

## KAPASITAS ASIMILASI BAHAN PENCEMAR DI MUARA SUNGAI BATANG ARAU (MUARA PADANG), SUMATERA BARAT

*Assimilative Capacity of Pollutant at Muara Padang West Sumatera*

WIKE AYU EKA PUTRI

### Abstract

Batang Arau River and Muara Padang has many activities of human being such as agriculture, resident, hospital and anchorage. At the end, this condition will disturb biota lifecycle and environment esthetics. In fact, government of Padang Town has planned Muara Padang as a center of tourism in Padang. The purpose of this research is to find assimilative capacity of Muara Padang to receive pollutant matter.

The pasut type of Muara Padang is semidiurnal tides and a analisis of mix process show that Muara Padang as partially mixed estuary. The condition of assimilative capacity in Muara Padang is still good. This condition can be described from the value some parameters (TSS, NO<sub>3</sub>, NH<sub>3</sub>, and PO<sub>4</sub>) that is still under loading capacity value of Muara Padang in receive pollutant load at tide time. It is because of dynamic hydrodynamic condition and quickly relative time of flushing (6,832 days or 53 times/year) until loading pollutant in estuary can be sent to ocean and mixed.

*Keywords : assimilative capacity, pollutant load*

### PENDAHULUAN

**Latar Belakang.** Setelah memasuki perairan, bahan pencemar mengalami berbagai proses seperti penguraian, pengenceran dan penyerapan. Proses-proses tersebut dipengaruhi oleh kondisi hidrodinamika seperti pencampuran (*mixing process*). Karena terjadi di estuaria, proses pasang surut air laut dan besarnya aliran sungai yang masuk memiliki peranan besar dalam proses pencampuran yang pada akhirnya dapat membantu mengencerkan bahan pencemar yang masuk ke dalam perairan. Faktor lain yang tak kalah penting adalah luasan dan volume estuaria, estuaria dengan luasan yang kecil dan pengaruh pasut yang kuat akan memiliki kemampuan pembilasan yang lebih cepat dibandingkan estuaria yang lebih luas dan pengaruh pasut kecil.

Rafni (2004) menyebutkan apabila beban pencemar yang masuk lebih besar dibandingkan kapasitas beban suatu perairan menunjukkan kapasitas asimilasi berada dalam kondisi telah terlampaui. Kapasitas beban atau *Loading Capacity* merupakan fungsi dari volume estuaria dan konsentrasi bahan pencemar, selain itu antara perairan satu dan lainnya memiliki kapasitas beban yang berbeda-beda. Jika pencemaran berlangsung secara kontiniu dan dalam waktu lama serta beban pencemar lebih besar dibandingkan dengan kapasitas beban muara sungai, dikhawatirkan dapat merusak ekosistem perairan. Karenanya diperlukan pengendalian terhadap pencemaran untuk menghindari kerusakan yang lebih besar terhadap lingkungan perairan sekitar. Salah satu cara yang dapat ditempuh adalah dengan mengetahui kapasitas asimilasi perairan. Kapasitas asimilasi dapat diartikan sebagai kemampuan suatu perairan dalam menerima beban pencemar tanpa menyebabkan penurunan kualitas air yang sesuai dengan peruntukannya, sehingga dapat diambil langkah-langkah atau kebijakan dalam upaya pemanfaatan kawasan tersebut pada masa yang akan datang.

Merujuk pada penelitian yang dilakukan Rafni (2004), kapasitas asimilasi diasumsikan sebagai fungsi dari kapasitas beban (KB) muara dalam menerima beban pencemar (BP) yang masuk. Jika nilai KB > BP, diduga

kapasitas asimilasi berada dalam kondisi belum terlampaui (*under capacity*). Sebaliknya, jika KB < BP menunjukkan kapasitas asimilasi dalam kondisi telah terlampaui (*over capacity*). Parameter yang digunakan dalam pengkajian kapasitas asimilasi adalah kualitas air dan kondisi hidrodinamika perairan seperti tipe pasut, volume muara dan debit sungai. Parameter kualitas sedimen dan biologi perairan (fitoplankton dan makrozoobentos) digunakan sebagai data pendukung. Kemudian dilakukan analisis lebih lanjut tentang kapasitas beban dan beban pencemar yang masuk ke perairan. Kapasitas beban dan beban pencemar dibandingkan sehingga diketahui apakah kapasitas asimilasi perairan telah terlampaui atau belum.

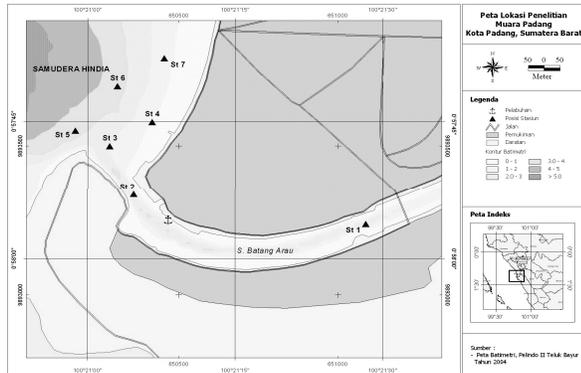
Muara Sungai Batang Arau (Muara Padang) adalah daerah pemukiman dengan jumlah penduduk tinggi yang sebagian besar memiliki mata pencarian sebagai nelayan dan pedagang. Pemanfaatan Sungai Batang Arau dan daerah Muara Padang cukup beragam diantaranya adalah pertanian, industri, perumahan penduduk, rumah sakit, pelabuhan kapal-kapal nelayan dan kapal penumpang serta sebagai daerah rekreasi terutama sejak dibangun Jembatan Siti Nurbaya. Karena fungsinya yang beragam, perairan Muara Padang mulai mengalami penurunan kualitas lingkungan yang tergambar dari warna perairan keruh cenderung coklat serta tingkat sedimentasi yang tinggi yaitu 3482 ton/hari (Bapedalda Kota Padang 2004). Kondisi ini akan mengakibatkan terganggunya ekosistem yang pada akhirnya mempengaruhi kehidupan organisme di dalamnya. Selain itu, alasan lain yang tak kalah penting adalah agenda Pemerintah Kota Padang yang akan menjadikan Muara Padang sebagai kawasan wisata marina yang berada di dalam kota meliputi Sungai Batang Arau, Muara Padang, Bangunan Tua, Jembatan Siti Nurbaya, Gunung Padang dan Pantai Air Manis serta Pelabuhan Teluk Bayur sehingga dipandang perlu menjaga kebersihan dan keindahannya.

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui kapasitas asimilasi perairan Muara Padang dalam menampung bahan pencemar yang masuk. Hasil penelitian diharapkan dapat melandasi kegiatan pengembangan dan pemanfaatan kawasan Muara Padang di masa datang baik oleh pemerintah maupun masyarakat setempat.

**METODE**

**Waktu dan Lokasi Penelitian.** Penelitian dilaksanakan pada bulan Maret - Mei 2005 di Muara Sungai Batang Arau (Muara Padang), Kota Padang. Pengambilan sampel dilakukan sebanyak tiga kali kemudian dianalisis di Laboratorium Kimia Fakultas MIPA Universitas Andalas.

