

Analisa Stabilitas Garis Pantai di Kabupaten Bangkalan

Aries Dwi Siswanto^{1*}, Widi Agoes Pratikto², dan Suntoyo²

^{1*}Jurusan Ilmu Kelautan, Universitas Trunojoyo Madura, PO. BOX 2, Jl Raya Telang, Kamal, Bangkalan, Jawa Timur, Telp +62-31-3013234, 3011146, fax +62-31-3011506

Email: ariesdwiswanto@yahoo.co.id

²Jurusan Teknik Kelautan, ITS, Kampus ITS, Keputih, Surabaya, 60111, Indonesia

Email: pratikto@oe.its.ac.id, suntoyo@oe.its.ac.id

Abstrak

Perairan pantai di Kabupaten Bangkalan merupakan kawasan strategis pengembangan kawasan pesisir, terutama pasca Jembatan Suramadu. Meningkatnya pemanfaatan areal pantai berpotensi menimbulkan gangguan terhadap ekosistem dan keseimbangan pantai, salah satunya dengan konversi tanaman bakau menjadi areal pertambakan maupun pemukiman. Luasan bakau yang rendah memiliki kerentanan relatif tinggi terhadap gelombang dan arus laut yang potensial menyebabkan erosi, sehingga terjadi kemunduran garis pantai (*retrogration coast*) yang bersifat erosi aktif. *One-line model* berdasarkan persamaan CERC merupakan salah satu metode pemodelan numerik untuk mengetahui perubahan garis pantai, dengan salah satu parameter utama adalah gelombang. Angin digunakan untuk mendapatkan properties gelombang, dan dilakukan analisa refraksi. Model divalidasi menggunakan citra Landsat. Estimasi model menunjukkan ada perubahan garis pantai pada hampir sebagian besar sel, terutama pada sel 96 dan 316. Garis pantai di lokasi penelitian relatif stabil, kecuali di daerah dermaga Kamal dan sekitar Suramadu.

Kata kunci: *Online-model, Stabilitas pantai*

Abstract

The Shoreline Stability Analysis at Bangkalan Regency. Coastal waters in the Bangkalan regency made up a strategic area for the development of coastal areas, especially after the Suramadu bridge was built. Development of the coastal area cause an increase the utilization of coastal areas in which it might cause to interference of the ecosystem and the beach equilibrium, one of them is change the mangrove ecosystem into both aquaculture and residences. The small mangrove area has a vulnerability is relatively high as compared to the waves and ocean currents causing erosion. As a result, there are *retrogration coast* that are actively erosion. *One-line model* based on CERC equation is one of the numerical modeling to know shoreline changes with main parameters is wave. Wind speed used to wave properties for refraction analyze. The validation of model used satellite imagenary. The model prediction showed no changes in the shoreline for the most of cells, especially at 96 and 316 cells Result of model was any shoreline changes The shoreline in this study relatively stable, except in the Kamal dock area and surrounding Suramadu bridge

Key words: *Online-model, Coastal stability*

Pendahuluan

Morfologi pantai dan dasar laut dekat pantai (CERC, 1984; Komar, 1998; CEM, 2007) dibagi empat kelompok (darat-laut), yaitu *Backshore*, merupakan bagian dari pantai yang tidak terendam air laut kecuali bila terjadi gelombang badai, *Foreshore*, yaitu bagian

pantai yang dibatasi oleh muka pantai (*beach face*) hingga pasang terendah, *Inshore* merupakan daerah yang lebih luas sebagai daerah subtidal yang memanjang ke daerah gelombang pecah sampai batas kemiringan tertentu, dan *Offshore* yaitu bagian laut yang terjauh dari pantai (lepas pantai).

Sebagian besar kota di dunia, juga Indonesia, berada di daerah pantai. Akibatnya, tekanan terhadap lingkungan pantai semakin meningkat, dan menimbulkan berbagai persoalan. Pasca Suramadu, wilayah pesisir dan pantai, khususnya di Kabupaten Bangkalan, akan mengalami hal tersebut. Tekanan terhadap lingkungan pantai akan memberikan dampak, salah satunya, adalah degradasi lingkungan. Perubahan garis pantai merupakan salah satu indikator adanya tekanan terhadap lingkungan, meskipun tidak selalu berarti sebagai degradasi lingkungan. Perubahan ini berpengaruh terhadap ekosistem yang ada di daerah pesisir dan pantai. Untuk itu, diperlukan penelitian tentang perubahan garis pantai yang terjadi sehingga dapat diketahui stabilitas pantai, khususnya pasca Jembatan Suramadu. Pendekatan numerik digunakan untuk analisa perubahan dan stabilitas pantai (Suntoyo, 1995). Yang membedakan penelitian ini dengan penelitian Suntoyo (1995) terletak pada validasi model yang digunakan. Pemodelan ini disesuaikan dengan kondisi di lapangan, dan selanjutnya hasil model divalidasi menggunakan citra Landsat. Pentingnya penelitian ini dilakukan sebagai langkah antisipasi meminimalkan tekanan dan untuk perencanaan pengembangan kawasan di perairan Kabupaten Bangkalan sebagai daerah penyangga utama di Pulau Madura dengan keberadaan Suramadu.

Materi dan Metode

Lokasi penelitian terletak pada 07°09'0,822"S 112°47'0,023"E sampai 07°10'36,4"S 112°43'40,0"E sepanjang 11,25 km, dibagi menjadi 375 sel dengan interval 30 m dari dermaga pelabuhan Kamal, Kabupaten Bangkalan, sampai dengan kaki Jembatan Suramadu. Analisa citra Landsat dilakukan pada bulan Mei 2010, pengambilan data lapang (sedimen permukaan, sedimen tersuspensi) pada April 2010, analisa lab pada Mei 2010, dan desain+ pengembangan model pada Pebruari-Juni 2010. Data yang digunakan dibedakan menjadi data primer dan data sekunder. Data primer merupakan data yang diambil dan diukur di lapangan serta selanjutnya dilakukan analisa di laboratorium. Beberapa parameter yang termasuk dalam kategori data primer, meliputi sedimen permukaan dasar dan sedimen tersuspensi. Contoh sedimen permukaan dasar diambil menggunakan *grab sampler* pada 11 titik yang mewakili lokasi penelitian sepanjang 11,25 km. Contoh air laut untuk sedimen tersuspensi diambil menggunakan *nansen bottle* sesuai lokasi pengambilan sedimen permukaan dasar. Contoh sedimen permukaan dasar dianalisa menggunakan metode Buchanan (Holme & Mc Intyre, 1984 dalam Siswanto, 2004; 2010), sedangkan sedimen tersuspensi dianalisa berdasarkan metode gravimetri (BSN, 2004).

