

**Studi Dinamika Ekosistem Perairan Di Teluk Lampung:
Pemodelan Gabungan Hidrodinamika-Ekosistem**

(A Study on the dynamic of Aquatic Ecosystem in Lampung Bay:
A Coupled Hydrodynamic-Ecosystem Modeling)

Alan Frendy Koropitan, Safwan Hadi, Ivonne M. Radjawane dan Ario Damar

Alamat Penyunting dan Tata Usaha: Departemen Manajemen Sumberdaya Perairan, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Institut Pertanian Bogor - Jl. Lingkar Akademik, Kampus IPB Darmaga, Bogor 16680, Wing C, Lantai 4 - Telepon (0251) 622912, Fax. (0251) 622932. *E-mail* : jippi@centrin.net.id

Berdasarkan Keputusan Direktur Jenderal Pendidikan Tinggi, Departemen Pendidikan Nasional No. 22/DIKTI/Kep /2002 tanggal 8 Mei 2002 tentang *Hasil Akreditasi Jurnal Ilmiah Direktorat Jenderal Pendidikan Tinggi Tahun 2002*, Jurnal Ilmu-ilmu Perairan dan Perikanan Indonesia (JIPPI) diakui sebagai **jurnal nasional terakreditasi**.

STUDI DINAMIKA EKOSISTEM PERAIRAN DI TELUK LAMPUNG: PEMODELAN GABUNGAN HIDRODINAMIKA-EKOSISTEM

(A Study on the dynamic of Aquatic Ecosystem in Lampung Bay:
A Coupled Hydrodynamic-Ecosystem Modeling)

Alan Frendy Koropitan¹, Safwan Hadi², Ivonne M. Radjawane² dan Ario Damar³

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji dinamika ekosistem perairan di Teluk Lampung dengan menggunakan gabungan model hidrodinamika-ekosistem dengan pendekatan numerik. Secara umum, hasil simulasi pola arus residu M2 cenderung masuk dari mulut teluk sebelah barat, sebagian terus memasuki sampai kepala teluk dan sebagian keluar kembali dari mulut teluk bagian timur. Selain itu, terlihat pula adanya suatu eddy yang mengalir berlawanan arah jarum jam di sekitar kepala teluk. Pola penyebaran masing-masing kompartimen ekosistem hasil model memiliki kesamaan dengan hasil pengamatan di lapangan, serta konsisten dengan pola arus residu M2. Pengaruh suplai dari sungai, interaksi antara proses biologis seperti produktifitas primer, sekunder (pemangsaan), kematian alami plankton, serta proses dekomposisi oleh bakteri belum begitu berperan dalam neraca dan *standing stock* ekosistem di Teluk Lampung. Peranan suplai dari laut lebih dominan dibanding dengan proses-proses biokimiawi yang berinteraksi di dalam teluk. Hasil perhitungan tingkat efisiensi aliran energi dari proses dekomposisi dan produksi urine zooplankton ke produktifitas primer mengalami kehilangan sebesar 30.48 %, sementara dari produktifitas primer ke produktifitas sekunder (pemangsaan) mengalami penambahan 17.24 %.

Kata kunci: dinamika ekosistem, Teluk Lampung, gabungan model hidrodinamika-ekosistem, arus residu M2.

ABSTRACT

The aim of this research was to study in the dynamic of aquatic ecosystem in Lampung Bay by using a coupled hydrodynamic-ecosystem model with numerical approach. Generally, the simulated flow pattern of M2 residual current tends to flow into the western mouth of the bay from which part of them flow toward the head of the bay while the other parts flow out through the eastern mouth of the bay. The simulation also indicates the existence of an eddy with counterclockwise motion around the head of the bay. The simulation of the distribution pattern of each ecosystem compartment is consistent with the field distribution pattern and with M2 residual current pattern. The rivers run off, primary production, secondary production (grazing), natural mortality of plankton as well as the decomposition by bacteria are not important to the budget and standing stock in Lampung Bay ecosystem. The influence of ocean supply is more important than biochemical processes in the bay. The calculated rate of efficiency of heat flow from both the decomposition process and urine production by zooplankton to the primary production has missed 30.48 %, while from the primary production to the secondary production (grazing) has added 17.24 %.

Key words: ecosystem dynamic, Lampung Bay, coupled hydrodynamic-ecosystem model, M2 residual current.

PENDAHULUAN

Penelitian-penelitian tentang ekosistem perairan laut dengan menggunakan model numerik semakin berkembang pesat dalam kurun 10 tahun terakhir ini, antara lain: Kawamiya *et*

al (1995), Kishi and Uchiyama (1995), Moll (1998), Chen *et al* (1999), Yanagi (1999), Neumann (2000), Edwards *et al* (2000) serta Spitz *et al* (2003). Bahkan di Indonesia, walaupun masih dalam taraf validasi model serta terbatas pada 2-dimensi (secara horizontal di permukaan), telah diterapkan pada beberapa perairan teluk dan pesisir, seperti yang dilakukan oleh Yonik (2000), Sugianto (2001), Pranowo (2002), dan Koropitan *et al* (2002). Khusus untuk Teluk Lampung, penggunaan model numerik untuk dinamika ekosistem belum pernah dilakukan. Sampai saat ini, penggunaan model numerik untuk mempelajari Teluk Lampung, umum-

¹ Departemen Ilmu dan Teknologi Kelautan, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Institut Pertanian Bogor (FPIK, IPB), Bogor. E-mail: alanfrendy@yahoo.com.

² Departemen Geofisika dan Meteorologi, Institut Teknologi Bandung (ITB), Bandung.

³ Departemen Manajemen Sumberdaya Perairan, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Institut Pertanian Bogor (FPIK, IPB), Bogor.

nya masih terfokus pada permasalahan sirkulasi air seperti yang diuraikan dalam penelitian-penelitian sebelumnya, yaitu Mihardja *et al* (1995), Koropitan (2002) dan Koropitan *et al* (2003).

Penelitian tentang ekosistem di Teluk Lampung, telah dilakukan oleh beberapa peneliti antara lain Wiryawan *et al* (1999), Sunarto (2001) dan Damar (2003). Secara umum, penelitian tersebut menguraikan deskripsi Teluk Lampung dan sekitarnya, baik sumberdaya hayati dan non-hayati di pesisir, hubungan cahaya dan nutrisi terhadap produktivitas primer, bahkan Damar (2003) menguraikan secara lengkap dinamika ekosistem di Teluk Lampung berdasarkan pengamatan 2 bulanan sepanjang tahun 2000 dengan lokasi pengambilan contoh yang tersebar di 14 stasiun pada lapisan permukaan dan lapisan dekat dasar.