**Stasiun Penelitian.** Pengambilan sampel dilakukan pada saat pasang dan surut di tujuh stasiun penelitian yang diharapkan dapat mewakili lokasi penelitian. Stasiun 1 terletak di sebelah dalam Sungai Batang Arau (di bawah Jembatan Siti Nurbaya). Stasiun 2 berada di mulut Sungai Batang Arau sedangkan Stasiun 3-7 terletak di sekitar muara yang berbatasan langsung dengan laut lepas. Posisi masing-masing stasiun ditentukan menggunakan GPS (*Global Positioning System*) ketika pengambilan sampel dilakukan (Gambar 1). Tipe estuaria dapat diketahui dengan melakukan analisis sebaran vertikal salinitas pada tiga lapisan kedalaman di lokasi penelitian (Duxbury and Duxbury 1993).



Gambar 1 Lokasi penelitian muara Sungai Batang Arau (Muara Padang) Sumatera Barat.

**Teknik Pengumpulan Data.** Data yang digunakan dalam penelitian ini terdiri atas data primer yaitu TSS, kecepatan arus, salinitas, NO<sub>3</sub>, NH<sub>3</sub> dan PO<sub>4</sub> serta data sekunder yang meliputi pasang surut dan bathimetri serta debit sungai yang diperoleh dari instansi pemerintahan setempat.

**1. Pengumpulan sampel air**

Sampel air diambil menggunakan *Van Dorn Water Sampler* pada tiga lapisan kedalaman (permukaan, tengah dan dasar) kemudian dikompositkan. Untuk analisis fosfat, amoniak, nitrat dan nitrit, sampel air diambil sebanyak 250 ml dan disimpan pada suhu 4 °C. Untuk analisis TSS, sampel air disimpan dalam botol plastik selanjutnya semua sampel disimpan dalam *cool box*.

**2. Pengukuran sebaran salinitas**

Pengukuran sebaran salinitas secara vertikal dilakukan pada semua stasiun penelitian. Sampel air diambil menggunakan *Van dorn water sampler* pada tiga lapisan kedalaman (permukaan, tengah dan dasar) dan dilihat salinitasnya dengan bantuan *hand refractometer*.

**3. Parameter hidrodinamika perairan**

Data pasang surut Muara Padang didapatkan melalui ramalan pasut daerah Teluk Bayur yang dikeluarkan oleh DISHIDROS TNI AL. Data kedalaman diperoleh dari peta bathimetri Muara Padang yang

dikeluarkan oleh PT. PELINDO II Teluk Bayur. Data pasang surut, kedalaman serta posisi lintang dan bujur diolah menggunakan program SURFER 7.0 sehingga didapatkan volume muara.

Debit sungai merupakan fungsi dari luas penampang sungai dan kecepatan arus yang melewati sungai. Data debit sungai sepuluh tahun terakhir didapatkan dari Dinas Pengelolaan Sumberdaya Air Provinsi Sumatera Barat.

**Analisis Data.** Analisis kapasitas asimilasi Perairan Muara Padang dilakukan merujuk pada penelitian Rafni (2004) yaitu melalui pendekatan terhadap kondisi faktor fisika dan kimia serta hidrodinamika perairan. Diharapkan pendekatan ini dapat memberikan gambaran tentang kondisi kualitas perairan Muara Padang dan kapasitas asimilasinya apakah masih baik (belum terlampaui) atau buruk (telah terlampaui).

**1. Penentuan tipe estuaria dan waktu pembilasan**

Proses percampuran yang terjadi di estuaria merupakan langkah awal yang harus diketahui jika ingin mengukur kapasitas asimilasi suatu perairan. Oleh karena itu, kita harus mengetahui tipe estuaria yang sedang diteliti berdasarkan sebaran salinitas dan proses percampuran yang terjadi di dalamnya (Duxbury and Duxbury 1993).

Pengkajian tentang kemampuan suatu perairan dalam menampung beban pencemar dipengaruhi oleh kondisi hidrodinamika perairan meliputi fenomena pasang surut dan masukan massa air tawar yang dapat menggambarkan proses percampuran di dalamnya. Jika proses percampuran di estuaria berjalan baik (termasuk waktu pembilasan), diduga kapasitas asimilasi juga berlangsung baik karena bahan pencemar yang masuk ke estuaria akan segera terbawa atau terangkut ke laut lepas kemudian terencerkan.

Perhitungan waktu pembilasan dilakukan berdasarkan *tidal exchange method* (Barg 1992, diacu dalam Rachmansyah 2004) dengan rumus :

$$T = \frac{1}{D} \dots\dots\dots (1)$$

$$D = \frac{(Vh - V1)}{(t \cdot Vh)} \dots\dots\dots (1a)$$

$$Vh = A \cdot \sum_{i=1}^n h_{ip} \dots\dots\dots (1b)$$

$$V1 = A \cdot \sum_{i=1}^n h_{il} \dots\dots\dots (1c)$$

Keterangan :

- T = Waktu pembilasan (hari)
- D = Laju pengenceran (per hari)
- Vh dan V1 = Volume muara saat pasang tertinggi dan surut terendah (m<sup>3</sup>)
- A = Luas muara (m<sup>2</sup>)
- h<sub>ip</sub> = Kedalaman muara pada saat pasang tertinggi (m)
- h<sub>il</sub> = Kedalaman muara pada saat surut terendah (m)
- t = Periode pasang surut harian (hari)
- Vh-V1 = Perubahan volume muara karena efek pasut (prisma pasut)

**2. Penentuan perkiraan beban pencemar dan kapasitas beban**

Seperti telah disinggung sebelumnya bahwa beban pencemar merupakan fungsi dari debit sungai yang masuk dan konsentrasi parameter yang diamati dengan persamaan sebagai berikut :

$$BP = Q \times Ci \dots\dots\dots (2)$$

Keterangan :

- BP = Beban pencemar (ton/hari)
- Q = Debit sungai (m3/s)
- Ci = Konsentrasi parameter ke i (mg/l)

Kapasitas beban (KB atau *Loading Capacity*) sebuah perairan merupakan suatu ukuran untuk melihat seberapa besar beban pencemar yang dapat diterima oleh suatu perairan. Nilai kapasitas beban ini diukur pada saat pasang ( $KB_{pasang}$ ) dan surut ( $KB_{surut}$ ) serta kapasitas beban berdasarkan standar baku mutu air laut untuk biota laut ( $KB_{Baku\ mutu}$ ) (Kepmen No.51/MENLH/2004).