Data sekunder merupakan data yang diperoleh dari instansi terkait, seperti parameter angin, pasang surut, peta rupa bumi, peta bathimetri dan citra Landsat TM. Data angin tahun 1994-2008 dan pasang surut tahun 1994 dan tahun 2008 diperoleh dari Badan Meteorologi, Klimatologi dan Geofisika (BMKG) Stasiun Maritim Tanjung Perak Surabaya. Peta rupa bumi diperoleh dari Bakosurtanal, peta bathimetri dari Dinas Hidrooseanografi-TNI AL, dan citra Landsat TM *path 118 row 065* tahun 1994 dan 2008 diperoleh dari SEAMO-BIOTROP. Data angin dikonversi menjadi properties gelombang menggunakan metode SMB (Komar, 1998; Triatmodjo, 1998; CEM, 2007) sebagai input utama untuk *one-line model*. Pasang surut dianalisa menggunakan metode admiralty (Ongkosongo & Suyarso, 1989) untuk memperoleh komponen harmonik dalam menentukan tipe pasang surut. Peta rupa bumi, peta bathimetri dan citra Landsat TM diolah menggunakan software Arcview sebagai data dan kondisi awal garis pantai. Citra Landsat TM tahun 2008 yang telah diolah menggunakan software Arcview dijadikan sebagai kondisi akhir sekaligus untuk validasi model.

One-line model

One-line model merupakan model sederhana (Zacharioudaki & Dominic, 2010) yang dikenal juga sebagai metode garis. Metode ini digunakan dalam *one-line model* untuk mendeskripsikan pergerakan garis pantai kontur tunggal terhadap respon gelombang yang dikonversi dari kecepatan angin (Komar, 1984; Suntoyo, 1995). Keberadaan struktur pelindung seperti tanaman Bakau maupun *revetment* tidak dipertimbangkan dalam model ini.

One-line model yang digunakan dalam penelitian ini didasarkan pada persamaan (Komar, 1984):

$$\frac{\partial Y}{\partial t} = - \frac{1}{d_b} \frac{\partial Q_s}{\partial x} \dots\dots\dots 1)$$

dimana **Y** jarak garis pantai dengan garis referensi, **d_b**, kedalaman gelombang pecah, **Q_s**, transpor sedimen sepanjang pantai, **t** waktu dan **x** absis searah pantai. Transpor sedimen sepanjang pantai dihitung menggunakan persamaan empiris:

$$Q_s = 6.85 \times 10^{-5} (E C_n)_b \sin \alpha_b \cos \alpha_b \dots\dots\dots 2)$$

dimana E energi gelombang, C_n group celerity gelombang, α_b sudut gelombang pecah.

Model dikembangkan dengan menentukan bentuk atau posisi dari garis pantai awal (didasarkan pada citra Landsat TM tahun 1994). Panjang garis pantai yang dikaji sejauh 11,25 km, yang dibagi menjadi 375 sel dan interval waktu dengan lebar sel

(ΔX) sebesar 30 m (Gambar 1) dan kemiringan setiap selnya. Setiap sel memiliki panjang y_1, y_2, \dots, y_n dari garis referensi. Selanjutnya, menentukan sumber sedimen dan sedimen yang hilang pada seluruh sel (Q_e). Perubahan posisi garis pantai tergantung jumlah sedimen yang masuk dikurangi dengan jumlah sedimen yang meninggalkan sel dalam interval waktu tertentu. Perubahan akumulasi atau erosi sedimen dapat ditulis:

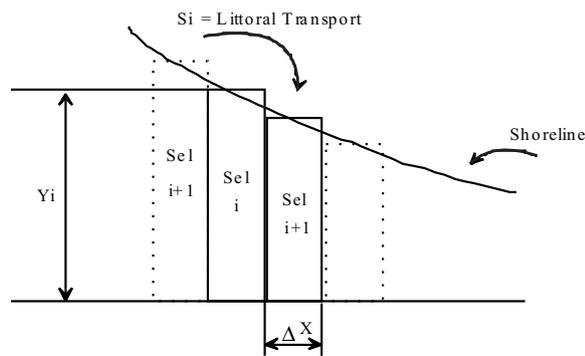
$$\Delta V = (Q_{i+1} - Q_i) \Delta t \text{ ----- 3)}$$

dimana ΔV volume sel garis pantai, Q_{i+1} littoral drift sel $i+1$, dan Q_i littoral drift sel i .

Akibatnya, kuantitas transpor sedimen dapat bernilai negatif atau positif, kemungkinan diakibatkan oleh adanya influks sedimen dari sungai atau pergerakan sedimen sepanjang pantai; sehingga persamaan (2) ditambahkan dengan batas keseimbangan littoral drift (Q_r) sehingga menjadi;

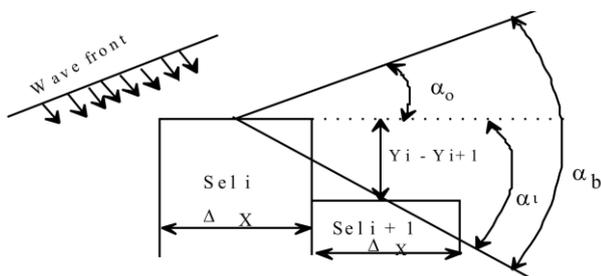
$$\Delta V = (Q_{i+1} - Q_i \pm Q_r) \Delta t \text{ ----- 4)}$$

D



Gambar 1. Pembagian garis pantai dalam beberapa sel (Komar, 1984; 1998)

Perubahan garis pantai yang terjadi pada tiap sel menyebabkan perubahan sudut datang gelombang pecah, sehingga transpor sedimen sejajar pantai mengalami perubahan.



