

EDISI REVISI

PROF. DR. IR. RIFARDI, M.Sc.

**EKOLOGI
SEDIMEN LAUT MODERN**



EDISI REVISI

R I F A R D I

EKOLOGI
SEDIMEN LAUT MODERN

Undang-Undang Nomor 19 Tahun 2002, tentang Hak Cipta

PASAL 2

- (1) Hak Cipta merupakan hak eksklusif bagi Pencipta atau Pemegang Hak Cipta untuk mengumumkan atau memperbanyak ciptaannya, yang timbul secara otomatis setelah suatu ciptaan dilahirkan tanpa mengurangi pembatasan menurut perundang-undangan yang berlaku.

PASAL 72

- (1) Barang siapa dengan sengaja dan tanpa hak melakukan perbuatan sebagaimana dimaksud dalam Pasal 2 ayat (1) atau Pasal 49 ayat (1) dan ayat (2) dipidana penjara masing-masing paling singkat 1 (satu) bulan dan/atau denda paling sedikit Rp 1.000.000,00 (Satu Juta Rupiah), atau paling lama 7 (tujuh) tahun dan/atau denda paling banyak Rp5.000.000.000,00 (Lima Miliar Rupiah).
- (2) Barang siapa dengan sengaja menyiarkan, memamerkan, mengedarkan, atau menjual kepada umum suatu Ciptaan atau barang hasil pelanggaran Hak Cipta atau Hak Terkait sebagaimana dimaksud pada ayat (1) dipidana dengan pidana penjara paling lama 5 (lima) tahun dan/atau denda paling banyak Rp 500.000.000,00 (lima ratus juta rupiah).

EDISI REVISI

PROF. DR. IR. RIFARDI, M.Sc

EKOLOGI

SEDIMEN LAUT MODERN

Penerbit
UR PRESS Pekanbaru
2012

Judul : Edisi Revisi Ekologi Sedimen Laut Modern
Penulis : Rifardi

Diterbitkan Oleh **UR PRESS**:
Cetakan Pertama September 2008
Cetakan Kedua Oktober 2010
Edisi Revisi Januari 2012

Alamat Penerbit
Badan Penerbit Universitas Riau
UR PRESS Jl. Pattimura No. 9, Gobah Pekanbaru 28132,
Riau, Indonesia
Telp. (0761) 22961, Fax. (0761) 857397
e-mail: unri_perss@yahoo.co.id/web:www.unripress.com
ANGGOTA IKAPI

Hak Cipta dilindungi Undang-undang
Dilarang mengutip atau memperbanyak
sebagian atau seluruh isi buku ini tanpa izin tertulis dari
penerbit

Isi di luar tanggung jawab percetakan

Cetakan Pertama September 2008
Cetakan Kedua Oktober 2010
Edisi Revisi Januari 2012

Perpustakaan Nasional RI: Katalog Dalam Terbitan (KDT)

Rifardi

Ekologi Sedimen Laut Modern / Rifardi.--
Pekanbaru : Unri Press, 2008
167 + xiii hlm. ; 15,5 cm

ISBN 978-979-792-149-1

I. Judul

PENGANTAR

Isi buku ini sebagian besar disusun dari tulisan-tulisan penulis hasil penelitian yang telah dilakukan diberbagai perairan laut dangkal mulai dari daerah subtropis, transisi, dan daerah tropis, dan sebagian besar tulisan tersebut telah dipublikasi di jurnal-jurnal ilmiah baik dalam maupun luar negeri. Dalam buku ini penulis menjelaskan peranan sedimentologi terhadap perubahan ekosistem laut dan fenomena alam yang mampu mempengaruhi karakteristik sedimen laut, dan atas dasar hubungan timbal balik inilah penulis mengusulkan istilah "EKOLOGI SEDIMEN LAUT", sekaligus menjadi judul buku ini.

Buku ini juga memberikan hal-hal yang mendasarkan yaitu berupa prinsip-prinsip sedimentologi yang penting dipahami seperti partikel sedimen dan proses sedimentasi, khusus aspek-aspek sedimentologi laut dari sudut pandang ilmu lingkungan laut.

Kehadiran buku ini sebagai salah satu upaya untuk mengatasi keterbatasan akan kekurangan referensi tentang buku sedimentologi laut khusus berbahasa Indonesia, yang menyebabkan lemahnya pemahaman tentang fonomena-fenomena sedimentologi dan hubungan sedimentologi dengan ilmu kelautan. Buku ini dapat digunakan sebagai pedoman bagi mahasiswa, peneliti, tutor dan dosen yang baru mengenal

sedimentologi laut, untuk melakukan penelitian yang memanfaatkan informasi sedimen bagi kegunaan interpretasi lingkungan laut.

Penulis mengucapkan terima kasih kepada semua pihak atas selesainya buku ini. Kepada seluruh senior, junior, kolega dan mahasiswa yang memberikan dorongan dan spirit yang luar biasa, penulis menyampaikan penghargaan. Kemudian buku ini terwujud atas bantuan saudara Yeeri Badrun M.Si, salah seorang mahasiswa terbaik bimbingan penulis, yang melakukan disain dan *layout*, untuk itu penulis mengucapkan terima kasih yang tak terhingga. Kepada keluarga dirumah yang dengan sabar dan berkurangnya waktu bagi mereka karena konsentrasi penulis sebagian besar tercurah dalam penyusunan buku ini, diucapkan terima kasih.

Pekanbaru, September 2008

Penulis,

Rifardi

PENGANTAR EDISI REVISI

Revisi buku ini disusun atas dasar perkembangan hasil penelitian sedimen terbaru yang dilakukan oleh penulis dan mahasiswa bimbingan penulis di perairan laut dangkal. Selain itu beberapa masukan dari kolega dan pembaca buku edisi pertama, perlu dilakukan perbaikan atau penyempurnaannya.

Isi buku ini sebagian besar disusun dari isi buku edisi sebelumnya yang telah direvisi yaitu perhitungan untuk menentukan kecepatan akumulasi sedimen, referensi dan beberapa perbaikan redaksional. Selain itu penulis menambah 1 (satu) bab baru khusus membahas hubungan antara proses sedimentasi dengan kapasitas asimilasi perairan, degradasi fungsi ekosistem perairan dan pemanasan global. Bab baru ini juga menjelaskan interpretasi lingkungan pengendapan berdasarkan aspek sedimentasi perairan laut dangkal.

Penulis mengucapkan terima kasih kepada semua pihak atas semua masukan yang diberikan, dan khusus kepada mahasiswa S1 dan S2 bimbingan penulis yang telah melakukan penelitian dan penulisan skripsi dan thesis dengan baik sehingga hasil penelitian tersebut dapat memperkaya isi buku ini.