Walaupun demikian, sampai saat ini pengaruh sirkulasi arus terhadap ekosistem di Teluk Lampung belum terjawab secara tuntas. Permasalahan ini sangat jarang diteliti karena membutuhkan banyak data dan waktu yang sangat panjang, sehingga tinjauan permasalahan ekosistem sering dibatasi pada pengamatan saat itu. Data sesaat yang dimaksudkan adalah tidak melihat selama siklus pasang surut, sehingga walaupun banyak data yang diamati, tetap belum menjawab pengaruh sirkulasi arus terhadap ekosistem yang ada. Mengapa hal ini begitu penting, karena pengaruh sirkulasi arus akan memperjelas kemampuan Teluk Lampung dalam menerima masukan suatu bahan (nutrien atau polutan). Seperti yang telah diuraikan oleh Damar (2003) bahwa suplai nutrisi dari dua sungai yang bermuara di Kota Bandar Lampung dan aktifitas industri di Tarahan telah turut mempengaruhi ekosistem Teluk Lampung. Selain itu, ada juga suplai nutrisi dan klorofil-a ke perairan Teluk Lampung dari Selat Sunda, seperti yang diamati oleh Hendiarti *et al* (2002). Dengan demikian, timbul pertanyaan menyangkut pengaruh sirkulasi arus ini, yaitu seberapa jauh pengaruh adveksi arus, pasang surut, suplai dari sungai dan pertukaran di mulut teluk terhadap dinamika ekosistem di Teluk Lampung?

Dalam menjawab pertanyaan di atas, maka penelitian ini bertujuan untuk mengkaji dinamika ekosistem perairan Teluk Lampung dengan menggunakan gabungan model hidrodinamika-ekosistem dengan pendekatan numerik.

Dinamika ekosistem yang dimaksud dalam penelitian ini meliputi neraca (*budget*) dari masing-masing kompartimen ekosistem dan struktur ekosistemnya.

MODEL NUMERIK

Penelitian ini terbatas pada simulasi numerik yang didasari pada metode beda hingga dan proses perhitungannya menggunakan bantuan bahasa pemrograman *Fortran 77*. Persamaan model yang digunakan adalah seperti yang diuraikan berikut ini.

Model Hidrodinamika dan Perhitungan Arus Residu

Model hidrodinamika yang digunakan dalam penelitian ini adalah model 2-dimensi yang diintegrasikan terhadap kedalaman, dengan menggunakan *Princeton Ocean Model* (POM) yang dikembangkan oleh Blumberg and Mellor (1999). Model ini dikembangkan sekitar tahun 1977 dan telah mengalami beberapa revisi, dan untuk penelitian ini digunakan POM versi 1998. Daerah model, asumsi dan syarat batas model hidrodinamika diuraikan secara lengkap dalam Koropitan (2002).

Arus residu atau kecepatan transpor rata-rata didefinisikan sebagai berikut (Ramming dan Kowalik, 1980):

$$V_{res} = \frac{\int_0^T (H + h)v dt}{\int_0^T (H + h) dt}$$

sedangkan V adalah komponen kecepatan (x atau y), T adalah periode suatu komponen pasut, H adalah kedalaman perairan, h adalah elevasi dan t adalah waktu. Komponen kecepatan (x atau y) dan elevasi diperoleh dari hasil perhitungan model hidrodinamika 2-dimensi yang diintegrasikan terhadap kedalaman. Simulasi arus residu 2-dimensi yang diintegrasikan terhadap kedalaman di Teluk Lampung adalah menggunakan komponen M2 yang mendominasi komponen pasut di Teluk Lampung (Mihardja *et al*, 1995). Istilah selanjutnya untuk hasil simulasi ini adalah arus residu M2.

Model Ekosistem

Persamaan transpor untuk model ekosistem 2-dimensi horisontal adalah hasil modifikasi model yang dikembangkan oleh Yanagi (1999). Kompartimen ekosistem yang terlibat adalah Fitoplankton (dalam hal ini Klorofil-a)-F, Zooplankton-Z, Detritus-D (merupakan orga-

nisme fitoplankton dan zooplankton yang mati), serta nutrisi yang berupa bahan anorganik terlarut nitrat-N dan fosfat-P. Skema hubungan antar kompartimen ekosistem dan lambang yang digunakan dalam persamaan disajikan pada Gambar 1. Penjabaran hubungan tersebut dalam persamaan transpor disajikan pada persamaan-persamaan berikut:

$$\begin{aligned} \frac{\partial F}{\partial t} + u \frac{\partial F}{\partial x} + v \frac{\partial F}{\partial y} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(K_h \frac{\partial F}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_h \frac{\partial F}{\partial y} \right) + A1F - A2F - A3F - \frac{W_F F}{H} \\ \frac{\partial Z}{\partial t} + u \frac{\partial Z}{\partial x} + v \frac{\partial Z}{\partial y} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(K_h \frac{\partial Z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_h \frac{\partial Z}{\partial y} \right) + A3Z - A4Z - A5Z - A6Z \\ \frac{\partial N}{\partial t} + u \frac{\partial N}{\partial x} + v \frac{\partial N}{\partial y} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(K_h \frac{\partial N}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_h \frac{\partial N}{\partial y} \right) - A1F + A6Z + A7D \\ \frac{\partial P}{\partial t} + u \frac{\partial P}{\partial x} + v \frac{\partial P}{\partial y} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(K_h \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_h \frac{\partial P}{\partial y} \right) - A1F + A6Z + A7D \\ \frac{\partial D}{\partial t} + u \frac{\partial D}{\partial x} + v \frac{\partial D}{\partial y} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(K_h \frac{\partial D}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_h \frac{\partial D}{\partial y} \right) + A2F + A4Z + A5Z - A7D - \frac{W_D D}{H} \end{aligned}$$

sedangkan K_h merupakan koefisien difusi horisontal ($50 \text{ m}^2/\text{detik}$), t merupakan perubahan terhadap waktu, x dan y perubahan terhadap ruang arah- x (timur-barat) dan arah- y (utara-selatan), u dan v adalah kecepatan rata-rata arah- x dan arah- y , H adalah kedalaman perairan dari dasar sampai elevasi permukaan air, W_F merupakan kecepatan penenggelaman fitoplankton dan W_D adalah kecepatan penenggelaman detritus. Uraian persamaan-persamaan tentang laju pertumbuhan fitoplankton (A1), mortalitas fitoplankton (A2), pemangsa zooplankton terhadap fitoplankton (A3), mortalitas zooplankton (A4), produksi kotoran zooplankton (A5), produksi urine zooplankton (A6) dan proses dekomposisi detritus oleh bakteri (A7) diuraikan oleh Yanagi (1999).