Gambar 2. Hubungan α_0, α_i dan α_b (Komar, 1984; 1998)

Sudut α_i merupakan sudut yang dibentuk oleh garis pantai dengan garis sejajar sumbu x, antara sel i dan sel $i+1$, ditulis dalam persamaan:

$$\tan \alpha_i = \frac{Y_i - Y_{i+1}}{\Delta x} \text{ ----- 5)}$$

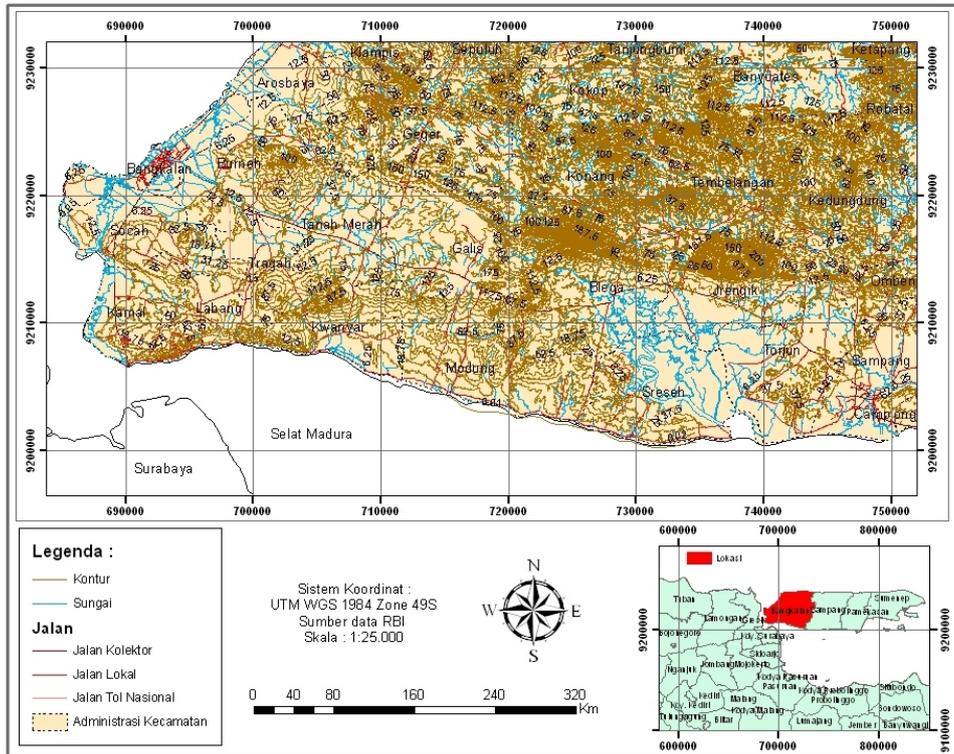
Gelombang datang yang membentuk sudut α_0 dengan arah sumbu X, maka sudut datang gelombang pecah terhadap garis pantai sebesar $\alpha_b = \alpha_i \pm \alpha_0$ sehingga sudut gelombang pecah dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$\tan \alpha_b = \frac{\tan \alpha_i \pm \tan \alpha_0}{1 + \tan \alpha_i \tan \alpha_0} \text{ ----- 6)}$$

Persamaan 2) menggambarkan perubahan garis pantai, diselesaikan secara numerik menggunakan metode beda hingga. Penyelesaian dilakukan dengan membagi pantai menjadi beberapa sel dan waktu dalam sejumlah langkah waktu. Pembagian menjadi beberapa sel bertujuan untuk mengubah bentuk persamaan diferensial parsial ke dalam bentuk diskret pada sejumlah titik hitungan, dan selanjutnya diselesaikan secara numeris menggunakan bahasa pemrograman Fortran untuk mendapatkan posisi garis pantai.

Hasil dan Pembahasan

Lokasi penelitian berawal di dermaga Pelabuhan Kamal, Kabupaten Bangkalan, dan berakhir di kaki Jembatan Suramadu sepanjang 11,25 km. Sepanjang wilayah pesisir ada struktur bangunan, seperti pemukiman, dermaga, *revetment*; maupun ekosistem (seperti terumbu karang maupun bakau), diduga berpengaruh terhadap transpor sedimen. Ekosistem bakau yang ada pada hampir sebagian besar wilayah pesisir di Kabupaten Bangkalan seluas $\pm 1513,88$ ha dengan 30,79% dalam kondisi baik (PSKL & DKP Jatim, 2009) relatif penting dalam melindungi pantai dari serangan gelombang. Akibatnya, arus yang timbul akibat gelombang relatif kecil sehingga pengaruhnya terhadap transpor sedimen menjadi berkurang. Transpor sedimen pada ekosistem bakau dengan kondisi baik relatif rendah dibandingkan pantai dengan kondisi bakau rusak (atau bahkan tanpa bakau) (Pratiwi, 2002). Luasan 69,21% ekosistem bakau yang rusak (PSKL & DKP Jatim, 2009) di sepanjang pesisir dan pantai di Kabupaten Bangkalan oleh berbagai sebab diduga mempengaruhi stabilitas pantai karena meningkatnya sedimentasi. Tingginya aktifitas di lokasi penelitian, terutama daerah dermaga pelabuhan Kamal dan sekitar kaki Jembatan Suramadu sisi Madura maupun keberadaan bangunan yang tidak memiliki jarak ideal dari garis pantai; diduga mempengaruhi proses alamiah pantai, menurunnya



Gambar 3. Lokasi penelitian

daya dukung lingkungan sebagai akibat tidak adanya *buffer zone*, dan meningkatnya permasalahan (selain masalah perubahan garis pantai).