Pekanbaru, Januari 2012
Penulis,

Rifardi

DAFTAR ISI

	Hal
PENGANTAR.....	v
PENGANTAR REVISI.....	v
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR TABEL.....	x
DAFTAR GAMBAR.....	xi
I. PENDAHULUAN	1
1.1. Sedimen.....	1
1.2. Ekologi Sedimen	7
II. FAKTOR-FAKTOR PEMBATEAS	13
2. 1. Sumber Sedimen.....	14
2. 2. Morfologi Sedimen.....	14
2. 3. Arus dan Gelombang.....	15
2. 4. Tekstur Sedimen.....	16
2. 5. Kimia Air.....	17
2. 6. Fisika Air.....	18
2.7. Mekanisme Transpor Sedimen.....	19
III. PARTIKEL SEDIMEN.....	21
3. 1. Jenis-Jenis Partikel Sedimen	21
3.1.1.Pecahan Padat dari Endapan Yang Lebih Tua	22
3.1.2.Partikel yang Bukan Merupakan Pecahan Padat dari Endapan yang Lebih Tua	25
3. 2. Bentuk Partikel Sedimen.....	31
3. 2. 1 Sphericity	33
3. 2. 2 Roundness	34

IV. PROSES SEDIMENTASI.....	39
4. 1. Proses Fisika.....	39
4. 2. Proses Biologi.....	46
4. 3. Proses Kimia.....	50
4.3.1. Pelarutan Kalsium Karbonat Sebagai Fungsi pH...	50
4.3.3. Reduksi dan Oksidasi (Eh).....	52
4.3.4 .Weathering.....	53
V. KECEPATAN SEDIMENTASI.....	55
5. 1. Sedimentasi Relatif.....	57
5. 2. Kecepatan Sedimentasi Absolut.....	64
5. 3. Akumulasi Sedimen	70
VI. TRANSPOR SEDIMEN.....	77
6. 1. Gambaran Umum Laut Paya	78
6. 2. Sebaran Sampling Sedimen.....	82
6. 3. Padatan Tersuspensi	83
6. 4. Jarak dan Waktu Deposisi Sedimen	91
VII. SEDIMENTASI DAN EKOLOGI.....	109
7. 1. Sedimentasi Perairan Pantai	109
7. 2. Pencemaran Dasar Perairan.....	120
7. 3. Teknik dan Rekayasa Pantai.....	126
VIII. SEDIMENTASI, DEGRDASI EKOSISTEM DAN PERUBAHAN IKLIM.....	131
8. 1. Sedimentasi dan Kapasitas Asimilasi Perairan.....	132
8. 2. Sedimentasi dan Degradasi Ekosistem Perairan.....	137
8. 3. Sedimentasi dan Pemanasan Global.....	151

DAFTAR PUSTAKA
INDEKS SUBJEK

DAFTAR TABEL

	Hal
Tabel 5. 1. Hasil Perhitungan Persentase Kecepatan Sedimentasi Relatif (%).....	62
Tabel 6. 1. Koordinat titik pengambilan sampel padatan tersuspensi dan dasar (Rifardi, 2006).	83
Tabel 6. 2. Kandungan padatan tersuspensi pada perairan Laut Paya Pesisir Pulau Kundur (Rifardi, 2006).....	85
Tabel 6. 3. Karakteristik sedimen permukaan perairan Laut Paya Pesisir Pulau Kundur (Rifardi, 2008a).....	93
Tabel 6. 4. Ukuran butir sedimen dan karakteristik oseanografi pada stasiun 23 dan sekitarnya.....	99
Tabel 6. 5. Ukuran butir sedimen dan karakteristik oseanografi pada stasiun 11 dan sekitarnya.....	102
Tabel 8. 1 Hasil analisis Mechanical grain size analysis sedimen permukaan dasar (Rifardi et al, 2011).	141
Tabel 8. 2. Nilai estimasi biomasa (Badan Lingkungan Hidup Propinsi Riau, 2010)	155

DAFTAR GAMBAR

	Hal
Gambar 3. 1. Sayatan/potongan melintang partikel sedimen menunjukkan jari-jari sudut ($r_1, 2, \dots$), dan Jari-jari maksimum (R), Krumbein dalam Friedman dan Sander (1978).....	35
Gambar 3. 2. Sketsa tingkatan roundness dan sphericity partikel sedimen berukuran pasir (Power dalam Friedman dan Sander, 1978).....	36
Gambar 4. 1. Ilustrasi mekanisme transpor sedimen (Universitas Gajah Mada).....	40
Gambar 4. 2. Suspensi bertingkat (A) dan suspensi seragam (B).....	42
Gambar 4. 3. Klasifikasi sorting sedimen.....	44
Gambar 4. 4. Skema dua tipe suspensi yang berbeda yaitu suspensi pada ketinggian rendah dan suspensi pada ketinggian tinggi (Friedman dan Sander, (1978).....	45
Gambar 5. 1. Sebaran nilai L/Tl (Oki, 1989).....	63
Gambar 5. 2. Contoh potongan sampel core sedimen secara ..	67
Gambar 5. 3. Sebaran vertikal kandungan merkuri dalam core sedimen (Rifardi et al., 1998)	68
Gambar 5. 4. Sebaran kecepatan sedimentasi Laut Yatsushiro Jepang (Rifardi et al., 1998)	71
Gambar 5. 5. Rancang bangun sediment trap.....	74

Gambar 6. 1.	Perairan Laut Paya terletak di Pesisir Pulau Kundur Kabupaten Karimun Propinsi Kepulauan Riau Indonesia (PKSPL, 2001)	80
Gambar 6. 2.	Stasiun pengambilan sampel padatan tersuspensi dan dasar (Rifardi, 2006).	84
Gambar 6. 3.	Sebaran padatan tersuspensi (Rifardi, 2006).	87
Gambar 6. 4.	Pola arus pasang surut (Rifardi, 2006).....	88
Gambar 6. 5.	Sebaran fraksi kerikil, pasir dan lumpur (Rifardi, 2008a).....	97
Gambar 6. 6.	Arah dan jarak transpor sedimen dari daerah damping	107
Gambar 6. 7.	Arah dan jarak transpor sedimen dari daerah penambangan	108
Gambar 7. 1.	Proses pengendapan sedimen (Scruton dalam Davis, 1978).....	110
Gambar 7. 2.	Perairan Estuaria Oura Jepang Selatan (Rifardi dan Ujiie, 1993).	112
Gambar 7. 3.	Daerah penjalaran gelombang menuju pantai....	115
Gambar 7. 4.	Skema gambar pergerakan sedimen tegak lurus pantai.....	116
Gambar 7. 5.	Potongan melintang profil pantai saat angin tenang	117
Gambar 7. 6.	Potongan melintang profil pantai saat angin badai.....	118
Gambar 7. 7.	Profil pantai yang curam tergerus gelombang ...	119