Persamaan transpor ini diselesaikan secara numerik dengan menggunakan prinsip beda hingga, khususnya metode QUICK (*Quadratic Upstream Interpolation for Convective Kinematics*) (Kowalik and Murty, 1993 dan James, 1993). Proses diskretisasi disesuaikan dengan sistem grid pada model hidrodinamika (Koropitan, 2002), yaitu *Arakawa-C*.

Nilai-nilai koefisien yang diterapkan dalam penelitian ini berdasarkan Yanagi (1999),

kecuali intensitas cahaya optimum untuk pertumbuhan fitoplankton ($128 \text{ } 404 \text{ Watt m}^2 \text{ hari}^{-1}$) yang didasari pada penelitian Sunarto (2001). Intensitas cahaya rata-rata sehari diperoleh dari data BMG Lampung (Unpublish data, 2001) yang diamati selama Januari 2001 di Stasiun Meteorologi Lapangan Udara Branti, Bandar Lampung. Konversi satuan adalah menggunakan rasio *red-field* 40 : 7.2 : 1 untuk masing-masing unsur C : N : P (C-karbon, N-nitrogen dan P-fosfor). Selanjutnya, untuk Klorofil-a menggunakan perbandingan 1 : 30 untuk Klorofil-a : Karbon (Chapra, 1997) sedangkan Zooplankton menggunakan hasil penelitian empirik Lizuka and Uye (1986) in Yanagi (1999), yaitu 1 berat kering individu zooplankton setara dengan 1 μg C. Perbandingan antara berat kering dan berat basah Zooplankton menggunakan perbandingan empirik 1 : 10 (Chapra, 1997).

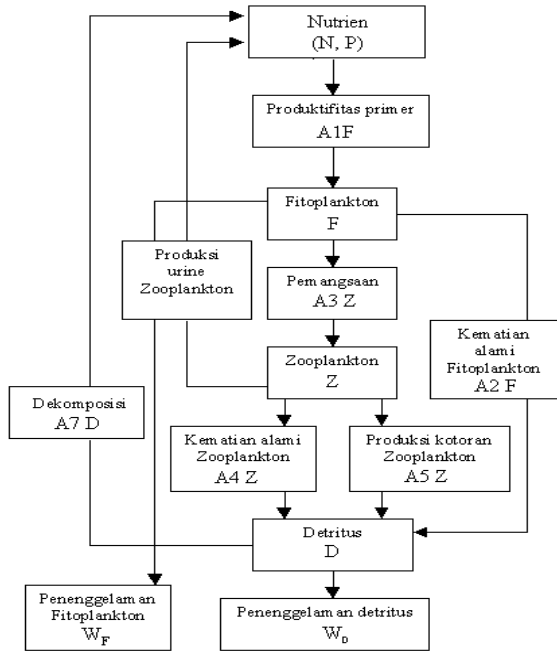
Syarat batas untuk daerah model adalah:

$$(F, Z, D, N, P) = 0$$

untuk syarat batas tertutup (daratan) dan

$$\frac{\partial K}{\partial t} \pm C \frac{\partial K}{\partial x} = 0$$

untuk syarat batas terbuka (laut) yaitu syarat batas radiasi Orlanski (Kowalik and Murty, 1993), sedangkan K merupakan konsentrasi untuk masing-masing kompartimen ekosistem.

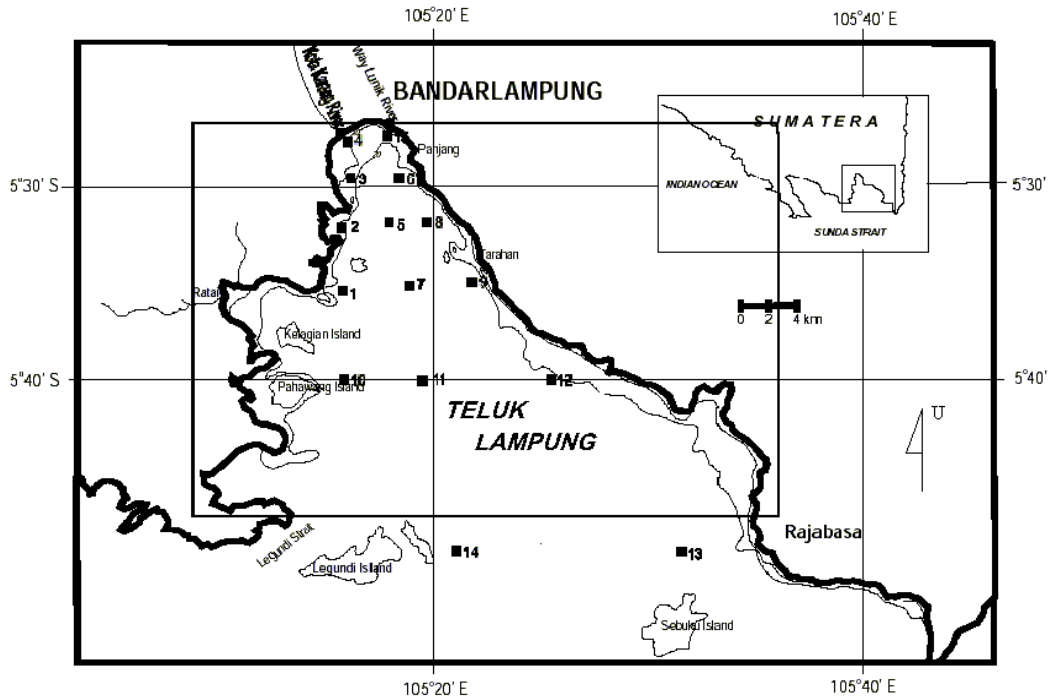


Gambar 1. Skema Hubungan Antar Kompartimen Model Ekosistem (Yanagi, 1999)

Data Lapangan

Data yang dipergunakan dalam penelitian ini adalah data hasil pengamatan 9 Januari 2001 di Teluk Lampung yang dilakukan oleh Damar (2003). Data tersebut berupa kompartimen ekosistem, yang terdiri atas: konsentrasi Klorofil-a, zooplankton, nitrat dan fosfat yang tersebar di permukaan air, suplai nutrisi (nitrat dan fosfat) dari sungai Muara Karang dan Lunik, serta data penunjang lingkungan yang terdiri atas: salinitas dan temperatur. Peta geografis dari stasiun pengambilan contoh diperlihatkan pada Gambar 2. Nilai awal yang digunakan dalam simulasi ini adalah nilai konsentrasi terkecil yang teramati selama pengamatan tersebut.