Sedimen pantai berasal dari hasil erosi sungai, erosi tebing pantai, erosi batuan dasar laut, dan sebagian besar justru berasal dari sungai yang bermuara di sekitar pantai dan memberikan suplai relatif besar ($\pm 90\%$) terhadap transpor sedimen dipantai. Sedangkan sumber sedimen laut berasal dari aktivitas angin, vulkanik, dan masukan dari sungai yang sebagian besar dihasilkan dari pelapukan batuan didaratan (Siebold & Berger, 1993).

Daerah di lokasi penelitian merupakan daerah relatif landai, dengan kemiringan rata-rata 0,033. Hasil analisa sedimen permukaan dasar pada 11 lokasi sepanjang 375 sel menunjukkan bahwa substrat perairan berupa *sandy clay* dan *clay*. Sedimen berdasarkan-Skala Wentworth-ukuran butirnya (CERC, 1984; Komar, 1998; Dean & Dalrymple, 2004; CEM, 2007) diklasifikasikan menjadi lempung, lanau, pasir, kerikil, koral (*pebble*), cobble, dan batu (*boulder*). Kedua jenis sedimen ini mudah teraduk dan berpindah oleh gelombang dan arus meskipun kecepatan relatif sangat kecil (Siswanto, 2010; Siswanto et al, 2010).

Berbeda dengan material *coarse* seperti *shingle*, yang memerlukan gaya pembangkit, seperti gelombang dan arus maupun kombinasi keduanya,

dengan kecepatan lebih besar agar memungkinkan transpor sedimen dasar terjadi (Soulsby & Damgaard, 2005). Dengan jenis substrat diatas, kecenderungannya terjadi transpor sedimen tersuspensi lebih besar dibandingkan transpor sedimen dasar.

Hasil analisa laboratorium atas contoh air untuk mengukur konsentrasi Total Suspended Solid (TSS) menggunakan metode gravimetri (BSN, 2004) menunjukkan bahwa daerah di sekitar dermaga pelabuhan Kamal (stasiun 3 dan 4) dan kaki Jembatan Suramadu (stasiun 9 dan 10) memiliki nilai konsentrasi TSS lebih tinggi dibandingkan lokasi lainnya di sepanjang lokasi penelitian (Gambar 5). Hasil penelitian Siswanto (2010) menyebutkan bahwa konsentrasi TSS di sekitar kaki Jembatan Suramadu relatif tinggi, diduga karena adanya perubahan pola sirkulasi arus setelah adanya jembatan. Nilai konsentrasi TSS yang relatif tinggi (stasiun 3, 4, 9, dan 10) pada umumnya berkorelasi dengan tingkat sedimentasi (Siswanto, 2009). Sebaran material tersuspensi dipengaruhi oleh arus dan gelombang serta menjadi indikator untuk mengetahui erosi pantai, fenomena *upwelling* maupun *runoff* sungai (Jackson et al, 2010).

Data angin periode tahun 1994-2008 diolah menggunakan software WR-Plot. Angin dikelompokkan berdasarkan arah dan kecepatan, dan diperoleh arah

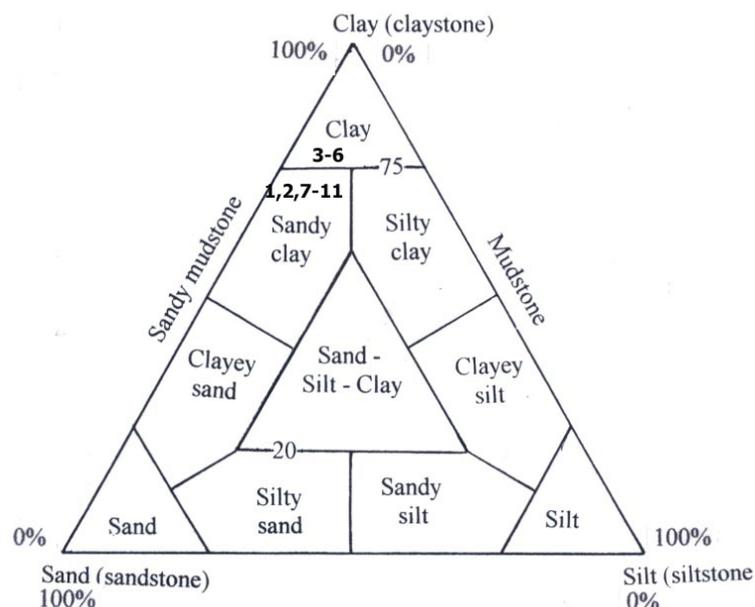
angin Tenggara (18,67%) dan Timur (18,22%) sebagai angin dominan (Tabel 1). Arah angin dominan, sesuai dengan metode SMB (Komar, 1998; Triatmodjo, 1998; CEM, 2007), menjadi komponen penting dalam analisa refraksi gelombang (Tabel 2). Arah angin dominan penting dalam menentukan dan menghitung *fetch* gelombang. Dalam perhitungan refraksi gelombang, arah angin yang dipertimbangkan, selain arah angin dominan (Tenggara dan Timur), juga arah Selatan, karena merupakan perairan laut. Arah angin Barat dan Utara tidak diperhitungkan karena merupakan daratan. Tinggi gelombang (H) pada lokasi penelitian relatif kecil, dan saat pecah, ketinggian gelombang pecah (H_b) relatif kecil (Tabel 3), mengingat rata-rata kedalaman di lokasi tergolong perairan dangkal dan landai. Hasil pengolahan data pasang surut berdasarkan metode Admiralty (Ongkosongo & Suyarso, 1989) menunjukkan tipe pasang surut di lokasi penelitian adalah campuran condong ke harian ganda dengan nilai bilangan Formhzal berkisar $0,25 < F \leq 1,5$ (1,17 pada bulan Juli 1994 dan 1,49 pada bulan Juli 2008), *Mean Sea Level (MSL)* 18.55 cm (bulan Juli 1994) dan 9.50 cm (bulan Juli 2008).