Gambar 7. 8.	Hubungan antara ukuran butir sedimen (Mz: Ø) dan bahan organik sedimen (Rifardi dan Ujiie, 1993).....	123
Gambar 8. 1.	Stasiun pengambilan sampel total suspended solid (Idris, 2011).....	134
Gambar 8. 2.	Peta physiographic perairan Esturia Bagan, tanda panah menunjukkan daerah penelitian dalam kotak (Rifardi et al, 2011)..	139
Gambar 8. 3.	Sebaran diameter rata-rata (Mz: Ø) sedimen permukaan dasar (Rifardi et al, 2011)	142
Gambar 8. 4.	Sebaran kandungan bahan organik pada sedimen permukaan dasar (Rifardi et al, 2011)	144
Gambar 8. 5.	Sebaran sedimen Lithogenous dan Biogenous (Serasah) (Rifardi et al, 2011).....	146
Gambar 8. 6.	Sebaran Fe dan K pada sedimen permukaan dasar (Rifardi et al, 2011)	147
Gambar 8. 7.	Padatan tersuspensi di setiap stasiun saat Surut (Rifardi et al, 2011).....	148
Gambar 8. 8.	Padatan tersuspensi di setiap stasiun saat pasang (Rifardi et al, 2011).....	149

I. PENDAHULUAN

1.1. Sedimen

Sedimentologi istilah yang diusulkan pada tahun 1932 oleh H. A. Wadel, memiliki arti sebagai suatu ilmu yang mempelajari sedimen. Istilah sedimen ditujukan pada lapisan kerak bumi yang telah mengalami proses transportasi. Kata sedimen berasal dari bahasa latin “Sedimentum” yang artinya “Pengendapan”. Sebagaimana yang digunakan oleh banyak orang, sedimentologi adalah ilmu yang mempelajari hanya sedimen (endapan) modern. Jika didefinisikan dalam arti lebih sempit, sedimentologi meliputi proses sedimentasi, suatu ilmu yang mempelajari proses sedimentary, (Friedman dan Sander, 1978).

Kemudian, sedimentologi tergolong ke dalam cabang geologi baru dan dapat disebut sebagai bidang untuk kelahiran geologi modern, dengan tujuan utama kelahirannya adalah mengexplorasi dan mengorganisir tingkatan lingkungan pengendapan yang menyusun masalah-masalah geologi. Sedimentologi menitik beratkan ruang lingkupnya pada masalah interpretasi hubungan secara vertikal dan horizontal tingkatan pengendapan. Oleh sebab itu mempelajari/meneliti sedimentologi berarti mempelajari/meneliti dua aspek stratigraphi yaitu: 1) lithostratigraphi: yang mempelajari karakteristik fisik tingkatan pengendapan, dan 2)

biostratigraphi: yang mempelajari fosil dan masalah-masalah biologi yang terdapat dalam tingkatan pengendapan (Friedman and Sander, 1978). Sebagai konsekuensi dari ruang lingkup tersebut, sedimentologi akan saling berinteraksi dengan hal-hal yang berkaitan dengan ekologi baik dalam sedimen modern (*recent sediment*) maupun sedimen tua (*ancient sediment*). Kondisi inilah yang menyebabkan sedimentologi dipengaruhi oleh cabang ilmu lainnya seperti oseanografi, fisika, kimia, fisiologi, ilmu-ilmu atmosfera, hidrologi, ilmu antariksa dan ilmu tanah.

Selanjutnya dijelaskan, sejalan dengan penambahan umur lapisan bumi, sedimen dapat mengungkapkan masalah-masalah dan gambaran umum tentang kondisi lingkungan yang berlaku saat terjadinya proses pengendapan tersebut. Hasil penelitian tentang sedimen modern telah membuktikan banyak manfaat dalam pengungkapan fenomena yang telah terjadi pada periode pengendapan dan pengaruh aktivitas manusia dan alam terhadap fenomena ini. Penelitian sedimentologi telah memberikan data yang penting terhadap hal-hal spesifik yang diikuti oleh material hasil berbagai macam dampak aktivitas manusia seperti industri, konversi alam, pemukiman, pengembangan wilayah pesisir, eksplorasi sumberdaya lautan dan daratan, yang dimasukkan ke dalam lingkungan dan proses alami yang mengubah fungsi ekosistem.

Kondisi ekosistem lingkungan pengendapan dapat diterjemahkan dari karakteristik sedimen yang terdapat dalam

perairan, khususnya perairan laut. Permasalahan ekologi modern yang diperoleh dari sedimen modern akan mampu mengungkapkan persoalan lingkungan yang terjadi pada masa lampau dan dapat memprediksi kondisi lingkungan pengendapan pada masa mendatang. Hasil penelitian yang dilakukan oleh Rifardi *et al.* (1998), Tomiyasu *et al.* (2000), Rifardi (2008a) di Teluk Minamata Jepang, menggambarkan bahwa sedimen adalah salah satu media di alam yang mampu menyimpan material hasil berbagai macam dampak aktivitas manusia, dan juga merupakan media yang valid memberikan informasi terhadap semua bentuk material yang diakumulasinya.

Sedimen laut berasal dari daratan dan hasil aktivitas (proses) biologi, fisika dan kimia baik yang terjadi didaratan maupun di laut itu sendiri, meskipun ada sedikit masukan dari sumber vulkanogenik dan kosmik. Sedimen laut terdiri atas materi-materi berbagai sumber. Faktor yang mempengaruhi tipe sedimen yang terakumulasi antara lain adalah topografi bawah laut dan pola iklim. Distribusi laut saat ini merupakan refleksi iklim dan pola arus. Tipe sedimen dasar laut berubah terhadap waktu karena perubahan cekungan laut, arus dan iklim. Urutan dan karakteristik sedimen baik struktur maupun tekstur yang tergambar dalam lapisan sedimen menunjukkan sebagian perubahan yang terjadi di atasnya.

Perkembangan penelitian sedimentologi laut cukup pesat seiring dengan majunya penelitian pada cabang ilmu lain seperti oseanografi, fisika, biologi, kimia dan ilmu antariksa/atmosfera.