Untuk keperluan verifikasi model, dilakukan proses interpolasi dengan metode *Kriging* linier terhadap data lapangan, yang diolah dan ditampilkan dengan menggunakan perangkat lunak *Surfer 7.0*. Hasil tampilan ini berbeda dengan yang ditampilkan oleh Damar (2003).



Gambar 2. Peta Geografis Stasiun Pengambilan Contoh di Teluk Lampung (Damar, 2003) dan Daerah Model Komputasi (Daerah Kotak).

Rancangan Simulasi Model Gabungan Hidrodinamika dan Ekosistem

Untuk kepentingan verifikasi hasil perhitungan model dan data lapangan, maka penggu-

naan gabungan model hidrodinamika-ekosistem dihitung secara bersamaan, dan hasil model untuk masing-masing kompartimen ekosistem dicuplik sesuai dengan waktu pengambilan contoh di lapangan. Dalam mengkaji neraca (*bud-*

get) ekosistem serta *standing stock* di Teluk Lampung, maka dilakukan perhitungan secara terpisah. Pertama adalah menghitung arus residu, kemudian data arus residu yang diperoleh menjadi komponen advectif dalam model ekosistem. Simulasi model ekosistem dilakukan sampai mencapai kondisi tunak, sehingga hasil yang diperoleh dapat mewakili kondisi neraca ekosistem selama 1 hari.

Asumsi-asumsi yang Digunakan dalam Model

Model hidrodinamika 2dimensi dengan perata-rataan terhadap kedalaman merupakan penyederhanaan dari model 3-dimensi yang diintegrasikan terhadap kedalaman. Dengan demikian arus yang dihasilkan adalah suatu kecepatan arus yang sama dari dasar sampai permukaan, atau gradien kecepatan arus dikolom air tidak ada. Dengan demikian model ini mengabaikan proses turbulensi secara vertikal di kolom air. Mengingat debit air dari sungai-sungai bermuara di Teluk Lampung begitu kecil (Damar, 2003) maka pengaruh masukan debit air sungai tidak dilibatkan dalam perhitungan model hidrodinamika. Proses perhitungan neraca kompartimen ekosistem di Teluk Lampung terbatas pada daerah permukaan sampai kedalaman 2 meter, dengan asumsi konsentrasi semua kompartimen ekosistem menyebar merata.

Pengaruh salinitas, temperatur dan intensitas cahaya dalam pertumbuhan fitoplankton menggunakan nilai yang konstan, yaitu nilai rata-rata yang teramati di lapangan. Sumber nutrisi yang terukur dalam pengamatan lapangan hanya pada mulut Sungai Kota Karang dan Way Lunik di Bandar Lampung. Sumber nutrisi lainnya seperti daerah Industri Tarahan – Panjang dan Sungai Ratai tidak terukur dalam pengambilan contoh. Dengan demikian, berdasarkan pola sebaran yang terlihat pada data lapangan, maka diterapkan sumber nitrat di Tarahan – Panjang pada simulasi model sama (asumsi) nilainya dengan sumber nitrat di Sungai Way Lunik. Sumber fosfat tidak digunakan, karena tidak terlihat pada pola penyebaran data lapangan. Sumber nitrat dan fosfat di Sungai Ratai diabaikan dalam simulasi ini, mengingat konsentrasinya masih dibawah konsentrasi yang teramati di sumber Sungai Way Lunik dan Kota Karang. Selain itu, daerah Teluk Ratai dan sekitarnya merupakan daerah tertutup bagi kegiatan

an masyarakat karena merupakan daerah latihan TNI-AL.

HASIL DAN PEMBAHASAN

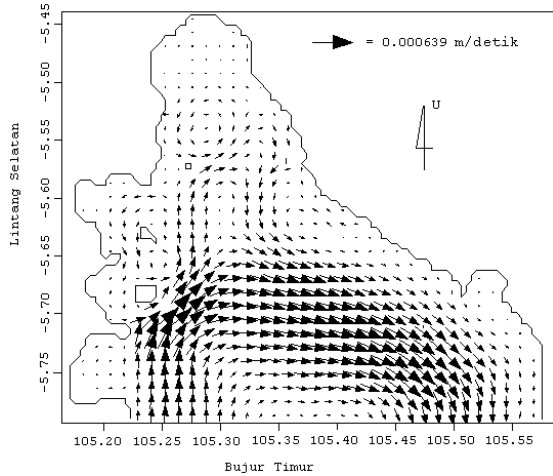
Arus Residu M2 di Teluk Lampung

Suatu arus pasang surut yang dibangkitkan oleh komponen pasut tertentu, bila dirata-ratakan selama suatu periode komponen tersebut, tentunya diharapkan akan memperoleh nilai nol. Dalam kenyataannya, arus rata-rata tersebut masih menghasilkan nilai yang dikenal dengan arus residu. Ramming and Kowalik (1980) menyatakan bahwa arus residu merupakan arus non-pasut, dimana sirkulasinya terbentuk ketika suku non-linier yang berhubungan dengan gesekan dasar dan komponen adveksi digunakan dalam persamaan (seperti kenyataan di alam). Meskipun arus residu relatif kecil, tapi dapat mempengaruhi pertukaran massa air dan gerakan partikel melayang dalam air. Yanagi (1999) mengutarakan bahwa arus residu lebih memainkan peranan penting di perairan pantai, dalam transpor material, dibanding arus pasang surut untuk kurun waktu yang panjang.

Hasil simulasi arus residu untuk arus yang dibangkitkan oleh pasut M2 di perlihatkan pada Gambar 3. Secara umum arus residu M2 cenderung masuk dari mulut teluk sebelah barat, sebagian terus memasuki sampai kepala teluk dan sebagian keluar kembali dari mulut teluk bagian timur. Arus yang dibangkitkan oleh pasut M2 ini tidak semuanya keluar pada mulut teluk sebelah timur, namun ada sedikit aliran yang keluar dan masuk di bagian tengah mulut teluk. Pola arus residu M2 di sekitar kepala teluk membentuk suatu eddy yang berlawanan jarum jam. Fenomena ini mengindikasikan bahwa material yang terbawa dari daratan melalui kedua sungai yang ada di Bandar Lampung sebagian besarnya hanya tersebar di sekitar kepala teluk. Namun material yang dibuang pada daerah industri Tarahan – Panjang, akan cenderung bergerak keluar teluk karena lokasinya di sebelah selatan pola arus residu M2 yang membentuk eddy.