Perbedaan pasang surut, keberadaan gelombang individu, musim, dan parameter utama gelombang (tinggi dan sudut datang gelombang terhadap morfologi pantai), berpengaruh terhadap perubahan profil pantai. Pantai (Priyono, 1996) terbentang dari tempat terjadinya perubahan fisiografi sampai ke suatu tempat di perairan (laut) dimana sedimen dasar tidak dipengaruhi oleh gelombang permukaan dan daerah paling dinamis (Dean & Dalrymple, 2004) dari semua lingkungan laut yang

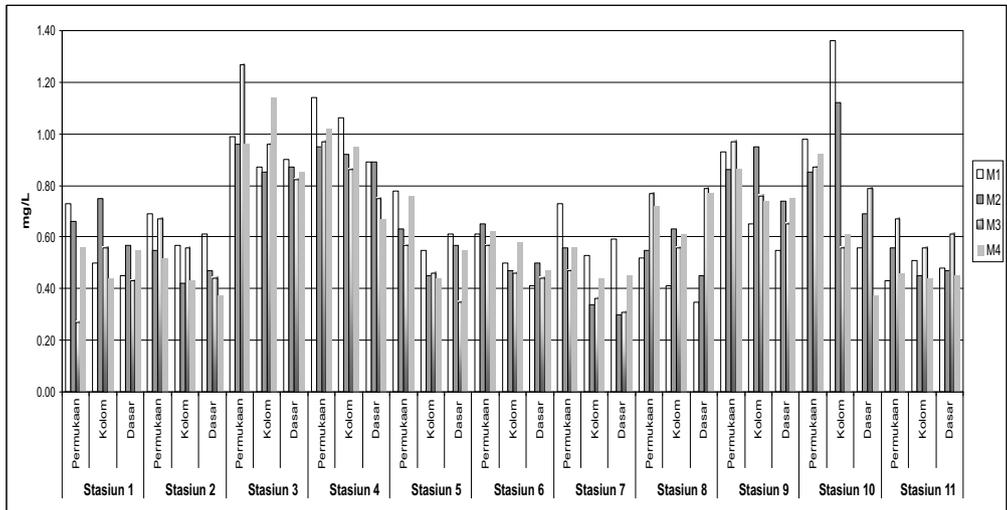
terpengaruh proses gelombang yang secara konstan memungkinkan terjadinya perubahan. Sebagai garis pertemuan antara daratan dan lautan (Bird, 1984), pantai masih dipengaruhi oleh laut dan darat. Pengaruh laut terhadap pantai berupa gelombang, arus, pasang, angin, bathimetri dan keterdapatn karang pantai, pasokan dan jenis sedimen dari sungai dan vegetasi; sedangkan pengaruh darat terhadap pantai berupa morfologi (kemiringan atau topografi) dan litologi (batuan penyusun).

Secara umum, transpor sedimen di pantai dibedakan menjadi dua, yaitu transpor sedimen tegak lurus pantai dan transpor sedimen sepanjang pantai. Konsep dasar transpor sedimen tegak lurus pantai mirip dengan konsep keseimbangan pantai (Inman & Patricia, 1991). Beberapa formula transpor sedimen sejajar garis pantai umum digunakan, antara lain formula CERC (CEM, 2007), Bijker, Engelund-Hansen, Watanabe, Ackers-White, VannRijn maupun Bailard-Inman (Bayram et al, 2001). Formula Bijker merupakan formula paling sederhana (Farid, 2005) yang mengkombinasikan gelombang dan arus serta dapat diterapkan untuk gelombang pecah maupun gelombang yang belum pecah (Bayram et al, 2001). Formula CERC (USACE, 2001) merupakan formula yang umum digunakan dalam menghitung transpor sepanjang pantai untuk aplikasi ataupun rekayasa (Miller, 1999).

Bayram et al. (2006) menyimpulkan bahwa total transpor sedimen sepanjang pantai dibentuk berdasarkan prinsip transpor sedimen secara fisik diasumsikan gelombang pecah yang memindahkan sedimen, dipengaruhi juga oleh arus. Kecepatan arus



Gambar 4. Penamaan sedimen (skala Wenworth (CEM, 2007)) di lokasi penelitian



Gambar 5. Konsentrasi nilai Total Suspended Solid (TSS) di lokasi penelitian

Tabel 1. Presentase Kejadian Angin di Selat Madura tahun 1994 - 2008

Arah	Kecepatan Angin (m/s)						Total
	0.5 - 2.1	2.1 - 3.6	3.6 - 5.7	5.7 - 8.8	8.8 - 11.1	...	
Utara	2.38	1.44	2.48	1.52	0.26	0.04	8.12
Timur Laut	2.12	1.34	2.22	1.02	0.12	0.02	6.83
Timur	3.82	2.77	5.55	4.42	1.35	0.30	18.22
Tenggara	3.87	2.75	4.99	4.86	1.75	0.43	18.67
Selatan	5.29	1.39	1.57	0.90	0.26	0.05	9.46
Barat Daya	4.08	0.87	0.57	0.11	0.01	0.00	5.65
Barat	4.09	1.63	1.83	0.83	0.14	0.01	8.53
Barat Laut	2.30	1.19	1.81	0.96	0.19	0.02	6.47
Sub-Total	27.96	13.37	21.02	14.63	4.09	0.87	81.94
Calms							18.06
Tidak lengkap							0.00
Total							100.00

menyusur pantai konstan dan secara integral digantikan dengan fraksi energi gelombang datang yang menjaga sedimen dalam bentuk suspensi. Model yang dibangun oleh Bayram *et al* (2001; 2006) relatif lebih kompleks dibandingkan dengan *one-line model* yang digunakan dengan berdasarkan formula CERC ini. Meskipun demikian, tetap ada beberapa keuntungan menggunakan *one-line model* ini, yaitu 1) solusi yang stabil terhadap kondisi yang tidak biasa, 2) tingkat akurasi tidak tergantung pada langkah waktu yang dispesifikasikan oleh pemrogram, dan 3) pengkodean yang sederhana dan fleksibel (Zacharioudaki & Dominic, 2010).