Hal ini terlihat dari perkembangan peralatan yang digunakan untuk mengambil sampel sedimen laut. Pada awal abad ke 19, sampel sedimen diambil dengan menggunakan alat konvensional yang cukup sederhana seperti dredger, dan pengukuran ke dalaman perairan dengan menggunakan tali jerami yang diberi pemberat. Kemudian baru pada awal tahun 1900an pengambilan sampel sedimen laut telah menggunakan core sampler dan pengukuran ke dalaman dilakukan dengan Echo Sounding (Friedman dan Sander, 1978).

Selanjutnya, kemajuan penelitian oseanografi telah memberikan pengaruh besar terhadap perkembangan penelitian sedimentologi. Era oseanografi secara sistematis telah dimulai ketika HMS Challenger kembali ke Inggris pada tanggal 24 Mei 1876 membawa sampel, laporan, dan hasil pengukuran selama ekspedisi laut yang memakan waktu tiga tahun sembilan bulan. Anggota ilmuwan yang selalu meyakinkan dunia tentang kemajuan ilmiah Challenger adalah John Murray. Sampel-sampel yang dikumpulkan oleh Murray memberikan titik awal terhadap semua penyelidikan sedimen laut-dalam.

Kemudian, pesatnya perkembangan dan kemajuan pada disiplin ilmu lain, pada saat ini penelitian bawah laut (sedimen) telah dapat diabadikan secara visual melalui “visual image” dasar laut dan peralatan modern lainnya. Banyak pendeteksian dilakukan oleh satelit dan pesawat terhadap bumi dengan menggunakan spektrum elektromagnetik. Sedangkan penentuan umur lapisan bumi/sedimen dan penelitian kimia sedimentologi

didorong oleh ditemukannya berbagai radio isotop seperti isotop oksigen dan karbon.

Data hidrologi telah memberikan suatu dasar pengertian yang baru tentang pola arus sungai, suplai aliran, transpor sedimen dan mekanisme banjir, yang pada akhirnya akan bermanfaat dalam penelitian proses sedimentasi. Sejalan dengan itu proses kimia dan biokimia yang terjadi pada tanah mampu melepaskan partikel-partikel dari batuan dasarnya, dan ini akan menambah suplai sedimen melalui pola-pola hidrologi yang ada ke perairan.

Rifardi (2003) menggambarkan korelasi antara aliran sungai, curah hujan (musim), aktivitas pada daerah yang mengalami proses pelepasan partikel dan karakteristik sedimen Sungai Kampar Propinsi Riau, sebagai berikut: 1). musim mempengaruhi karakteristik sedimen dasar, musim yang berbeda (kemarau, hujan, pancaroba) menyebabkan proporsi fraksi sedimen yang berbeda pula, 2) pada musim pancaroba yaitu transisi musim panas ke hujan dasar perairan Sungai Kampar didominasi oleh fraksi pasir, sebaliknya pada transisi musim hujan ke panas didominasi oleh fraksi lumpur, 3) proporsi fraksi sedimen pada masing-masing stasiun sampling berbeda karena letak masing-masing stasiun sampling (hulu, transisi dan hilir) secara morfologi berbeda, 4) aktivitas yang terjadi sekitar Sungai Kampar lebih mempengaruhi sedimen/habitat dasar perairan dari pada sistem aliran sungai tersebut, dan 5) adanya kecenderungan perubahan fraksi yang

berukuran kasar fraksi menjadi lebih halus oleh perbedaan musim mengindikasikan berbedanya kekuatan arus sungai.

Anwar (2001) menjelaskan bahwa besarnya aliran permukaan yang terjadi pada musim penghujan dan berkurangnya luas kawasan hutan serta semakin luasnya bagian permukaan tanah Daerah Aliran Sungai yang terbuka menyebabkan erosi permukaan menjadi semakin besar sehingga angkutan sedimen aliran permukaan bertambah besar pula.

Pola dan karakteristik sedimen dipengaruhi oleh aktivitas artifisial (manusia) dan alam. Oleh sebab itu hasil penelitian tentang sedimen akan memberikan informasi tentang tekanan yang terjadi pada lingkungan yang disebabkan oleh kedua aktivitas tersebut. Rifardi (2006 dan 2008b) menemukan aktivitas eksploitasi sumberdaya dasar perairan laut mengakibatkan perubahan tekstur sedimen permukaan dan karakteristik alami sedimen baik yang tersuspensi maupun yang terendapkan. Fenomena alam seperti bencana alam, siklus oseanografi dan musim juga mempengaruhi sedimen baik secara fisika, kimia maupun biologi. Gempa bumi dahsyat berkekuatan 9,15-9,30 skala Richter yang terjadi pada tanggal 26 Desember 2005 dan diikuti oleh rangkaian gelombang tsunami di wilayah Samudera Hindia, mengakibatkan bagian utara Pulau Simeulue terangkat 2-3 meter dan bagian selatannya menurun 2-3 meter pula. Selain itu gempa ini mengakibatkan kerusakan parah pada beberapa terumbu karang, di mana kerusakan ini menyebabkan patah dan hancurnya terumbu karang, bahkan pada beberapa

wilayah seperti Pulau Simeulue, Sumatera dan Kepulauan Andaman terumbu karang terangkat dari laut (Wilkinson *et al.* 2006). Fenomena ini tentu akan mengubah struktur dan tekstur sedimen pada daerah yang mengalami bencana ini.

1.2. Ekologi Sedimen

Pertambahan jumlah populasi manusia secara pesat telah berlangsung sejak awal abad ke 20 dan memberikan tekanan terhadap lingkungan karena peningkatan aktivitas pemanfaatan sumberdaya alam baik di daratan maupun di lautan. Proses sedimentasi merupakan salah satu proses yang terjadi disebabkan oleh alam dan artifisial manusia, telah memberikan perubahan tatanan ekosistem di mana sedimen tersebut diendapkan. Oleh sebab itu, Okada dan Smith (2005) mengajukan dua isu utama tentang tentang konsep lingkungan bumi yakni lingkungan yang dikontrol oleh fenomena alamiah selama 4.600 juta tahun sejarah bumi dan lingkungan yang dipengaruhi oleh aktivitas manusia. Sehubungan dengan hal tersebut, maka sampai saat ini dapat dinyatakan bahwa sedimentologi adalah suatu ilmu tentang lingkungan bumi, dan tujuan penelitian sedimentologi juga dapat dibedakan menjadi penelitian lingkungan bumi dari proses alamiah dan lingkungan hasil aktivitas manusia. Lingkungan alam yang dihasilkan dari proses alamiah disebut SEDIMENTOLOGI LINGKUNGAN, sedangkan lingkungan alam yang dihasilkan dari aktivitas manusia disebut SEDIMENTOLOGI SOSIAL.