Perhitungan nilai KB pada saat pasang dan surut berdasarkan rumus berikut (Rafni 2004) :

$$KB_p = V_p \times (C_{ip\ max}) \dots\dots\dots (3)$$

$$KB_s = V_s \times (C_{is\ max}) \dots\dots\dots (4)$$

$$KB_{BM} = V \times C_{i\ BM} \dots\dots\dots (5)$$

Keterangan :

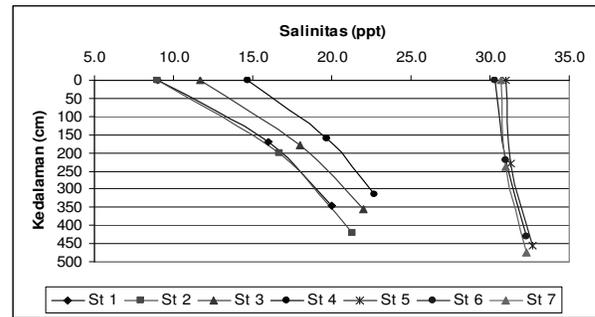
- KBp = Kapasitas beban saat pasang (ton)
- KBs = Kapasitas beban saat surut (ton)
- KB BM = Kapasitas beban berdasarkan standar baku mutu (Kepmen No. 51/MENLH/2004) yang diasumsikan sebagai faktor pembatas (ton).
- Vp = Volume muara saat pasang (m3)
- Vs = Volume muara saat surut (m3)
- Cis max = Konsentrasi maksimum parameter ke-i saat surut (mg/l)
- Cip max = Konsentrasi maksimum parameter ke-i saat pasang (mg/l)
- Ci BM = Konsentrasi parameter ke-i berdasarkan standar baku mutu air laut untuk biota laut (Kepmen No. 51/MENLH/2004).

Kriteria yang digunakan untuk melihat kondisi kapasitas asimilasi perairan apakah sudah terlampaui atau belum adalah dengan membandingkan nilai beban pencemar (BP) dari parameter tertentu dengan nilai kapasitas beban perairan tersebut ( $KB_p$ ,  $KB_s$ , dan  $KB_{BM}$ ), yaitu :

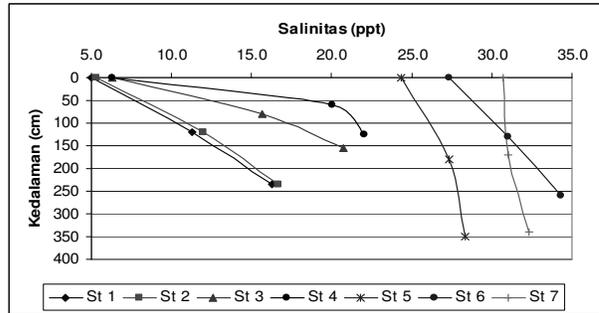
- Jika nilai KB ( $KB_p$ ,  $KB_s$  dan  $KB_{BM}$ ) > BP diduga kapasitas asimilasi belum terlampaui (*under capacity*).
- Jika nilai KB ( $KB_p$ ,  $KB_s$  dan  $KB_{BM}$ ) < BP diduga kapasitas asimilasi telah terlampaui (*over capacity*).

**HASIL**

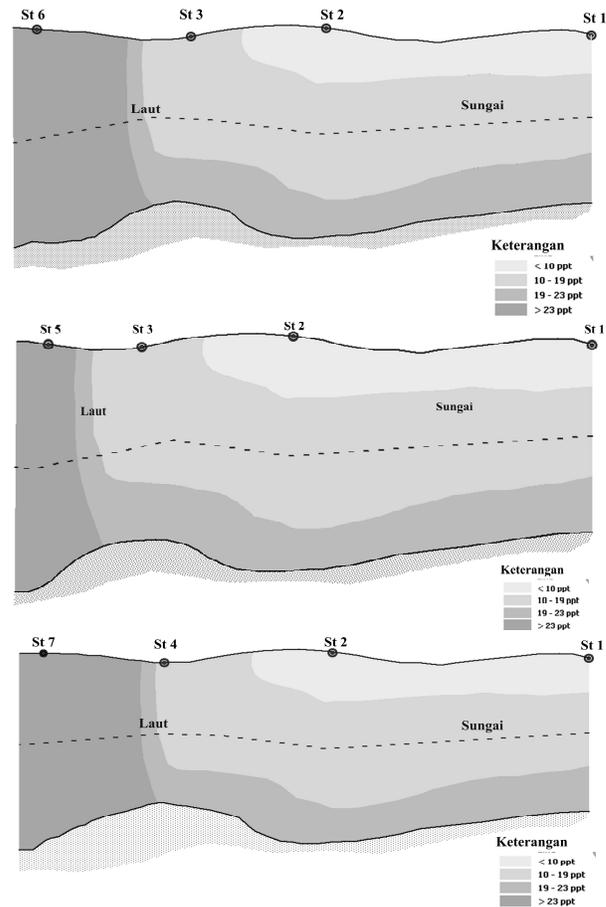
**Tipe Estuaria.** Salah satu pendekatan yang dapat dilakukan untuk mengetahui tipe estuaria adalah melalui analisis sebaran salinitas baik secara vertikal maupun horizontal. Hasil penelitian menunjukkan pola sebaran salinitas di lokasi penelitian seperti ditunjukkan Gambar 2, 3 dan 4.



Gambar 3 Sebaran salinitas pada tiga lapisan kedalaman saat surut

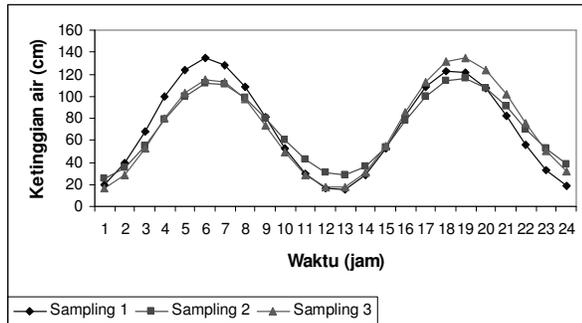


Gambar 2 Sebaran salinitas pada tiga lapisan kedalaman saat pasang



Gambar 4 Distribusi vertikal salinitas pada saat pasang.

**Kondisi Pasang Surut.** Data Dinas Hidrooseanografi TNI AL (DISHIDROS) menunjukkan tipe pasut di perairan Muara Padang adalah pasang ganda (*semi diurnal tides*) (Gambar 6) dimana terjadi dua kali pasang dan dua kali surut dalam satu hari.