Model Ekosistem Perairan

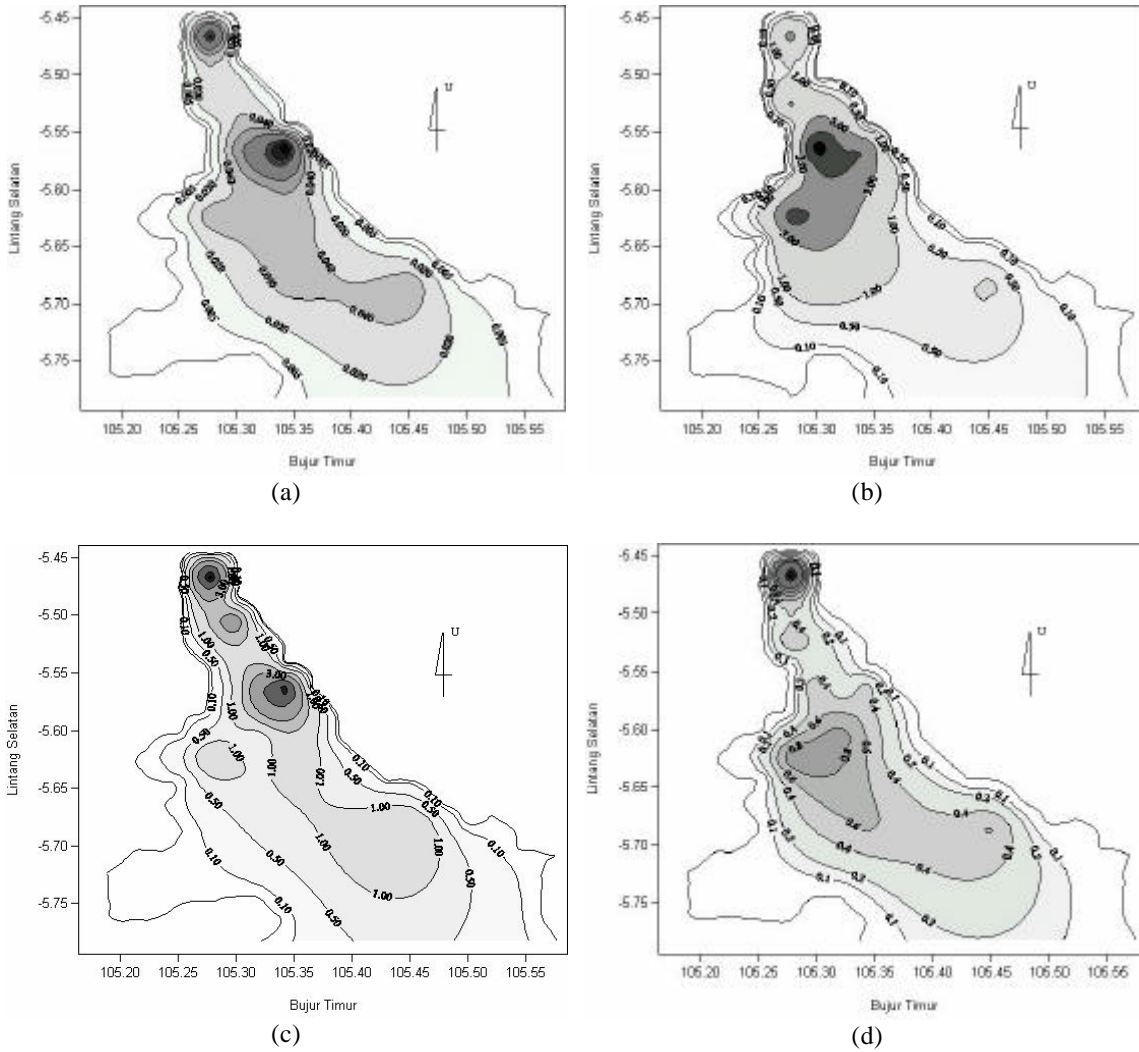
Hasil pengukuran lapangan untuk penyebaran klorofil-a, zooplankton, nitrat dan fosfat dipermukaan air, diperlihatkan pada Gambar 4, sedangkan hasil model pada Gambar 5.



Gambar 3. Hasil Simulasi Pola Arus Residu dengan Gaya Pembangkit Pasut M2.