SEDIMENTOLOGI LINGKUNGAN membahas perubahan lingkungan alam yang tercatat pada sejarah bumi dalam endapan sedimen dan sedimen ini menjelaskan kondisi lingkungan masa lalu dan sekarang. Sedangkan SEDIMENTOLOGI SOSIAL menekankan pada perubahan lingkungan yang disebabkan oleh dampak aktivitas manusia, dan dalam hal ini menjelaskan masalah yang berhubungan dengan konservasi alam, kontribusi dampak pada lingkungan dan berbagai upaya merehabilitasi lingkungan (Okada dan Smith, 2005).

Hubungan antara aktivitas manusia dan sedimen laut serta pengaruhnya terhadap ekologi laut telah dijelaskan oleh banyak peneliti diantaranya dalam buku Friedman and Sander (1978), pada saat ini krisis besar bagi lingkungan dan ekologi disebabkan oleh aktivitas industri di mana material yang dihasilkan industri melebihi berat total material yang berasal dari sungai-sungai di dunia. Material industri yang dihasilkan selama tahun 1973 di USA kira-kira tiga kali lebih besar dari jumlah material yang dibawa Sungai Missisipi dan seperempat kali dari material padat yang berasal dari sungai-sungai di dunia ini.

Selanjutnya, penelitian tentang endapan sedimen dapat melengkapi data penting yang berhubungan dengan pengaruh manusia terhadap siklus geologi, merupakan masalah dasar dari krisis lingkungan kita. Aktivitas manusia seperti percobaan senjata nuklir yang dimulai pada tahun 1963, telah menyebarkan

isotop radioaktif dalam level rendah pada atmosfera dan hidrosfera, dan kemudian diendapkan dalam sedimen. Pada tahun 1963 radioaktif dalam sedimen ditandai dengan adanya sinar gamma tinggi yang merupakan hasil kerusakan radioaktif dari Cesium-37.

Salah satu masalah dari dampak polusi industri adalah sirkulasi logam berat secara alami. Sedimen sebagai wadah alami yang penting, banyak menerima bahan-bahan pencemar yang dipindahkan melalui perairan sungai, danau, waduk atau laut. Berdasarkan hal di atas maka sifat-sifat bahan pencemar dan sedimen merupakan bagian penting dalam penelitian lingkungan.

Proses sedimentasi yang terjadi di lingkungan khususnya lingkungan perairan laut akan merubah pola interaksi antara faktor biotik dan abiotik, dan hal ini akan menciptakan kondisi alam berbeda dari sebelum berlangsungnya proses tersebut. Besarnya peranan sedimentologi terhadap perubahan ekosistem laut dan sebaliknya fenomena alam yang mampu mempengaruhi karakteristik sedimen laut, maka pola saling mempengaruhi antara sedimen dengan lingkungan di mana sedimen itu terbentuk, diusulkan untuk menggunakan istilah "EKOLOGI SEDIMEN LAUT" terutama untuk semua penelitian sedimen yang berhubungan dengan lingkungan laut. Hasil penelitian ekologi sedimen telah memberikan gambaran hubungan antara aktivitas manusia dan dampak yang ditimbulkan terhadap lingkungan pengendapannya.

Ada beberapa contoh yang dapat menjelaskan hubungan antara berbagai aktivitas tersebut dengan karakteristik lingkungan pengendapan (sedimen), diantaranya berita yang dilaporkan oleh <http://kompas.com/kompas-cetak/0008/04/IPTEK/baru10.htm>. tanggal Jumat, 4 Agustus 2000, bahwa kapal riset milik Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (LIPI), Baruna Jaya VIII, yang melaksanakan survei di Laut Arafuru, sebelah selatan Papua, menemukan sedimentasi dalam jumlah besar yang tersebar dan tertumpuk pada sebuah cekungan di perairan tersebut. Hasil pemantauan menunjukkan, sedimen itu berasal dari limbah yang keluar dari muara Sungai Aikwa. Sungai ini diketahui telah lama menjadi tempat pembuangan tailing dari penambangan tembaga PT Freeport Indonesia di Timika, yang berada di bagian hulu.

Gambaran interaksi antara proses sedimentasi dan ekologi laut di beberapa wilayah pesisir dan laut dangkal telah dipublikasi oleh para peneliti diantaranya Shepard (1954), Folk dan Ward (1957), Matoba (1970), Boltovskoy dan Wright (1970), Davis (1978), Friedman and Sander (1978), Hatta dan Ujiie (1992), Rifardi and Ujiie (1993), Ujiie dan Rifardi (1993), Hohenegger dan Ball (1993), Mojares, *et al.* (1996), Debenay dan Redois (1996), Donnici *et al.* (1997), Harloff and Mackensen (1997), Donnici *et al.* (1997), Resig dan Cheong (1997), Rifardi dan Oki (1998), Mojares, *et al.* (1996), Rifardi *et al.* (1998), Rifardi and Oki (1998), Nuh (1999), Hendrianto (1999), Tomiyasu *et al.* (2000), Bramawanto *et al.* (2000),

Akimoto *et al.* (2002), Rifardi (2001a, b; 2002; 2003; 2006; 2008a dan b), Arifin (2008), Safitri *et al.* (2009), Rahmansyah dan Rifardi (2010), Rifardi *et al.* (2011) dan Rifardi (2011). Pembahasan dalam buku ini hanya difokuskan pada prinsip-prinsip dasar sedimentologi khusus sedimen modern (*recent sediment*) yang berkaitan dengan lingkungan dan sumberdaya lautan (Environmental and Marine Resources).

Selain itu, pada bab terakhir dianalisis dan dijelaskan bagaimana proses sedimentasi berkorelasi dengan kemampuan perairan berasimilasi, produktivitas perairan dan pemanasan global yang menjadi persoalan penting dalam abad ini. Hubungan tersebut mengkaji proses degradasi fungsi ekosistem perairan dan hilangnya kemampuan perairan dalam menyerap karbon khususnya CO₂, didasari hasil penelitian yang dilakukan oleh penulis dan beberapa mahasiswa bimbingan penulis pada tahun 2010.

II. FAKTOR-FAKTOR PEMBATAS

Faktor pembatas adalah faktor-faktor fisika dan kimia (komponen abiotik) yang menentukan apakah organisme (komponen biotik) dapat hidup dan berkembang dalam suatu ekosistem. Jadi istilah faktor pembatas digunakan bagi organisme untuk menentukan daya adaptasinya terhadap faktor fisika dan kimia lingkungan. Walaupun demikian dalam Bab ini istilah faktor pembatas juga digunakan untuk sedimen meskipun sedimen merupakan salah satu komponen abiotik dalam lingkungan.