Gambar 6 Kondisi pasang surut saat pengambilan sampel

**Waktu Pembilasan.** Data volume muara didapatkan dari hasil perhitungan menggunakan program SURFER 7.0 (Tabel 1).

Tabel 1 Beberapa parameter fisika Muara Padang

No	Parameter Fisika	Nilai
1	Volume muara saat pasang (m <sup>3</sup> )*	259.201,25
2	Volume muara saat surut (m <sup>3</sup> )*	183.330,36
3	Volume muara prisma pasut (m <sup>3</sup> )*	75.870,65
3	Dilution Rate (D) (per hari)	0.146
4	Flushing Time (T) (hari)	6.832
5	Debit Sungai Batang Arau** (m <sup>3</sup> /s)	0.00818

\* Hasil perhitungan menggunakan program SURFER

\*\* Sumber : Dinas Pengelolaan Sumberdaya Air Provinsi Sumatera Barat (data 10 tahun terakhir)

**Beban Pencemar dan Kapasitas Beban.** Untuk mengetahui seberapa besar pengaruh kegiatan-kegiatan tersebut terhadap penurunan kualitas air, perlu dilakukan analisa perkiraan beban pencemar yang masuk. Beban pencemar merupakan fungsi dari debit sungai (Q) dan konsentrasi parameter pencemar (C) sedangkan kapasitas beban (KB) muara merupakan kemampuan muara dalam menampung beban pencemar yang masuk ke dalamnya. Faktor-faktor yang terkait dengan kapasitas beban sebuah muara adalah ; (1) volume muara pada saat pasang (Vh) dan surut (VI); (2) debit sungai; (3) konsentrasi maksimum parameter tertentu pada saat pasang dan surut; (4) laju pengenceran (D), (5) waktu pembilasan (T) dan (6) konsentrasi baku mutu parameter tertentu berdasarkan Kepmen No 51/MENLH/ 2004. Berikut disajikan nilai beban pencemar beberapa parameter yang masuk ke Muara Padang.

Tabel 2 Nilai beban pencemar 4 parameter yang masuk ke Muara Padang melalui Sungai Batang Arau

Para meter	Nilai Rata-rata (mg/l) <sup>1</sup>		Beban Pencemar (ton/hari) <sup>2</sup>		
	Pasang	Surut	Pasang	Surut	Selisih
TSS	132.7	159	0.093	0.112	0.019
NH <sub>3</sub>	0.619	0.379	4.37 x10 <sup>-4</sup>	2.68 x10 <sup>-4</sup>	1.69 x10 <sup>-4</sup>
NO <sub>3</sub>	2.498	2.445	1.76 x10 <sup>-3</sup>	1.72 x10 <sup>-3</sup>	0.04 x10 <sup>-3</sup>
PO <sub>4</sub>	2.719	2.838	1.92 x10 <sup>-3</sup>	2.00 x10 <sup>-3</sup>	0.08 x10 <sup>-3</sup>

Keterangan :

1. Konsentrasi maksimal parameter yang terukur di lapangan
2. Data debit sungai 10 tahun terakhir yang diperoleh dari Dinas Pengelolaan Sumber Daya Air Provinsi Sumatera Barat (0,00818 m<sup>3</sup>/dt).

Kapasitas beban (KB) atau *Loading capacity* merupakan suatu ukuran untuk melihat seberapa besar beban pencemar yang dapat ditampung oleh suatu perairan estuaria. Hasil perhitungan terhadap kapasitas beban beberapa parameter disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3 Kapasitas beban Muara Padang dalam menampung bahan pencemar

Para meter <sup>1</sup>	Nilai Maksimum Parameter (mg/l) <sup>2</sup>		Kapasitas Beban (KB) <sup>3,4</sup> (ton)		KB <sup>5</sup> Baku Mutu (ton)	
	Pasang	Surut	KB <sub>p</sub>	KB <sub>s</sub>	Pasang	Surut
TSS	132,7	159	34.396	29.149	5.184	3.666
NH <sub>3</sub>	0,619	0,379	0,160	0,069	0,077	0,055
NO <sub>3</sub>	2,498	2,445	0,647	0,448	0,002	0,001
PO <sub>4</sub>	2,719	2,838	0,705	0,520	0,004	0,003

Keterangan :

1. Parameter yang diukur dan memiliki baku mutu sesuai Kepmen No.51/MENLH/2004
2. Nilai maksimum dari nilai rata-rata masing-masing parameter
3. Volume muara saat pasang : 259.201,25 m<sup>3</sup>
4. Volume muara saat surut : 183.330,36 m<sup>3</sup>
5. Berdasarkan Kepmen No. 51/MENLH/2004.

**Kapasitas Asimilasi Muara Padang.** Merujuk pada penelitian yang dilakukan Rafni (2004) yang membandingkan antara beban pencemar (BP) yang masuk dengan kapasitas beban muara (KB<sub>p</sub>, KB<sub>s</sub> dan KB<sub>BM</sub>) dalam menampung pencemar yang masuk maka didapatkan hasil seperti pada Tabel 4. Jika nilai KB (KB<sub>p</sub>, KB<sub>s</sub> dan KB<sub>BM</sub>) > BP diduga kapasitas asimilasi berada dalam kondisi belum terlampaui (*under capacity*). Sebaliknya, jika nilai KB (KB<sub>p</sub>, KB<sub>s</sub> dan KB<sub>BM</sub>) < BP diduga kapasitas asimilasi berada dalam kondisi telah terlampaui (*over capacity*).

Tabel 4 Kondisi kapasitas asimilasi beban pencemar di Muara Padang

Para meter	KB (ton)		KB <sub>BM</sub> (ton)		BP (ton/hari)		Kesimpulan*
	Pasang	Surut	Pasang	Surut	Pasang	Surut	
TSS	34.396	29.149	5.184	3.666	0.093	0.112	UC
NH <sub>3</sub>	0.160	0.069	0.077	0.055	4.37 x10 <sup>-4</sup>	2.68 x10 <sup>-4</sup>	UC
NO <sub>3</sub>	0.647	0.448	0.002	0.001	1.76 x10 <sup>-3</sup>	1.72 x10 <sup>-3</sup>	UC
PO <sub>4</sub>	0.705	0.520	0.004	0.003	1.92 x10 <sup>-3</sup>	2.00 x10 <sup>-3</sup>	UC

\*UC : Under capacity

## PEMBAHASAN

Sebelum dilakukan pembahasan lebih lanjut, penting diketahui terlebih dahulu tipe estuaria daerah penelitian. Salah satu pendekatan yang dapat dilakukan adalah melalui analisis sebaran salinitas baik secara vertikal maupun horizontal (Gambar 2, 3 dan 4). Saat pasang, salinitas rata-rata Stasiun 1 dan 2 yang terletak di dalam Sungai Batang Arau berkisar 9,0 (permukaan), 16-16,70 ppt (kedalaman pertengahan) dan 20-21,30 ppt (kedalaman dasar) (Gambar 2). Tingginya salinitas kedua stasiun ini pada semua lapisan kedalaman terjadi karena adanya massa air laut yang masuk ke dalam sungai saat terjadi pasang. Peningkatan salinitas dari lapisan permukaan menuju dasar perairan disebabkan air laut masuk ke estuaria melalui lapisan dasar sedangkan air tawar mengalir di lapisan permukaan (Gambar 4 dan 5).

Proses pembilasan yang terjadi di estuaria erat kaitannya dengan pencampuran massa air laut dengan massa air tawar yang disebabkan oleh adanya pasang surut. Estuaria yang memiliki pengaruh pasang lebih kuat akan mampu membilas bahan pencemar dan

mempengaruhi proses penyebarannya. Estuaria dengan waktu pembilasan berlangsung cepat akan memiliki kemampuan lebih cepat membersihkan diri dari bahan pencemar yang memasukinya. Sebaliknya, estuaria dengan waktu pembilasan lebih lambat, akan lebih lama mengencerkan pencemar yang masuk ke dalamnya. Sutherland *et al.* (2000); Tomczak (2000) menyebutkan ada hubungan antara waktu pembilasan dengan tingkat kapasitas asimilasi suatu perairan, semakin cepat waktu pembilasan terjadi maka semakin tinggi kapasitas asimilasi perairan tersebut. Ini terkait dengan proses pembilasan yang akan membawa bahan pencemar menuju laut terbuka untuk kemudian terencerkan (Sutherland *et al.* 2000).