Hasil penelitian Suntoyo (1995) menggunakan properties gelombang yang dikonversi dari data angin. Selanjutnya, dilakukan analisa refraksi gelombang. Hasil analisa refraksi gelombang menjadi

input utama untuk *one-line model* perubahan garis pantai di Candi Dasa, Bali. Hasil pemodelan menunjukkan bahwa sebagian besar wilayah studi relatif rentan terhadap serangan gelombang karena merupakan pantai yang menghadap ke perairan terbuka (samudera Hindia). Sebagai alternatif perlindungan pantai, diusulkan pembuatan revetment dan jetty serta breakwater untuk mengurangi energi gelombang sehingga saat mencapai pantai, kecepatan dan energinya telah banyak berkurang.

Model yang digunakan dalam penelitian ini merupakan model yang digunakan dalam penelitian Suntoyo (1995) dengan beberapa modifikasi. Diantaranya, mengasumsikan tidak ada struktur bangunan pantai (seperti dermaga, *revetment*, maupun bangunan pemukiman) sepanjang garis pantai. Sehingga, wilayah studi dianggap alami. Kontur

bathimetri yang digunakan sesuai dengan peta bathimetri, sehingga tidak ada skenario perubahan kontur dalam pemodelan, seperti halnya pada penelitian Suntoyo (1995). Perbedaan lainnya, validasi yang dilakukan dalam penelitian ini menggunakan citra Landsat, sementara pada penelitian Suntoyo (1995), model divalidasi menggunakan analisa matematis. Sesuai dengan Zacharioudaki & Dominic (2010), model ini relatif sangat sederhana sehingga fleksibel dan mudah dalam pengkodeannya.

Hasil eksekusi dari *one-line model* relatif identik dengan kondisi garis pantai sesuai citra Landsat TM tahun 2008. Secara umum, perubahan garis pantai terjadi pada hampir sebagian besar sel di lokasi penelitian. Didaerah sekitar dermaga pelabuhan Kamal dan kaki Jembatan Suramadu merupakan daerah yang mengalami perubahan cukup signifikan dalam hasil eksekusi model.

Alur *one-line model*, pertama dihitung adalah sudut gelombang pecah dan littoral drift pada sel i sampai sel ke $i+1$ dalam waktu Δt . $\tan \alpha_0$ adalah besaran $\tan \alpha_0$ sebagai nilai sudut arah gelombang datang terhadap garis pantai untuk tiap arah gelombang dominan dengan besar sudut garis pantai 60° . Tani menyatakan nilai $\tan \alpha_i$ untuk tiap sel dalam pemodelan. Sehingga, besarnya sudut gelombang pecah (α_b) diperoleh dari $\tan \alpha_b$ (ditulis $\tan B$ dalam model) jika $y_i = y_{i+1}$ maka $\alpha_i = 0$ sehingga $\alpha_b = \alpha_0$

Inisial arah dalam model menunjukkan arah dari hasil littoral drift (arah=1 maka littoral drift ke arah sumbu x

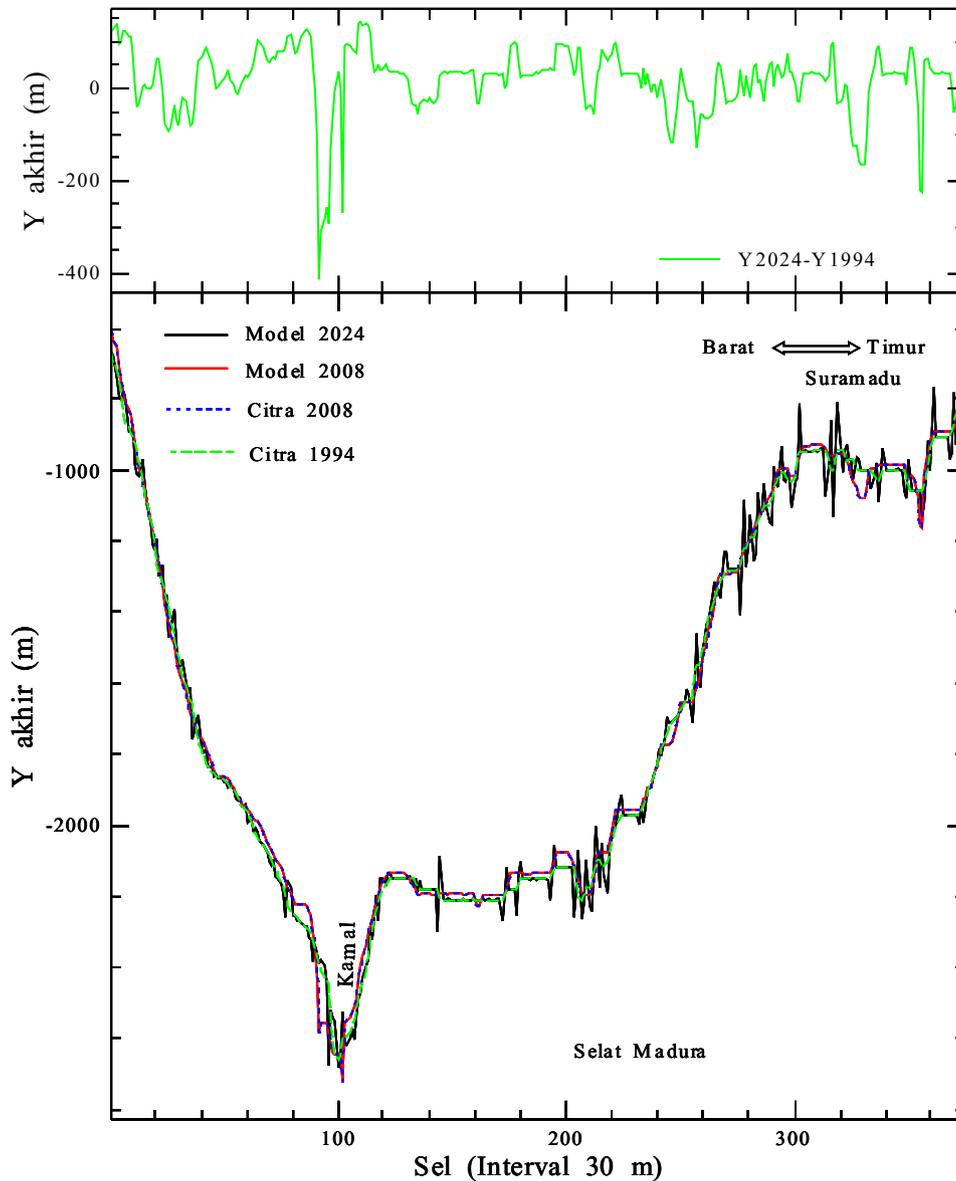
positif, dan sebaliknya). Kemudian dihitung nilai $\sin \alpha_0$ dan $\cos \alpha_0$ untuk evaluasi littoral drift. Langkah selanjutnya, menghitung nilai Q_i (persamaan 2.10), jika bernilai positif (+) berarti aliran sedimen dari sel i menuju sel $i+1$, dan sebaliknya, jika Q_i bernilai negatif (-) maka sedimen berpindah dari sel $i+1$ ke sel i . Perhitungan dilakukan program sampai perulangan sel ke 375, setelah ditentukan besarnya Δt kemudian dapat dihitung nilai Δy . Penjumlahan koordinat garis pantai yang lama (y) dengan Δy merupakan koordinat garis pantai yang baru. Selanjutnya, hasil divalidasi dengan koordinat garis pantai pada citra Landsat tahun 2008. Nilai negatif (-) sumbu y pada Gambar 6 untuk menyesuaikan orientasi dengan peta, sehingga notasi positif (+) menunjukkan kemunduran garis pantai dan negatif (-) menunjukkan kemajuan garis pantai. Validasi model dilakukan dengan menghitung error yang terjadi pada setiap sel. Model dibandingkan dengan citra Landsat (2008) sebagai salah satu cara validasi. Nilai error dihitung dengan cara Y_{model} pada tahun 2008 dikurangi dengan Y_{citra} (citra Landsat 1994 sebagai kondisi awal), kemudian hasil pengurangan dibagi dengan Y_{citra} (citra Landsat 1994). Nilai akhir ini dinamakan nilai error atau faktor koreksi model terhadap data awal. Nilai error yang diperoleh dibagi dengan rentang waktu n -tahun (antara tahun citra yang digunakan validasi dikurangi tahun citra sebagai kondisi awal). Hasilnya, ditambahkan pada hasil model pada tahun n untuk melakukan estimasi perubahan garis pantai.