Faktor pembatas yang dimasud dalam Bab ini adalah semua kekuatan atau energi baik bersumber dari komponen biotik maupun abiotik yang mempengaruhi dan menentukan keberadaan, karakteristik dan sebaran sedimen pada suatu lingkungan. Ada dua sumber kekuatan utama yang dapat dianggap sebagai faktor pembatas yaitu artifisial (antropogenik) dan alamiah. Sebaliknya sedimen yang terdapat pada lingkungan tersebut dapat memberikan informasi tentang perubahan lingkungan yang digunakan untuk memahami kekuatan-kekuatan antropogenik dan alamiah yang berperan dalam menyusun sedimen. Faktor-faktor pembatas sedimen diuraikan dalam subbab berikut.

2. 1. Sumber Sedimen

Asal partikel sedimen menentukan jenis-jenis partikel penyusun sedimen, berdasarkan jenisnya maka partikel sedimen dapat berasal dari sumber-sumber berikut: 1) partikel-partikel yang dierosi sebagai partikel padat yang berasal dari daratan disebut partikel *terrigenous*, 2) partikel-partikel piroklastik yang berasal dari letusan gunung dan 3) partikel-partikel yang berkembang melalui proses biologi dan kimia pada dasar perairan (Friedman dan Sander, 1978).

Sumber partikel yang berbeda menyebabkan keberadaan, karakteristik dan sebaran sedimen akan berbeda pula. Sedimen *terrigenous* disusun oleh partikel-partikel organik dan anorganik, partikel piroklastik meliputi fragmen batuan, kristal tunggal, dan gelas vulkanik, dan partikel-partikel hasil proses biologi dan kimia terdiri dari hasil sekresi organisme, degradasi cangkang, aktivitas mikroorganisme dan peletisasi. Hubungan antara sumber/asal sedimen dengan karakteristik jenis dan komposisi sedimen dasar perairan dibahas secara mendalam dalam Bab III.

2. 2. Morfologi Sedimen

Morfologi atau bentuk partikel sedimen mempengaruhi sebaran sedimen pada dasar perairan karena bentuk yang berbeda akan diendapkan pada jarak yang berbeda dari sumbernya oleh kekuatan energi transportasi yang sama. Dari

hasil pengujian kerikil yang berbentuk bulat atau butiran pasir, dapat diketahui sejarah proses transportasi seperti jarak yang dibutuhkan selama proses transportasi ini. Ada dua bentuk utama partikel sedimen yaitu angular adalah urutan tingkatan yang menunjukkan suatu partikel mendekati bentuk bola, dan roundness adalah bentuk partikel yang berhubungan dengan tingkat katajaman dan lekukan dari sisi-sisi dan sudut partikel (Friedman dan Sander, 1978). Bentuk partikel-partikel mempengaruhi model transportasi dalam air di mana bentuk ikut menentukan apakah partikel-partikel tersebut ditransportasi secara saltasi, traksi, *rolling* atau suspensi.

2. 3. Arus dan Gelombang

Arus dan gelombang merupakan faktor kekuatan utama yang menentukan arah dan sebaran sedimen. Kekuatan ini pula yang menyebabkan karakteristik sedimen berbeda sehingga pada dasar perairan disusun oleh berbagai kelompok populasi sedimen. Oleh sebab itu berbagai hasil penelitian menunjukkan bahwa sedimen dasar perairan terdiri dari partikel-partikel yang berbeda ukuran dan komposisi. Perbedaan ukuran partikel sedimen pada dasar perairan dipengaruhi juga oleh perbedaan jarak dari sumber sedimen tersebut. Secara umum partikel berukuran kasar akan diendapkan pada lokasi yang tidak jauh dari sumbernya, sebaliknya semakin halus partikel akan semakin jauh ditranspor oleh arus dan gelombang, dan semakin jauh diendapkan dari sumbernya.

Sebaran sedimen pantai atau transport sedimen pantai adalah gerakan sedimen di daerah pantai yang disebabkan oleh gelombang dan arus. Turbulensi dari gelombang pecah mengubah sedimen dasar (*bed load*) menjadi suspensi (*suspended load*). Gelombang pecah menimbulkan arus dan turbulensi yang sangat besar yang dapat menggerakkan sedimen dasar.

2. 4. Tekstur Sedimen

Berdasarkan kejadiannya, batuan sedimen dibedakan menjadi sedimen klastik dan non klastik. Batuan sedimen klastik adalah batuan sedimen yang terbentuk dari hasil litifikasi material-material hasil rombakan batuan yang telah ada sebelumnya. Sedangkan batuan sedimen nonklastik adalah batuan sedimen yang terbentuk dari material-material hasil aktivitas kimia (termasuk biokimia) dan biologis. Kedua mekanisme pembentukan batuan sedimen tersebut dikenal dengan istilah tekstur sedimen klastik dan nonklastik. Penekanan pada batuan sedimen yang bertekstur klastik adalah ukuran butir dan bentuk butir (Universitas Gajah Mada). Bentuk butir (morfologi sedimen) sebagai faktor pembatas telah dijelaskan pada subbab 2.2. Pada subbab ini akan dibahas ukuran butir sedimen sebagai faktor pembatas sebaran sedimen di dasar perairan.

Suatu endapan sedimen disusun dari berbagai ukuran partikel sedimen yang berasal dari sumber yang berbeda-beda,

dan pencampuran ukuran ini disebut dengan istilah POPULASI. Pergerakan udara dan air dapat memisahkan partikel berdasarkan ukuran mereka, menyebabkan endapan terdiri dari berbagai ukuran. Ada tiga kelompok populasi sedimen yaitu:

1. Gravel (kerikil), terdiri dari partikel individual: boulder, cobble dan *pebble*
2. *Sand* (pasir), terdiri dari: pasir sangat kasar, kasar, medium, halus dan sangat halus.
3. Mud (lumpur), terdiri dari *clay* dan *silt*.

Perbedaan karakteristik dan sebaran sedimen dasar perairan, diantaranya disebabkan oleh perbedaan ukuran dalam material induk. Selain itu ukuran partikel sedimen dapat menggambarkan: 1) perbedaan jenis, 2) ketahanan partikel terhadap *weathering*, erosi dan abrasi, dan 3) proses transportasi dan pengendapan (Friedman dan Sander, 1978). Ukuran butir partikel sedimen adalah salah satu faktor yang mengontrol proses pengendapan sedimen di perairan, semakin kecil ukuran butir semakin lama partikel tersebut dalam kolam air dan semakin jauh diendapkan dari sumbernya, begitu juga sebaliknya.