Stasiun yang terletak di sekitar mulut sungai (Stasiun 3 dan 4) memiliki kisaran salinitas 11,67-14,70 ppt. Hal ini disebabkan pengaruh massa air tawar yang berasal dari Sungai Batang Arau masih cukup kuat sehingga salinitas menjadi rendah mendekati salinitas air tawar. Terdapat kemungkinan air tawar dari Sungai Batang Arau lebih leluasa masuk ke muara tanpa adanya hambatan karena peristiwa pasang. Pada kedalaman di bawahnya (pertengahan), salinitas cenderung lebih tinggi dibandingkan lapisan permukaan dengan kisaran rata-rata 16,0-19,7 ppt, demikian juga dengan lapisan dasar (20-

22,7 ppt). Selanjutnya pada Stasiun 5, 6 dan 7, salinitas berada pada kisaran salinitas air laut di semua lapisan kedalaman (30,3-32,7 ppt). Ini terjadi karena ketiga stasiun terletak lebih jauh dari muara Sungai Batang Arau sehingga ada kemungkinan pengaruh air tawar dari Sungai Batang Arau sudah tidak ada dan salinitasnya lebih dipengaruhi oleh salinitas air laut.

Saat surut, salinitas permukaan di Stasiun 1, 2, 3 dan 4 lebih rendah dibandingkan saat pasang dengan kisaran rata-rata 5,0-6,3 ppt. Ini terjadi karena tidak ada air laut yang masuk melalui peristiwa pasang surut sehingga salinitas di dalam sungai dan sekitar muara lebih dipengaruhi oleh air tawar. Pickard (1963) menyebutkan aliran sungai ke estuaria dapat mengurangi salinitas pada lapisan permukaan dan bahkan pada lapisan yang lebih dalam jika terjadi *mixing*. Pada kedalaman dibawahnya (lapisan tengah), terjadi peningkatan salinitas dengan kisaran rata-rata 11,3-20,0 ppt. Kondisi yang sama juga dijumpai pada kedalaman dasar, salinitas rata-rata berkisar 16,3-22,0 ppt. Sama halnya dengan saat pasang, salinitas rata-rata Stasiun 5, 6 dan 7 lebih dipengaruhi oleh air laut karena terletak jauh dari mulut sungai sehingga pengaruh air tawar dari Sungai Batang Arau sangat kecil (Gambar 3).

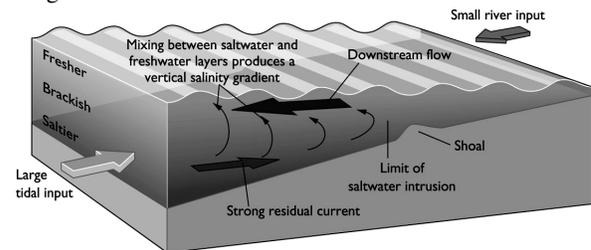
Secara keseluruhan terlihat salinitas lebih tinggi saat pasang dibandingkan surut. Rendahnya salinitas saat surut menunjukkan pengaruh aliran Sungai Batang Arau terhadap perubahan salinitas di daerah muara (Stasiun 3 dan 4) cukup besar. Demikian juga dengan pengaruh pasang yang membawa massa air laut menuju sungai sehingga terjadi peningkatan salinitas pada stasiun yang terdapat di dalam Sungai Batang Arau (Stasiun 1 dan 2).

Estuaria merupakan badan air yang kompleks dan aktivitasnya dipengaruhi oleh pergerakan air tawar dan air laut. Pergerakan kedua massa air yang berbeda ini mempengaruhi konsentrasi dan pola penyebaran salinitas yang pada akhirnya menentukan tipe estuaria. Estuaria dengan salinitas tinggi menandakan adanya pengaruh air laut yang kuat sehingga massa air laut mendominasi

estuaria sedangkan estuaria yang memiliki salinitas rendah mengindikasikan pengaruh air tawar lebih dominan.

Gambar 2 dan 3 juga memperlihatkan adanya stratifikasi salinitas secara vertikal pada tiga lapisan kedalaman di perairan Muara Padang baik saat pasang maupun surut. Kisaran salinitas pada lapisan permukaan cenderung lebih rendah dibandingkan lapisan tengah dan salinitas lapisan tengah juga lebih rendah dibandingkan lapisan dasar. Selain secara vertikal, stratifikasi salinitas juga terjadi secara horizontal, stasiun yang terletak lebih jauh dari muara sungai memiliki salinitas lebih tinggi dibandingkan dengan stasiun yang terdapat di sekitar muara dan di dalam sungai (Gambar 4). Pola penyebaran salinitas seperti ini menunjukkan Muara Padang tergolong estuaria tercampur sebagian (*Partially Mixed Estuary*), air sungai menuju laut mengalir pada lapisan permukaan sedangkan air laut yang masuk ke sungai mengalir pada lapisan dasar. Ciri lainnya adalah terjadi peningkatan salinitas dari bagian hulu estuaria (*mouth*) menuju bagian hilir (*head*) pada semua lapisan kedalaman dan biasanya terdapat di perairan yang relatif dangkal (Pickard 1963). Selain adanya variasi salinitas secara vertikal dan horizontal, karakteristik lain estuaria tercampur sebagian adalah stratifikasi densitas yang sedang, air laut digerakkan menuju sungai dengan arus dari laut yang cukup kuat, terjadi pertukaran yang baik antara air tawar dan air laut, umumnya terdapat di estuaria yang memiliki arus pasut dan aliran sungai yang kuat (Duxbury and Duxbury 1993) (Gambar 4 dan 5).

Pritchard (1972, diacu dalam Triatmodjo 1999) mengemukakan tingkat percampuran tergantung pada energi yang ditimbulkan oleh pasang dan surut. Percampuran yang baik antara air laut dan air tawar terjadi jika kekuatan pasang lebih besar dibandingkan debit sungai.



Gambar 5 Estuaria tercampur sebagian (Pinet 2000)

Sumber utama energi dalam proses percampuran pada estuaria tipe tercampur sebagian adalah turbulensi yang dihasilkan oleh gerakan pasang surut saat terjadi pasang. Proses percampuran seperti ini menghasilkan jumlah volume air tawar yang lebih besar pada daerah permukaan (*upper layer*) (Committee on Oceanography and Engineering 1970). Ditambahkan oleh Mann and Lazier (1996) bahwa kekuatan utama yang menyebabkan sirkulasi massa air di estuaria adalah adanya perbedaan densitas antara air tawar dan air laut.

