.J.J.F. & Hoitink, A.J.F. 2011. Discharge estimation in a backwater affected meandering river. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(8):2717–2728.
- Hoitink, A.J.F., Buschman, F.A. & Vermeulen, B. 2009. Continuous measurements of discharge from a horizontal acoustic Doppler current profiler in a tidal river, *Water resources research*, 45(11):W11406.
- Kukulka, T. & Jay, D.A. 2003. Impacts of Columbia River discharge on salmonid habitat: 2. Changes in shallow-water habitat. *Journal of Geophysical Research*, 108(C9): 32-94.
- Kundu, S. & Ghoshal, K. 2012. Velocity distribution in open channels: combination of log-law and parabolic-law. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 6(8):1234-1241.
- Pittaluga, B.M., Tambroni, N., Canestrelli, A., Slingerland, R., Lanzoni, S. & Seminara, G. 2015. Where river and tide meet: The morphodynamic equilibrium of alluvial estuaries. *Journal of Geophysical Research : Oceans*, 120(1):75–94.
- Leonardi, N., Kolker, A.S. & Fagherazzi, S. 2015. Interplay between river discharge and tides in a delta distributary. *Advances in Water Resources*, 80:69–78.
- Lu, Y., Lueck, R.G. & Huang, D. 2000. Turbulence Characteristics in a Tidal Channel, *Journal of Physical Oceanography*, 30(5):855-867.
- Lueck, R.G. & Lu, Y. 1996, The Logarithmic Layer in a Tidal Channel. *Continental Shelf Research*, 17(14):1785-1801.
- Nihei, Y. & Kimizu, A. 2008, A new monitoring system for river discharge with horizontal acoustic Doppler current profiler measurements and river flow simulation. *Water Resources Research*, 44(4):W00D20.
- Sassi, M.G., Hoitink, A.J.F., Vermeulen, B. & Hidayat. 2011. Discharge estimation from H-ADCP measurements in a tidal river subject to sidewall effects and a mobile bed. *Water Resources Research*, 47:W06504.
- 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.
- Vedula, S. & Achanta, R.R. 1985, Bed shear from velocity profiles: a new approach, *Journal of Hydraulic Engineering*, 111(1):131-143.
- Wang, X., Wang, Z.Y., Yu, M. & Li, D. 2001. Velocity profile of sediment suspensions and comparison of log-law and wake-law. *Journal of Hydraulic Research*, 39(2):211-217.
- Zhang, E., Savenije, H.H., Wu, H., Kong, Y. & Zhu, J. 2011. Analytical solution for salt intrusion in the Yangtze Estuary, China. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 91(4):492–501