2. 5. Kimia Air

Pembentukan sedimen dikontrol oleh pH dan Eh, dan berbagai proses kimia terjadi pada larutan dalam sedimen khususnya proses yang mempengaruhi pH dan Eh. Proses-

proses kimia mempengaruhi proses pengendapan (sedimentasi) di perairan. Perubahan pH perairan mempengaruhi proses pelarutan dan presipitasi partikel-partikel sedimen. Reaksi kimia dalam sedimen berhubungan dengan pH khususnya kalsium karbonat yang terjadi sebagai partikel-partikel batuan dan semen. Reaksi kimia terjadi diantara partikel-partikel tersebut dengan air. Dalam lingkungan sedimen, Eh dan pH saling tergantung satu sama lainnya. Hubungan antara proses kimia dan pengendapan sedimen dibahas dalam Bab IV.

2. 6. Fisika Air

Suhu, salinitas dan densitas perairan mempengaruhi kecepatan tenggelam partikel sedimen (Lewis and McConchie, 1994), dan densitas suatu perairan ditentukan oleh suhu dan salinitas perairan tersebut (Millero and Sohn, 1992). Perbedaan proses sedimentasi antara satu tempat dengan lainnya di perairan disebabkan oleh karakteristik fisika dan kimia perairan yang berbeda. Rifardi (2008a) menemukan proses deposisi sedimen di perairan laut dangkal yaitu perairan Laut Paya pesisir Pulau Kundur Kabupaten Karimun Propinsi Kepulauan Riau Indonesia, dipengaruhi oleh suhu, salinitas dan densitas perairan.

Densitas berperan dalam menentukan distribusi suhu dan salinitas, selain itu distribusi vertikal salinitas mengontrol pencampuran air laut secara vertikal. Oleh sebab itu, densitas berguna untuk menguji tipe distribusi suhu dan salinitas.

Perbedaan antara evaporasi dan presipitasi yang terjadi di perairan mempengaruhi salinitas permukaan. Salinitas yang lebih tinggi dapat menyebabkan densitas lebih tinggi ketika suhu perairan lebih dingin. Hubungan antara suhu dengan proses pengendapan sebagai berikut: partikel dengan ukuran yang sama dideposisi lebih cepat pada suhu rendah dibandingkan dengan suhu tinggi.

2.7. Mekanisme Transpor Sedimen

Mekanisme transpor sedimen mengontrol keberadaan, karakteristik dan sebaran sedimen pada suatu lingkungan. Ada dua mekanisme transpor sedimen berlawanan yang di dasarkan atas dua jenis muatan yaitu:

1. Muatan tersuspensi, pada mekanisme ini kekuatan arus dari air atau udara menyebarkan partikel-partikel sedimen halus seperti lanau, lempung dan ukuran pasir, kemudian memindahkannya dalam aliran. Dengan kata lain partikel-partikel tersebut berada dalam kolom air.
2. Muatan pada lapisan dasar perairan atau muatan yang tidak secara terus menerus berada dalam bentuk suspensi dalam kolom air, seperti partikel-partikel yang lebih besar dan berat (*boulder, pebbles dan gravel*), di*rollingkan* (transport) sepanjang dasar perairan.

III. PARTIKEL SEDIMEN

Istilah partikel digunakan untuk semua material sedimen termasuk material yang ditransportasi secara fisika sebagai material padat sebelum diendapkan. Dalam hal ini termasuk transportasi secara fisika material-material yang berkembang/tumbuh secara biologi dan kimia di dasar perairan sampai pada tempat pengendapan akhir.

Dalam penerapannya, kita menggunakan partikel-partikel sebagai pecahan padat dari endapan yang lebih tua dan partikel yang bukan merupakan pecahan padat dari endapan yang lebih tua. Partikel-partikel yang bukan merupakan pecahan padat dari endapan yang lebih tua adalah partikel-partikel yang berasal dari letusan gunung berapi dan yang berasal dari proses biologi dan kimia dan akhirnya ditransportasi secara fisika sebagai material padat (Friedman dan Sander, 1978), dan partikel-partikel sedimen tersebut diuraikan dalam beberapa sub bab dibawah ini.

3. 1. Jenis-Jenis Partikel Sedimen

Partikel sedimen dapat dikelompokkan menjadi dua kelompok besar yaitu:

1. Pecahan padat dari endapan yang lebih tua.
2. Partikel yang bukan merupakan pecahan padat dari endapan yang lebih tua

3.1.1. Pecahan Padat dari Endapan Yang Lebih Tua

Semua partikel yang dierosi sebagai partikel padat yang berasal dari daratan disebut partikel *terrigenous*. Partikel *terrigenous* terdiri dari dua kelompok yaitu: 1) material anorganik dan 2) material organik atau *carbonaceous*. Partikel *terrigenous* terlepas dari batuan induknya disebabkan oleh beberapa proses antara lain: 1) *weathering*, 2) terjadinya bencana yang menimbulkan kerusakan, dan 3) aktivitas glasial.

Partikel Terrigenous Anorganik

Sedimen *terrigenous* anorganik terdiri dari material batuan yang telah terlepas dan hasil perubahan kedua mineral *clay* yang dibentuk selama proses *weathering* secara kimia. Sedimen *terrigenous* anorganik terdiri dari: fragmen batuan, kuarsa, *felspar*, mineral-mineral berat, dan lapisan *silikat lattice*.

Fragmen batuan merupakan partikel yang mempunyai ciri-ciri yang dapat dikenal dari endapan induknya disebut. Kualifikasi ciri-ciri yang dapat dikenal ini penting karena dalam pengertian yang luas, sedimen *terrigenous* anorganik terdiri dari fragmen batuan sebelumnya. Tetapi sewaktu endapan induk hancur menjadi individu-individu mineral, ciri-ciri tekstur endapan induk tidak dapat dikenal. Oleh karena itu partikel-partikel yang terdiri dari individu mineral tidak digolongkan ke dalam fragmen batuan.

Faktor-faktor yang mempengaruhi ketahanan fragmen batuan antara lain: jenis batuan, ruangan yang ada fragmen

tersebut, jenis *weathering*, aktivitas selama proses transportasi, proses *weathering* pada endapan, tekanan yang ditimbulkan selama proses sementasi. Beberapa fragmen batuan dapat dibedakan dengan mudah dan dapat diidentifikasi melalui peninjauan lapangan. Sebaliknya ada fragmen batuan yang tidak bisa diidentifikasi di lapangan, dan hanya bisa diidentifikasi dengan menggunakan mikroskope binokuler.