**Kondisi Pasang Surut.** Proses pasang surut mempengaruhi keberadaan bahan pencemar dalam suatu perairan karena gerakan air pada waktu pasang dan surut dapat mengangkut bahan pencemar yang terdapat dalam suatu muara atau teluk menuju laut. Tipe pasut di perairan Muara Padang adalah pasang ganda (*semi diurnal tides*) (Gambar 6), terjadi dua kali pasang dan dua kali surut

dalam satu hari (Dinas Hidrooseanografi (DISHIDROS) TNI AL). Pengambilan sampel dilakukan saat pasang tertinggi ( $\pm$  pukul 6.30-9.30 WIB) dan surut terendah ( $\pm$  pukul 11.00-15.00 WIB).

Hasil penelitian Razak (2002) di dekat lokasi penelitian menyebutkan tinggi air rata-rata saat pasang pada waktu bulan penuh dan bulan baru (*mean spring tides*) adalah 3,9 *feet* (1,18 m) sedangkan tinggi air rata-rata saat pasang pada waktu  $\frac{1}{4}$  sampai  $\frac{3}{4}$  bulan (*mean neap tides*) adalah 3,0 *feet* (0,914 m). Tinggi air rata-rata saat surut pada waktu bulan penuh dan bulan baru adalah 0,7 *feet* (0,487 m). Selisih tinggi permukaan air antara pasang tertinggi dan surut terendah (*mean tides range*) kira-kira 1,10 m.

**Kecepatan Arus.** Kecepatan arus mempengaruhi sebaran bahan pencemar secara langsung, arus yang kuat lebih cepat mengangkut bahan pencemar menuju laut lepas sehingga lebih cepat diencerkan. Kedua adalah kemampuan arus dalam penyebaran salinitas kaitannya dengan proses pencampuran yang berpengaruh terhadap pembilasan (*flushing*). Proses pembilasan berkaitan dengan kapasitas asimilasi (Sutherland *et al.* 2000).

Hasil pengamatan menunjukkan kecepatan arus saat pasang lebih tinggi dibandingkan surut. Kecepatan arus rata-rata saat pasang berkisar 0,18-0,35 m/dt dengan arah bervariasi di setiap stasiun. Pada umumnya arah arus saat pasang adalah Barat-Timur kecuali pada Stasiun 1 dengan arah arus Timur-Barat. Kecepatan arus tertinggi terjadi di Stasiun 1 (0,35 m/dt) dan terendah di Stasiun 7 (0,18 m/dt). Saat surut, kecepatan arus rata-rata berkisar 0,12-0,32 m/dt dengan arah Tenggara-Barat Laut kecuali pada Stasiun 1 dengan arah arus Barat-Timur. Kecepatan arus tertinggi terjadi pada Stasiun 1 (0,32 m/dt) dan terendah di Stasiun 7 (0,12 m/dt).

**Waktu Pembilasan.** *Flusing time* atau waktu pembilasan adalah waktu yang dibutuhkan oleh sebuah estuaria untuk memindahkan massa air di dalamnya dan menggantinya dengan massa air laut (Dyer 1973; Duxbury and Duxbury 1993). Proses pembilasan erat kaitannya dengan pasang dan surut perairan karena massa air laut yang masuk ke dalam estuaria pada saat pasang akan membawa massa air yang ada di dalam estuaria keluar menuju laut.

Hasil perhitungan menggunakan program SURFER 7.0 disajikan pada Tabel 1. Volume muara pada saat pasang (Vh) adalah sebesar 259.201,25 m<sup>3</sup> dan saat surut (Vl) 183.330,36 m<sup>3</sup>. Peristiwa pasang surut mengakibatkan terjadinya perbedaan tinggi air di estuaria sehingga volume air dan luas muara juga berubah. Perbedaan volume air dan luas penampang muara akibat peristiwa pasang dan surut menandakan terjadinya pertukaran massa air. Perbedaan volume muara antara saat pasang dan surut akibat efek pasut adalah volume<sub>prisma pasut</sub>. Dari hasil perhitungan didapatkan volume<sub>prisma pasut</sub> sebesar 75.870,65 m<sup>3</sup> yang berarti terjadi pengurangan volume muara sebesar 75.870,65 m<sup>3</sup>. Jumlah volume air tersebut keluar atau tercuci dari muara dan digantikan dengan massa air yang baru.

Jika dicocokkan dengan laju pengenceran (0,146 perhari) dan jika volume muara pada saat pasang sebesar 259.201,25 m<sup>3</sup>, maka didapatkan volume air yang terbawa ke luar estuaria dalam satu hari adalah sebesar 37.843,38 m<sup>3</sup> (259.201,25 m<sup>3</sup> x 0,146) atau setengah dari volume<sub>prisma pasut</sub>. Jika dikaitkan dengan *flushing time* yang terjadi di

perairan Muara Padang yaitu selama 6,832 hari, maka setelah 6,832 hari massa air di muara pada saat pasang (259.201,25 m<sup>3</sup>) akan terangkut semuanya ke luar muara dan digantikan dengan massa air yang baru (6,832 hari x 37.843,38 m<sup>3</sup> ~ 259.201,25 m<sup>3</sup>).

Waktu pembilasan yang didapatkan dari hasil perhitungan di perairan Muara Padang adalah 6,832 hari yang berarti proses pembilasan bahan pencemar yang terdapat di daerah tersebut berlangsung selama 6,832 hari atau kurang lebih 53 kali/tahun. Angka ini lebih cepat dibandingkan waktu pembilasan yang diperoleh Rafni (2004) di Teluk Jobokuto Jepara yaitu 8,80 hari. Adapun Ali (2003) mendapatkan waktu pembilasan di Teluk Pundah selama 6,54 hari dan 9,90 hari di Teluk Pedada (Perairan Padang Cermin Lampung Selatan). Demikian juga dengan Rachmansyah (2004) yang mendapatkan waktu pembilasan di Teluk Awarange Sulawesi Selatan selama 15 hari.

**Beban Pencemar dan Kapasitas Beban.** Sungai Batang Arau mengalir melalui tiga kecamatan yaitu Kecamatan Lubuk Kilangan, Kecamatan Lubuk Begalung dan Kecamatan Padang Selatan. Karena terletak di daerah pemukiman padat penduduk, maka kualitas air Sungai Batang Arau terus mengalami penurunan. Selain limbah domestik, tekanan ekologis juga berasal dari beberapa kegiatan yang memberikan kontribusi pencemaran yang terjadi di Sungai Batang Arau diantaranya adalah PT. Semen Padang, PT. Sumatex Subur, PT. Batanghari Barisan, PT. Famili Raya, PT. Teluk Luas, PT. Kilang Lima Gunung, Rumah Sakit M. Jamil, Rumah Sakit Reksodiwirjo, Pasar Raya, pemukiman penduduk dan perbengkelan (Bapedalda, 2000 diacu dalam Bahar, 2002)

Hampir semua anak sungai yang bermuara ke Batang Arau menunjukkan kondisi air yang tercemar terutama untuk parameter TSS. Salah satu sub DAS yang mempengaruhi kualitas Sungai Batang Arau adalah Sungai Batang Jirek (Bapedalda Kota Padang 2004). Berbagai aktivitas diduga memberikan kontribusi terhadap penurunan kualitas air yang terjadi di sekitar Muara Padang. Parameter-parameter yang terkait dengan hal ini diantaranya adalah TSS, NH<sub>3</sub>, NO<sub>3</sub> dan PO<sub>4</sub>.