Pola Penyebaran Kompartimen Ekosistem Perairan di Teluk Lampung

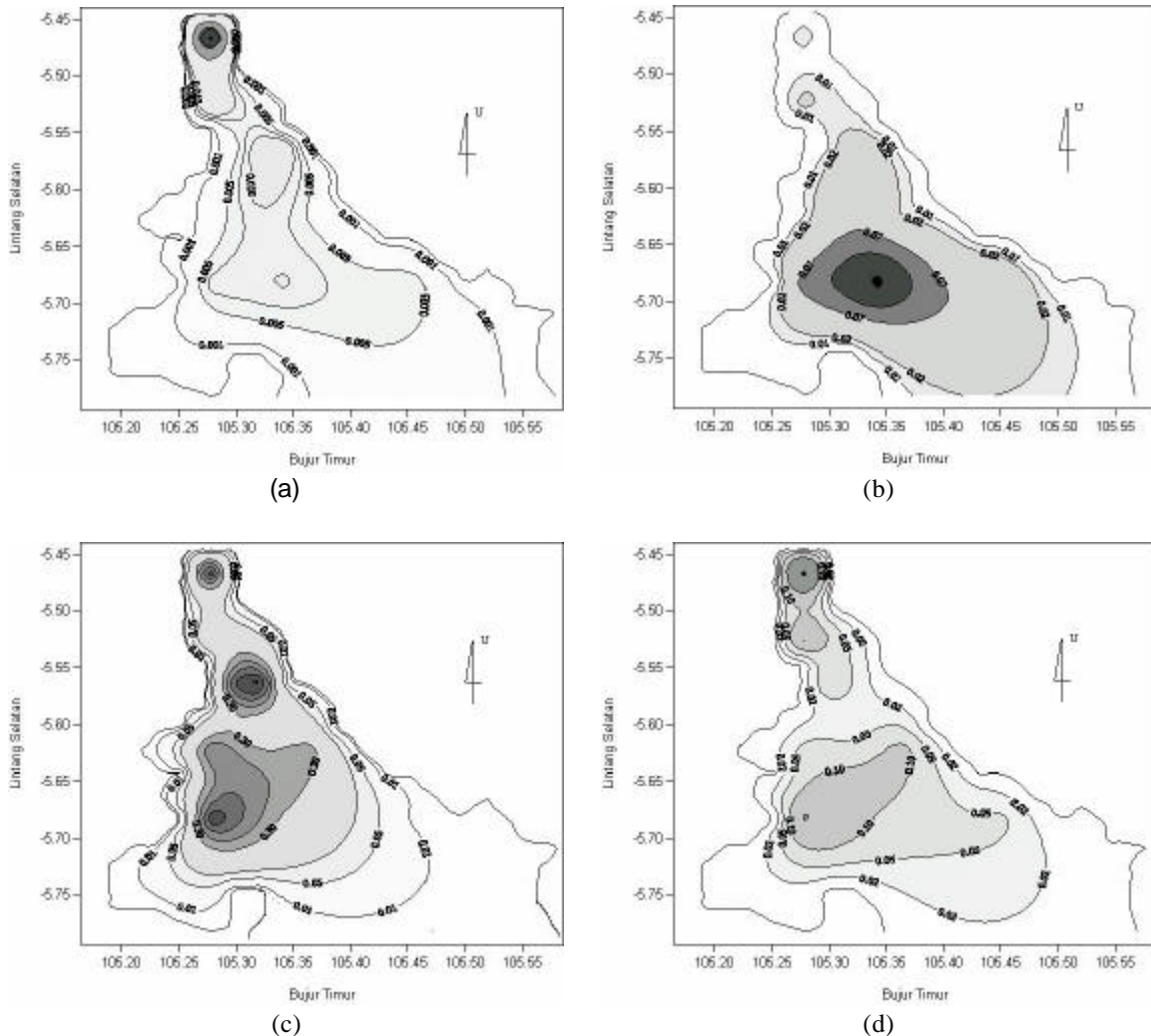
Secara umum pola penyebaran hasil model memiliki kesamaan dengan hasil pengamatan di lapangan. Pola penyebaran klorofil-a, zooplankton, nitrat dan fosfat hasil pengamatan di lapangan pada tanggal 9 Januari 2001 memperlihatkan hasil yang konsisten dengan pola arus residu M2. Secara umum terlihat bahwa terjadi pemusatan konsentrasi di sekitar kepala teluk yang diduga akibat adanya arus residu M2 yang membentuk eddy di perairan tersebut, sehingga material yang tersebar menjauhi kepala teluk yang sedikit. Berlainan dengan material yang dibuang pada daerah industri Tarahan – Panjang, langsung tersebar mengikuti pola arus



Gambar 4. Hasil Pengukuran Lapangan di Permukaan Air untuk: (a) Klorofil-a, (b) Zooplankton, (c) Nitrat, dan (d) Fosfat.

residu M2, hal ini nyata terlihat pada penyebaran Klorofil-a dan nitrat baik hasil simulasi maupun model. Dengan demikian, peranan arus residu M2 sangat dominan dalam menyebarkan

suatu material di perairan Teluk Lampung. Hal ini telah diamati dalam penelitian sebelumnya dengan menggunakan pemodelan arus residu M2 3-dimensi oleh Koropitan *et al* (2003).



Gambar 5. Hasil Simulasi Model di Permukaan Air untuk: (a) Klorofil-a, (b) Zooplankton, (c) Nitrat, dan (d) Fosfat.

Hasil simulasi yang diperoleh melalui gabungan model hidrodinamika-ekosistem memiliki pola penyebaran yang konsisten dengan pola penyebaran data lapangan. Hal ini terlihat jelas dalam pola penyebaran klorofil-a, hasil pengamatan lapangan dan model. Namun, pola penyebaran zooplankton hasil model memperlihatkan hasil yang agak berbeda dengan hasil pengamatan lapangan. Kemungkinan ini diakibatkan oleh keterbatasan dalam memodelkan penyebaran zooplankton mengingat sifatnya yang terkadang mampu melawan arus untuk mencari tempat yang banyak makanan. Dengan demiki-

an agak sulit menerapkan model adveksi dan difusi pada konsentrasi zooplankton, khususnya pemilihan nilai koefisien difusi yang tepat. Hasil simulasi masih memiliki nilai dibawah pengamatan lapangan. Penyebaran nitrat, baik hasil model dan pengamatan lapangan memperlihatkan adanya pemusatan konsentrasi di kepala teluk dan pesisir daerah industri Tarahan-Panjang. Demikian pula dengan penyebaran fosfat, memperlihatkan pola penyebaran yang mirip antara hasil model dan pengamatan lapangan. Pada pengamatan lapangan terlihat pula pemusatan konsentrasi nitrat dan fosfat di sekitar Teluk

Ratai, dengan konsentrasi yang tidak sebesar di kepala teluk. Hal ini kemungkinan akibat suplai yang berasal dari Sungai Ratai. Secara umum, walaupun memiliki pola penyebaran yang mirip dengan data lapangan, namun hasil simulasi klorofil-a, zooplankton, nitrat dan fosfat masih memiliki nilai dibawah pengamatan lapangan. Hasil ini disebabkan oleh tidak representatifnya sumber nutrisi yang dilibatkan dalam simulasi.

Dinamika Ekosistem Perairan Teluk Lampung

Sesuatu hal yang sulit untuk menentukan dinamika ekosistem di Teluk Lampung, dengan melibatkan interaksi proses-proses fisik, kimia dan biologis, melalui pengamatan lapangan. Hal ini akan membutuhkan biaya yang tinggi serta waktu yang lama, selain itu pula daerah Teluk Lampung cukup luas, sehingga akan menyulitkan dalam pengambilan contoh. Melalui gabungan model hidrodinamika-ekosistem ini, diharapkan dapat memberikan gambaran umum tentang neraca (*budget*) dan struktur ekosistem dari masing-masing kompartimen ekosistem di Teluk Lampung.

Neraca Kompartimen Ekosistem di Teluk Lampung

Seperti diperlihatkan pada Tabel 1 pengaruh arus residu M2 memperlihatkan bahwa suplai nitrat dan fosfat yang berasal dari sungai sangat kecil nilainya dibanding yang berasal dari laut. Selain itu, peranan suplai dari sungai belum begitu berarti terhadap penambahan nutrisi di Teluk Lampung secara keseluruhan, tetapi hanya berpengaruh pada sekitar daerah kepala teluk, sesuai dengan uraian sebelumnya. Hal ini juga diuraikan oleh Damar (2003) bahwa pengaruh suplai nutrisi dari sungai hanya berkisar pada daerah kepala Teluk. Selanjutnya, hasil perhitungan model yang memperlihatkan adanya suplai nutrisi yang signifikan dari Selat Sunda, juga teramati oleh Hendiarti *et al* (2002), dengan menggunakan citra satelit. Demikian pula peranan suplai nutrisi dari daerah industri Tarahan-Panjang, hanya terbatas disekitar pesisir daerah tersebut.