Tabel 2. Pengolahan data angin tahun 1994-2008 untuk refraksi gelombang

Kecepatan Angin			Konversi angin Darat-Laut						Input Model	
Interval	Mak	Arah	UL	U	RL	UW	U1,23	UA	Ho	To
(knot)			km/jam	m/dtk					(m)	(dtk)
1-4	4	S	7.41	2.00	1.750	12.964	2.346	1.67	0.35	2.80
4-7	7	T	12.96	3.50	1.550	20.094	4.669	3.31	0.70	4.40
7-11	11		20.37	5.50	1.350	27.502	8.140	5.78	0.75	4.50
11-17	17	Tg	31.48	8.50	1.200	37.781	13.905	9.87	1.30	5.50
17-21	21		38.89	10.50	1.150	44.726	18.033	12.80	1.74	6.00
>22	22		40.74	11.00	1.125	45.837	19.095	13.56	1.80	6.10

Tabel 3. Hasil perhitungan analisa refraksi gelombang

Arah angin	Sudut garis pantai	.	H (m)	Hb (m)	Lb (m)	Cb (m)	db (m)
Timur	60	30	0.75	0.54	9.75	1.6	0.54
Tenggara	60	60	1.8	0.54	9.75	1.6	0.54
Selatan	60	85	0.35	0.54	9.75	1.6	0.54



Gambar 6. Model garis pantai di Kabupaten Bangkalan

Kondisi garis pantai sesuai citra Landsat TM tahun 1994 dan 2008 menunjukkan ada beberapa sel yang mengalami perubahan. Perubahan relatif besar (Gambar 4, grafik bagian atas) terjadi pada sel 95-100 (daerah dermaga pelabuhan Kamal) dan pada sel 320-360 (daerah sekitar kaki Jembatan Suramadu). Kedua daerah ini merupakan daerah yang rentan abrasi karena letaknya yang berhadapan dengan arah gelombang datang. Gelombang yang mendekati pantai dengan sudut tertentu-mencapai maksimal pada sudut 45° (Siegle & Nils, 2007) dan pecah akibat kemiringan pantai (karena perubahan kedalaman) akan membangkitkan arus dekat pantai yang menentukan arah pergerakan sedimen pantai (Komar, 1998).

Validasi model (error 9%) menunjukkan kemiripan dengan citra Landsat. Sel 325-335, 353-357, merupakan daerah rentan abrasi meskipun properties gelombang relatif kecil. Kontur bathimetri (maupun keberadaan Jembatan Suramadu) diduga berpengaruh terhadap transformasi gelombang. Daerah lain sepanjang lokasi penelitian juga mengalami perubahan, meskipun tidak sebesar di daerah dermaga pelabuhan Kamal dan kaki Jembatan Suramadu, diduga akibat sepanjang daerah ini berhadapan langsung dengan arah gelombang datang, dalam rentang waktu lama diduga berpengaruh terhadap stabilitas pantai (Suntoyo, 1995). Gambar 6 menunjukkan ada perubahan garis pantai pada hampir semua sel pada tahun ke-30 (tahun 2024). Jika

dibandingkan dengan kondisi awal (citra Landsat 1994), kondisi garis pantai pada tahun 2024 relatif berbeda. Daerah yang menjorok ke arah laut (sel 100-110, 200-220) dan daerah yang sejajar dengan kontur parameter lain tidak dapat diperoleh menggunakan model ini

Perbandingan dengan citra Landsat 2008 dan model untuk tahun 2024, menunjukkan pertambahan garis pantai terjadi pada hampir semua sel, khususnya di daerah sekitar dermaga pelabuhan Kamal dan daerah kaki Jembatan Suramadu. Perubahan garis pantai semakin fluktuatif pada sel yang tegak lurus terhadap arah gelombang datang (Heward, 1981; Komar, 1984; CEM, 2007) dan sejajar dengan kontur bathimetri (CEM, 2007). Gelombang yang pecah akan menimbulkan, diantaranya, arus menyusur pantai sebagai penyebab efektif pergerakan sedimen pantai (Siegle & Nils, 2007). Arah transpor sedimen menyusur pantai diketahui dari perubahan garis pantai dalam periode lama di sekitar bangunan struktur pantai karena merupakan akumulasi *updrift* struktur pantai dan erosi *downdrift* (Kuriyama & Hikari, 2007). Kondisi lingkungan dengan ekosistem Bakau dengan 69,21% rusak (PSKL & DKP Jatim, 2009), diduga semakin meningkatkan efektifitas gelombang dan mempengaruhi proses pantai, terutama erosi dan akresi.