Untuk mengetahui seberapa besar pengaruh kegiatan-kegiatan tersebut terhadap penurunan kualitas air, perlu dilakukan analisa perkiraan beban pencemar yang masuk. Beban pencemar merupakan fungsi dari debit sungai (Q) dan konsentrasi parameter pencemar (C) sedangkan kapasitas beban (KB) muara merupakan kemampuan muara dalam menampung beban pencemar yang masuk ke dalamnya. Faktor-faktor yang terkait dengan kapasitas beban sebuah muara adalah ; (1) volume muara pada saat pasang (Vh) dan surut (Vl); (2) debit sungai; (3) konsentrasi maksimum parameter tertentu pada saat pasang dan surut; (4) laju pengenceran (D), (5) waktu pembilasan (T) dan (6) konsentrasi baku mutu parameter tertentu berdasarkan Kepmen No 51/MENLH/ 2004.

Hasil perhitungan (Tabel 2) menunjukkan bahwa bahan pencemar yang memberikan kontribusi pencemaran tertinggi adalah TSS sebesar 0,112 ton/hari pada saat surut dan 0,093 ton/hari pada saat pasang. Angka ini lebih kecil dibandingkan data yang dilaporkan oleh Bapedalda Sumatera Barat dimana besarnya sedimentasi akibat bahan-bahan tersuspensi di Muara Batang Arau adalah sekitar 3482 ton/hari. Besarnya sumbangan TSS dapat

menimbulkan sedimentasi di daerah muara yang pada akhirnya menyebabkan daerah muara cepat mengalami pendangkalan. Jika dibandingkan muara sungai lainnya, Muara Padang merupakan muara sungai dengan tingkat sedimentasi terbesar di Kota Padang (Bapedalda Kota Padang 2004).

Setelah TSS, nitrat memberikan kontribusi beban pencemar tertinggi ke dua yaitu sebesar  $1,76 \times 10^{-3}$  ton/hari saat pasang dan  $1,72 \times 10^{-3}$  ton/hari saat surut. Untuk fosfat, sumbangan pencemar yang diberikan adalah sebesar  $1,92 \times 10^{-3}$  ton/hari saat pasang dan  $2 \times 10^{-3}$  ton/hari saat surut. Adapun amonia merupakan parameter yang memberikan masukan pencemar paling kecil yaitu sebesar  $4,37 \times 10^{-4}$  ton/hari pada saat pasang dan  $2,68 \times 10^{-4}$  ton/hari saat surut.

Masukan beban pencemar TSS dan fosfat lebih tinggi saat surut dibandingkan pasang. Ini dimungkinkan akibat peristiwa pasang dan surut yang membawa massa air di estuaria keluar menuju laut ketika terjadi pasang sehingga bahan pencemar terbilas dan terencerkan. Keadaan yang berlawanan dijumpai untuk parameter nitrat dan amonia, dimana beban masukannya lebih tinggi saat pasang dibandingkan surut. Sebagaimana dijelaskan sebelumnya, ada banyak faktor yang mempengaruhi keberadaan bahan pencemar seperti pencampuran, penyebaran, konsentrasi bahan pencemar dan laju penguraian.

Kapasitas beban (KB) atau *Loading capacity* merupakan suatu ukuran untuk melihat seberapa besar beban pencemar yang dapat ditampung oleh suatu perairan estuaria. Dari hasil perhitungan didapatkan kapasitas beban muara dalam menampung TSS adalah sebesar 34,396 ton saat pasang 29,149 ton saat surut. Penurunan kapasitas beban saat surut diduga karena volume air yang terdapat di muara lebih kecil dibandingkan volume muara saat pasang meskipun beban pencemar yang masuk lebih tinggi pada saat surut dibandingkan pasang (Tabel 3).

Tabel 2 menunjukkan beban pencemar TSS yang masuk ke Muara Padang saat pasang adalah sekitar 0,093 ton/hari dan 0,112 ton/hari saat surut. Angka tersebut belum melampaui kapasitas beban muara dalam menerima beban pencemar yaitu sebesar 34,396 ton pada saat pasang dan 29,149 ton saat surut. Nilai ini juga berada dibawah nilai kapasitas beban baku mutu (5,184 ton saat pasang dan 3,666 ton saat surut) (Tabel 3).

Sama halnya dengan TSS, beban pencemar bersumber dari nitrat ( $1,76 \times 10^{-3}$  ton/hari saat pasang dan  $1,72 \times 10^{-3}$  ton/hari saat surut) juga masih berada di bawah kapasitas beban muara (0,647 ton saat pasang dan 0,448 ton saat surut) dan kapasitas beban baku mutu (0,002 ton saat pasang dan 0,001 ton saat surut). Demikian juga untuk fosfat dan amonia yang masing-masingnya memberikan kontribusi beban pencemar berturut-turut adalah sebesar  $1,92 \times 10^{-3}$  ton/hari saat pasang dan  $2 \times 10^{-3}$  ton/hari saat surut (fosfat) serta  $4,37 \times 10^{-4}$  ton/hari saat pasang dan sebesar 2,68 ton/hari saat surut (amonia). Angka-angka di atas masih belum melampaui kapasitas muara dalam menampung bahan pencemar yaitu untuk fosfat sebesar 0,705 ton saat pasang dan 0,520 ton saat surut dan kapasitas beban berdasarkan baku mutu (0,004 ton saat pasang dan 0,003 ton saat surut). Untuk amonia, kapasitas beban muara saat pasang adalah 0,160 ton dan 0,069 ton saat surut, sedangkan kapasitas beban baku mutu adalah

0,077 ton saat pasang dan 0,055 ton saat surut (Tabel 3). Tabel 11 dan 12 memperlihatkan bahwa beban pencemar (TSS,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{NO}_3$  dan  $\text{PO}_4$ ) yang masuk ke Muara Padang belum melebihi kapasitas beban muara dalam menampung bahan pencemar baik saat pasang maupun surut.

**Kapasitas Asimilasi Muara Padang.** Kapasitas asimilasi didefinisikan sebagai kemampuan badan air dalam menerima bahan pencemar tanpa menyebabkan terjadinya penurunan kualitas air yang ditetapkan sesuai dengan peruntukannya. Demikian juga halnya dengan perairan Muara Padang, merupakan muara Sungai Batang Arau yang diketahui memiliki DAS cukup padat baik oleh aktivitas rumah tangga maupun kegiatan industri lainnya. Karena menerima masukan dari aktivitas sekitarnya, menyebabkan perairan ini mengalami penurunan kualitas lingkungan dari waktu ke waktu.