Struktur Ekosistem di Teluk Lampung

Pembahasan struktur ekosistem ini didasari oleh *standing stock* kompartimen ekosistem

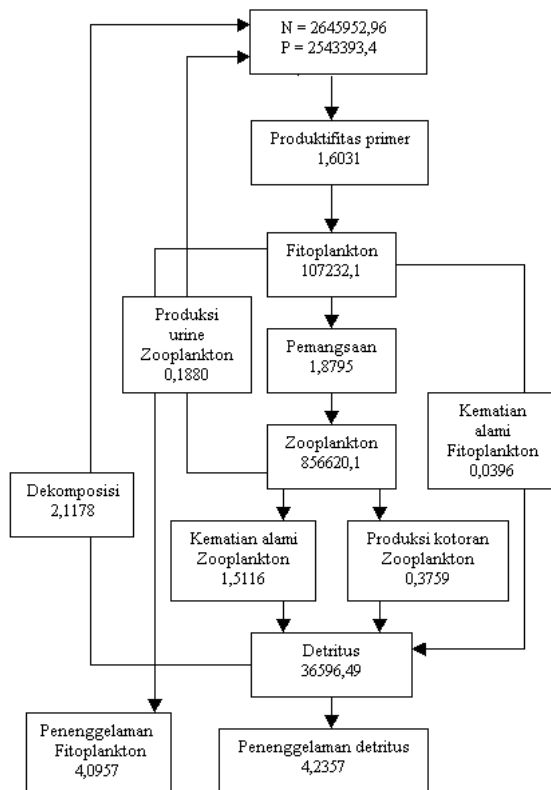
di Teluk Lampung. *Standing stock* kompartimen ekosistem di Teluk Lampung diperlihatkan pada Gambar 6. Secara umum, pengaruh interaksi antara proses biologis seperti produktifitas primer, pemangsaan (sekunder), kematian alami fitoplankton dan zooplankton serta proses dekomposisi oleh bakteri belum begitu berperan dalam *standing stock* ekosistem di Teluk Lampung. Peranan suplai dari laut masih lebih dominan, seperti yang telah diuraikan sebelumnya.

Tabel 1. Neraca (*budget*) Kompartimen yang Dipengaruhi oleh Arus Residu M2.

Kompartimen	Sumber			Keluar	Netto
	Sungai	Laut (batas)	Pesisir Tarahan dan Panjang		
Nitrat (kg mol)	0.79	13 154.40	0.79	6 048.00	7 107.19
Fosfat (kg mol)	0.76	79 531.20	-	34 636.04	44 895.92
Klorofil-a (Kg C)	-	7 101.63	-	1 013.92	6 087.71
Zooplankton (Kg C)	-	65 087.28	-	12 605.37	52 481.91

Perhitungan rasio produktifitas primer dengan penjumlahan hasil proses dekomposisi dan produksi urine zooplankton adalah 69.52%, atau aliran energinya mengalami kehilangan sebesar 30.38 %. Hal ini erat kaitannya dengan efektifitas pemanfaatan nutrisi oleh fitoplankton. Penjelasan yang mungkin untuk kasus ini adalah akibat penggunaan nilai intensitas cahaya rata-rata selama bulan Januari 2001 dalam proses simulasi, dimana memiliki nilai yang lebih tinggi (sekitar 27.3%) dari nilai intensitas cahaya optimum untuk produktifitas primer. Dengan demikian, kondisi intensitas cahaya yang relatif lebih tinggi ini mengakibatkan pemanfaatan nutrisi yang tidak optimum. Selain itu, penerapan dalam simulasi ini diasumsikan hanya pada lapisan 0 - 2 m sehingga tingkat optimum pemanfaatan cahaya dalam produktifitas primer pada kedalaman dibawah 2 meter tidak terhitung. Dalam persamaan suku proses biokimiawi yang sama namun untuk kasus 3-dimensi di Laut Cina Selatan, Guo *et al* (1999) memperoleh hasil simulasi yang mencapai 114.83% atau aliran energinya mengalami penambahan sebesar 14.83%. Nilai ini sangat memungkin-

kan, karena dalam simulasi tersebut dihitung pemanfaatan nutrisi oleh fitoplankton sampai ke dasar perairan, yaitu kedalaman yang intensitas mataharinya sangat optimum untuk proses fotosintesis.



Gambar 6. *Standing stock* Kompartimen Ekosistem Akibat Arus Residu M2 dalam Satu Hari (*kg C* atau *kg mol*).

Hasil simulasi ini memperoleh pula tingkat efisiensi produktivitas primer ke produktivitas sekunder (pemangsaan) yang sangat tinggi dan melebihi produktivitas primer yang ada, dengan nilai rasio 117.24%, atau aliran energinya mengalami penambahan sebesar 17.24%. Fenomena ini menggambarkan bahwa aktifitas pemangsaan oleh zooplankton lebih dominan dibanding pertumbuhan fitoplankton. Keberlanjutan biomassa fitoplankton dalam Teluk Lampung sangat ditunjang oleh masukan dari Selat Sunda. Kasus pada Teluk Lampung ini sangat bertolak belakang dengan Teluk Pelabuhan Ratu yang nilai rasionya sangat rendah yaitu 0.62% (Koropitan *et al* 2002). Kondisi di Teluk Pelabuhan Ratu berbeda, yaitu suplai klorofil-a dari luar teluk lebih sedikit.

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Hasil pemodelan ekosistem perairan di Teluk Lampung memperlihatkan pola yang cukup konsisten dengan hasil pengukuran lapangan, kecuali penyebaran Zooplankton. Penyebaran masing-masing kompartimen ekosistem mengikuti pola arus residu M2.

Peranan proses-proses biokimiawi dan suplai dari sungai di Kota Bandar Lampung belum begitu berpengaruh terhadap ekosistem perairan di Teluk Lampung. Suplai dari Selat Sunda merupakan faktor penting dalam ekosistem di Teluk Lampung. Tingkat pemanfaatan nutrisi oleh fitoplankton dalam proses fotosintesis belum optimum, serta aktifitas pemangsaan oleh zooplankton lebih dominan dibanding laju pertumbuhan fitoplankton.