Kesimpulan

Perubahan garis pantai terjadi pada hampir semua sel disebabkan oleh gelombang dengan kemunduran garis pantai terbesar pada sel 96 (112,33 m) dan kemajuan garis pantai terbesar pada sel 316 (-68,64 m). Perubahan terjadi di beberapa sel di dermaga Pelabuhan Kamal dan sekitar kaki Jembatan Suramadu sebagai akibat lokasi yang menjorok ke arah laut sehingga lebih rentan terhadap serangan gelombang.

Ucapan Terima Kasih

Ucapan terimakasih disampaikan kepada DIKTI atas beasiswa Pendidikan Pasca sarjana (BPPS), kedua dosen pembimbing, dan jurusan Ilmu Kelautan Universitas Trunojoyo.

Daftar Pustaka

Bayram, A., Magnus L, Hanson, & Chris C, 2006. A New Formula for Total Longshore Transport Rate, *Coastal Engineering*, 3357-3369p.

Bird, F. C. E., 1984. *Coast: An Introduction to Coastal Gemorfology*, 3rded, Basil Blackwell Inc, New York. 405p

[BSN] Badan Standarisasi Nasional, 2004. Air dan Air Limbah-Bagian 3: Cara Uji Padatan Tersuspensi Total (Total Suspended Solid, TSS) secara Gravimetri, SNI 06-6989.3-2004, 1-10 hal

Chandramohan, P., Nayak, B.U., & Raju, V.S. 1988. Application of Longshore Transport Equation to the Andhra Coast, East Coast of India, *Coastal Engineering*, 12: 285-287.

[CEM], 2007. *Coastal Engineering Manual, Part I-VI*. Washington, U.S. Army Coastal Engineering Research Centerp

[CERC], 1984. *Shore Protection Manual Volume I, 4th edition*. Washington, U.S. Army Coastal Engineering Research Center.

Dean, R.G. & Dalrymple, R.A., 2004. *Coastal Process with Engineering Applications*. Cambridge University Press.

Farid, A., 2005. Studi Transpor Sedimen di Sepanjang Pantai Tlanakan Kabupaten Pamekasan, Tesis, Program Magister Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. 105 hal

Hewar, A.P., 1981. A Review of Wave-Dominated Clastic Shoreline Deposits. *Earth Science Review*, 17: 223-276.

Jackson, J.M., Allen, S.E. Carmack, C.E. & McLaughlin, F.A., 2010. Suspended Particles in the Canada Basin from Optical and Bottle Data, 2003-2008, *Ocean Science Journal*, 6: 799-813.

Komar, P.D., 1984. *Shoreline Changes and CERC Handbook*, Prentice-Hall Inc, New Jersey. 487p

Komar, P.D., 1998. *Beach Processes and Sedimentation*, Prentice-Hall Inc, New Jersey. 589p

Kuriyama, Y. & Hikari S., 2007. Cross-shore Variation of Predominant Longshore Sediment Transport Rate, *In: Jane McKee Smith (Editor). Proceeding of Coastal Sediment*. American Society of Coastal Engineer. California

Miller, H.C., 1999. Field measurements of longshore sediment transport during storms. *Coastal Engineering*, 36: 301-321.

Ongkongo O.S.R., & Suyarso, 1989, *Pasang Surut*. Jakarta: Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (LIPI), Pusat Pengembangan Oseanologi. 80 hal

Pratiwi, A., 2002, Pengaruh Kawasan Bakau Terhadap Laju Sedimentasi di Desa Tengket, Kecamatan Arosbaya, Kabupaten Bangkalan, Tesis, Program Magister Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. 86hal

- Priyono, K.D., 1996, Geomorfologi Pantai dan Pengelolaan Wilayah Pesisir. Fakultas Geografi. Universitas Muhammadiyah Surakarta. 73hal
- Siegle, E. & Nils E.A., 2007, Wave Refraction and Longshore Transport Pattern along The Southern Santa Catarina Coast, *Brazilian Journal of Oceanography*, 55 (2): 109-120.
- Siswanto, A.D., 2004, Kajian Laju Sedimentasi dan Perubahan Garis Pantai di Perairan Delta Bodri, Kabupaten Kendal, Skripsi, Fakultas Perikanan & Ilmu Kelautan, Universitas Diponegoro Semarang. 120hal
- Siswanto, A.D., 2009, Kajian Total Suspended Solid (TSS) di Perairan Pantai Kecamatan Kwanyar, Kabupaten Bangkalan, Prosiding Seminar Nasional Aplikasi dan Teknologi Kelautan (SENTA), Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.
- Siswanto, A.D., 2010, Analisa Stabilitas Garis Pantai di Kabupaten Bangkalan, Tesis, Program Magister Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. 115 hal.
- Siswanto, A.D., Pratikto, W.A. & Suntoyo, 2010, Analisa Stabilitas Garis Pantai di Kabupaten Bangkalan, Prosiding Seminar Nasional Pascasarjana IX, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.
- Soulsby, R.L. & Damgaard, J.S., 2005, Bedload Sediment Transport in Coastal Waters. *Coastal Engineering*, 52 : 673-689.
- Suntoyo, 1995, Kajian Pengamanan dan Perlindungan Pantai Candi Dasa Bali, Skripsi, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. 73hal.
- USACE, 2001. Shore Protection Manual. Books for Business, New York, 532pp.
- Zacharioudaki, A. & Dominic E.R., 2010, A Note on the Numerical Solution of the One-line Model, *Environmental Modelling & Software*, 25: 802-807.