Semua perairan memiliki kemampuan dalam menampung beban limbah yang memasukinya. Meskipun demikian, kemampuan tersebut juga memiliki batasan dan ini erat kaitannya dengan kemampuan perairan dalam membersihkan diri dari bahan pencemar yang masuk atau purifikasi. Ada banyak faktor yang mempengaruhi kemampuan perairan dalam menampung limbah, diantaranya adalah proses-proses hidrodinamika yang terjadi, konsentrasi bahan pencemar yang masuk serta proses-proses perombakan bahan pencemar di perairan.

Proses hidrodinamika memegang peranan penting terhadap nasib dan keberadaan bahan pencemar dalam suatu perairan. Diantaranya adalah proses pasang surut, pencampuran (*mixing*) dan pengadukan (*turbulence*). Berdasarkan analisa sebaran vertikal salinitas, Muara Padang dikategorikan estuaria tercampur sebagian dengan tipe pasut semi diurnal cenderung ganda. Dari hasil perhitungan, didapatkan laju pengenceran (D) 0,146 per hari dan waktu pembilasan (T) 6,832 hari. Laju pengenceran dan waktu pembilasan merupakan parameter penting dalam mengkaji kapasitas asimilasi suatu perairan.

Secara keseluruhan terlihat bahwa kapasitas asimilasi bahan pencemar di Perairan Muara Padang untuk parameter TSS,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{NO}_2$ , dan  $\text{PO}_4$  berada dalam kondisi belum terlampaui (Tabel 4). Hal ini dapat diartikan bahwa beban pencemar yang masuk belum melebihi kemampuan lingkungan dalam hal ini adalah perairan Muara Padang dalam menampungnya. Ini semua terkait dengan banyak faktor seperti kekuatan pasang surut yang mempengaruhi keberadaan bahan pencemar di suatu perairan serta konsentrasi bahan pencemar itu sendiri. Seperti sudah dijelaskan sebelumnya, Muara Padang tergolong estuaria tercampur sebagian dengan ciri-ciri antara lain adalah terjadi pertukaran yang baik antara antara air tawar dan air laut dimana arus pasut yang dimiliki kuat dan aliran sungai juga relatif baik. Terdapat kemungkinan bahwa walaupun konsentrasi beberapa parameter tertentu yang masuk ke muara sudah melewati ambang batas yang ditetapkan, namun karena terjadi pertukaran yang baik antara massa air air tawar dan air laut pada saat pasang dan surut serta *flushing time* yang berlangsung cepat (6,832 hari) menyebabkan bahan pencemar yang ada di dalam muara segera terbawa ke laut dan terbilas.

Waktu pembilasan (*flushing time*) di perairan Muara Padang adalah 6,832 hari yang berarti proses pembilasan bahan pencemar berlangsung cepat yaitu selama 6,832 hari atau kurang lebih 53 kali dalam setahun. Sutherland *et al.*

(2000) menemukan *flushing time* di Estuaria Rhine berkisar 3-6 hari dan tipe estuariannya adalah estuaria tercampur sebagian. Ditambahkan bahwa ada beberapa faktor yang mempengaruhi waktu pembilasan sebuah perairan diantaranya adalah musim, geomorfologi estuari dan tipe estuaria (Sutherland *et al.* 2000; Ensign *et al.* 2004).

Kesimpulan yang dapat diambil dari penjelasan di atas adalah penurunan kualitas air di sekitar Sungai Batang Arau belum menimbulkan tekanan ekologis yang dapat mengganggu kestabilan ekosistem. Ini juga didukung oleh kondisi kapasitas asimilasi perairan yang berada dalam kondisi *under capacity*. Walaupun konsentrasi beberapa beban pencemar yang masuk sudah melebihi baku mutu, akan tetapi karena didukung oleh hidrodinamika perairan yang baik seperti *flushing time* yang tergolong singkat (6,832 hari) dan kekuatan pasut sehingga bahan pencemar yang masuk tidak menumpuk di muara melainkan segera terbilas.

#### DAFTAR PUSTAKA

- Ali A. 2003. Penentuan lokasi dan estimasi daya dukung lingkungan untuk budidaya ikan kerapu sistem keramba jaring apung di perairan Padang Cermin Lampung Selatan. [tesis]. Bogor : Program Pascasarjana, IPB.
- Bahar I. 2002. Kualitas air ditinjau dari komunitas makrozoobentos di daerah hulu dan muara aliran Sungai Batang Arau dan Batang Kuranji. [tesis]. Padang : Program Pascasarjana, Universitas Andalas.
- [Bapedalda] Badan Pengendalian Dampak Lingkungan Daerah Kota Padang. 2004. *Laporan Analisa Data Penelitian dan Pengujian Kualitas Air Permukaan (Sungai) di Kota Padang*. Padang.
- Committe on Oceanography and Ocean Engineering. 1970. Waste management concept for the coastal zone. National Academy of Science and National Engeneering. Washington DC.
- Duxbury AB, AC Duxbury. 1993. *Fundamental of Oceanography*. Dubuque Iowa: Wm.C Brown Publishers.
- Dyer KR. 1973. *Estuaries : A Physical Introduction*. London: John Willey&Sons.
- Ensign SH, Joanne NH, Michael HM. 2004. Application of digital bathymetry data in an analysis of flushing times of two large estuaries. [www.elsevier.com/locate/cageo](http://www.elsevier.com/locate/cageo)
- Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup Nomor 115 Tahun 2003. *Tentang Penentuan Status Mutu Air Menggunakan Metode STORET*. Jakarta.
- Mann KH, JRN Lazier. 1996. *Dynamics Marine Ecosystems. Biological-Physical Interaction in the Oceans*. Second Edition. Nova Scotia: Blackwell Science Inc.
- Pickard GL. 1963. *Descriptive Physical Oceanography*. New York: Pergamon Press.
- Pinet PR. 2000. *Invitation to Oceanography*. Second Edition. Massachussetts: Jones and Bartlett Publisher.
- Rachmansyah. 2004. Analisis daya dukung lingkungan perairan Teluk Awarange Kabupaten Barru Sulawesi Selatan bagi pengembangan budidaya bandeng dalam keramba jaring apung. [disertasi]. Bogor : Sekolah Pascasarjana, Institut Pertanian Bogor.
- Rafni R. 2004. Kapasitas asimilasi beban pencemar di perairan Teluk Jobokuto Kabupaten Jepara Jawa Tengah. [tesis]. Bogor : Sekolah Pascsarjana, Institut Pertanian Bogor.
- Razak A. 2002. Dinamika karakteristik fisika-kimiawi sedimen dan hubungannya dengan struktur komunitas moluska bentik (Bivalvia dan Gastropoda) di Muara Bandar Bakali Padang. [tesis]. Bogor : Program Pascasarjana, Institut Pertanian Bogor.
- Sutherland D *et al.* 2000. Flushing as a disposal of sewage into estuaries. [www.soc.soton.ac.uk/soes/teching/courses/oa217/groupm03.pdf](http://www.soc.soton.ac.uk/soes/teching/courses/oa217/groupm03.pdf).
- Triatmodjo B. 1999. *Teknik Pantai*. Yogyakarta: Beta Offset.
- Tomczak. 2000. The flushing time. [www.dlwc.nsw.gov.au](http://www.dlwc.nsw.gov.au)