Saran

Model yang digunakan dalam penelitian ini masih memiliki beberapa kelemahan, sehingga diharapkan dalam penelitian mendatang akan dikembangkan model yang lebih lengkap peubahnya, yang meliputi: (a) model gabungan hidrodinamika-ekosistem 3 dimensi, untuk mengkaji neraca dan *standing stock* ekosistem sampai pada dasar perairan, (b) menggunakan pendekatan *prognostic* (model baroklinik) dalam model hidrodinamika 3-dimensi, sehingga pengaruh suhu dan salinitas berubah terhadap waktu, dan (c) mengembangkan persamaan empiris proses remineralisasi di dasar perairan untuk digunakan dalam model ekosistem.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih ditujukan kepada pemberi dana Beasiswa Program Pascasarjana (BPPS), DIKTI-DEPDIKNAS, serta Program Magister Oseanografi dan Sains Atmosfer, Program Pascasarjana - Institut Teknologi Bandung, yang mendukung terlaksananya penelitian ini.

PUSTAKA

- Blumberg, A. F. and G. L. Mellor. 1999. **POM98**. <http://www.aos.princeton.edu/WWWPUBLIC/htdocs.pom>.
- Chapra, 1997. **Surface water quality modelling**. McGraw-Hill. Singapore.

- Chen, C., R. Ji, and L. Zheng 1999. **Influences of physical processes on the ecosystem in Jiaozhou Bay: A coupled physical and biological model experiment**. *Journal of Geoph. Research*, 104(C12): 29925- 29949.
- Damar, A. 2003. **Effects of enrichment on nutrient dynamics, phytoplankton dynamics and productivity in Indonesian tropical waters: a comparison between Jakarta Bay, Lampung Bay and Semangka Bay**. Faculty of Mathematics and Natural Sciences, Christian Albrechts University, Kiel, Germany.
- Edwards, C., H. P. Batchelder and T. M. Powell. 2000. **Modeling Microzooplankton and Macrozooplankton dynamics within a coastal upwelling system**. *Journal of Plankton Research*, 22(9): 1619-1648.
- Guo, X., T. Yanagi and D. Hu 1999. **Ecological modeling in the East China Sea** (Manuscript).
- Hendiarti, N., H. Siegel and T. Ohde. 2002. **Distinction of different water masses in and around the Sunda Strait: satellite observations and in-situ measurements**. *Proceedings Vol. II. Pan Ocean Remote Sensing Conference: Remote Sensing and Ocean Science for Marine Resources Exploration and Environment*, Bali, Indonesia. pp. 681 – 686.
- James, A. 1993. **An Introduction to water quality modelling**. John Wiley & Sons. England.
- Kawamiya, M., M. J. Kishi, Y. Yamanaka, and N. Sugino-hara. 1995. **An ecological-physical coupled model applied to Station Papa**. *Journal of Oceanography*, (51): 635-664.
- Kishi, M. J., and M. Uchiyama. 1995. **A Three-dimensional numerical model for a mariculture nitrogen cycle: case study in Shizugawa Bay, Japan**. *Fish. Oceanogr*, 4(4): 303-316.
- Koropitan, A. F. 2002. **Simulasi pola arus di Teluk Lampung**. *Jurnal Ilmu-ilmu perairan dan perikanan Indonesia*, IX(2): 11-17.
- Koropitan, A. F., R. Kaswadji, I. M. Radjawane, and S. Hadi. 2002. **Aquatic ecosystem modeling in Pelabuhan Ratu Bay**. *Proceedings Vol. II. Pan Ocean Remote Sensing Conference: Remote Sensing and Ocean Science for Marine Resources Exploration and Environment*, Bali, Indonesia. pp. 662-668.
- Koropitan, A. F., S. Hadi, and I. M. Radjawane. 2003. **Three-dimensional simulation of tidal current in Lampung Bay: diagnostic numerical experiment**. Bahan presentasi yang disampaikan pada International Symposium on Remote Sensing and Ocean Sciences in South East Asia di Universitas Udayana, Bali pada tanggal 2 September 2003.
- Mihardja, D. K., I. M. Radjawane dan M. Ali. 1995. **Studi penyebaran air panas di Tarahan, Lampung**. Laporan Penelitian. PT. Wiratman & Associates. Jakarta.
- Moll, A. 1998. **Regional distribution of primary production in the North Sea simulated by a three dimensional model**. *J. Mar. Syst.*, (16): 151-170.
- Neuman, T. 2000. **Towards a 3D-ecosystem model of the Baltic Sea**. *J. Mar. Syst.*, (25): 405-419.
- Pranowo, W. S. 2002. **Model numerik sebaran senyawa Nitrogen di perairan pantai Kedung, Jepara**. Tesis Magister. Bidang Khusus Oseanografi, Program Studi Oseanografi and Sains Atmosfer, Program Pascasarjana, Institut Teknologi Bandung.
- Sptiz, Y. H., P. A. Newberger, and J. S. Allen. 2003. **Ecosystem response to upwelling off the Oregon coast: Behavior of three nitrogen-based models**. *Journal of Geoph. Research*, 108(C3): 7-1 - 7-22.
- Sugianto, D. N 2001. **Model ekosistem 2dimensi di perairan pantai Banjir Kanal Timur, Semarang**. Tesis Magister. Bidang Khusus Oseanografi, Program Studi Oseanografi and Sains Atmosfer, Program Pascasarjana, Institut Teknologi Bandung.
- Sunarto. 2001. **Pola hubungan intensitas cahaya dan nutrien dengan Produktifitas Primer Fitoplankton di Teluk Hurun, Lampung**. Tesis Magister. Program Studi Ilmu Perairan. Program Pascasarjana, Institut Pertanian Bogor.
- Wiryawan, B., B. Marsden, H.A. Susanto, A.K. Mahi, M. Ahmad dan H. Poespitasari. 1999. **Atlas sumberdaya wilayah Pesisir Lampung**. Proyek Pesisir Lampung kerja sama antara Pemda Lampung, Proyek Pesisir Lampung PKSPL-IPB, University of Rhode Island dan USAID Jakarta.
- Yanagi, T. 1999. **Coastal oceanography**. Terra Scientific Publishing Company, Tokyo.
- Yonik, M. Y. 2000. **Model dua-dimensi penyebaran amonium, Nitrit, and Nitrat di Perairan Pantai Semarang dengan persamaan kinetik orde satu Thomann**. Tesis Magister. Bidang Khusus Teknik Pengelolaan Lingkungan, Program Magister Teknik Lingkungan, Institut Teknologi Bandung.