Kuarsa merupakan mineral yang dominan dalam sedimen *terrigenous*, hal ini disebabkan oleh hasil proses *weathering* secara kimia. Selama proses *weathering* tersebut *felspar* merupakan bagian yang dominan dalam batuan beku dan metamorfose, dirubah menjadi mineral-mineral lempung (*clay*), dan kuarsa terakumulasi dalam sisa proses *weathering*. Ukuran partikel-partikel kuarsa dalam batuan induk berkisar 0,5-1,0 m, sedangkan dalam sedimen *terrigenous* kecil dari 0,06 mm. Asal partikel kecil tersebut tidak diketahui secara pasti karena partikel-partikel ini merupakan hasil grinding yang terjadi di bawah *glacier* atau dalam batuan yang longsor. Partikel-partikel kuarsa yang berbentuk bulat menggambarkan asal lingkungan pengendapan yang lebih tua. Partikel kuarsa yang mempunyai bentuk lingkaran berasal dari tanah, batuan vulkanik dan dari *felspar* batuan *metamorfik*.

Feldspars tidak pernah dominan dalam endapan sedimen, dan diduga hanya 10-15% dari sedimen *terrigenous* modern. Meskipun feldspars membentuk kelompok dominan batuan pembuat mineral silikat, dan dalam batuan induk. Proses

weathering kimia yang intensif dapat menyebabkan hancurnya feldspars. Oleh sebab itu, feldspars dalam sedimen *terrigenous* dapat berfungsi sebagai indeks komposisi kematangan.

Studi tentang mineral-mineral berat memerlukan berbagai macam teknik pemisahan, pembersihan, dan bantalan. Mineral berat dapat dipisahkan dari mineral ringan dengan cara mendulang dalam air atau dengan sistem tenggelam-apung dalam larutan, corong pemisah dan sentrifuge. Mineral berat terdiri dari pasir dengan persentase berkisar 1-2% dari berat, tetapi dalam pasir dan diantara pasir yang berbeda, proporsi mineral berat ke mineral ringan berubah-ubah. Ukuran partikel-partikel sedimen berkurang sedangkan proporsi mineral berat bertambah. Pada beberapa pasir, mineral-mineral berat dikonsentrasikan melalui berbagai proses mekanik untuk membentuk lapisan mulai dari beberapa milimeter sampai puluhan sentimeter tebalnya di mana mereka terdiri dari 50% atau lebih dari total.

Ada kelompok mineral lain dari sedimen *terrigenous* yang cenderung membentuk lapisan dengan berbagai ukuran. Penelitian dengan sinar X menunjukkan bahwa lapisan-lapisan ini disebut lembaran pembentuk kristal *lattices*.

Partikel terrigenous organik

Partikel-partikel bahan organik padat terdiri dari dua jenis yaitu: 1) material padat yang mengandung bahan organik berasal dari formasi yang lebih tua dan 2) detritus tanaman modern.

Material padat yang mengandung bahan organik berasal dari formasi yang lebih tua meliputi: 1) hancuran batubara bituminous dan 2) anthracite. Bituminous merupakan mineral yang mempunyai bitumen, dan bitumen adalah suatu istilah yang dipakai untuk bahan-bahan yang mudah menyala tersusun dari campuran hidrokarbon dari proses oksigenasi. Anthracite adalah batubara yang mempunyai tingkatan metamorfose yang tertinggi dan dicampur dengan kandungan karbon antara 92-98%.

Pada daerah yang mempunyai curah hujan tinggi, tanaman-tanaman modern membentuk suatu penutup yang kontinyu. Di daerah yang beriklim sedang, jumlah daun yang gugur pada setiap musim banyak sekali. Umumnya tanaman tersebut menjadi lapisan humus, tetapi banyak juga daun-daun yang gugur itu menjadi bagian dari endapan yang ada di kolam, rawa, danau, sungai dan laut. Detritus tanaman lainnya meliputi ranting, batang, benih yang berukuran mikroskopis, dan tepung sari.

3.1.2. Partikel yang Bukan Merupakan Pecahan Padat dari Endapan yang Lebih Tua

Partikel-partikel ini meliputi: 1) partikel-partikel piroklastik yang berasal dari letusan gunung dan 2) Partikel-partikel padat yang berkembang melalui proses biokimia dan kimia pada dasar perairan.

Partikel-Partikel Piroklastik

Partikel piroklastik yang berasal dari letusan gunung meliputi fragmen batuan, kristal tunggal, dan gelas vulkanik. Partikel ini dikelompokkan bersama-sama dalam kelompok utama yaitu lithic, kristal dan vitric. Fragmen batuan terdiri dari batuan vulkanik yang mengeras atau jenis batuan apa saja yang dilalui gas vulkanik dan larva pada permukaannya. Kristal tumbuh/berkembang dalam magma, sedangkan partikel gelas merupakan blebs larva yang mencair menjadi keras secepat ion mereka tidak membentuk kristal *lattice*.

Partikel-partikel piroklastik ditransportasi melalui tiga cara yaitu:

1. aliran partikel panas sepanjang tanah yang dilaluinya (aliran abu).
2. tersuspensi dalam atmosfera
3. tersuspensi dalam stratosphera

Partikel-Partikel Yang Tumbuh di Dasar Perairan Sebagai Hasil Sekresi Biologi atau Precipitasi Kimia.

Partikel yang berkembang sebagai partikel padat pada lingkungan pengendapan merupakan suatu hasil dari sekresi biologi atau presipitasi kimia. Partikel ini terdiri dari: 1) skeletal debris: material yang berasal dari organisme dan terdiri dari bagian yang keras hasil sekresi organisme tersebut, 2) kalsium karbonat yang bukan cangkang (skeletal), 3) mineral-mineral yang menguap, ditransportasikan secara fisika, 4) *glauconites*: mineral hijau yang berhubungan erat dengan mika.

Skeletal Debris

Secara umum material dari skeletal hasil sekresi organisme hidup, disusun oleh: kalsium karbonat dan silikat. Berdasarkan ukurannya skeletal kalsium karbonat dibedakan menjadi pasir atau kerikil dan lumpur. Banyak skeletal debris karbonat termasuk skeleton kalsium karbonat yang disekresi organisme seperti foraminifera, dan moluska serta juga bagian patahan yang keras disekresi oleh organisme ini atau organisme lain.

Biasanya organisme yang telah mati memberikan kontribusi material skeletal mereka pada sedimen. Meskipun telah mati, asal material tersebut dapat diketahui. Ostracoda dan Trilobites membuang kerangka mereka selama proses molting. Foraminifera yang bersel satu dapat membuat cangkang sepanjang hidupnya. Cangkang-cangkang inilah yang terdapat pada sedimen laut. Kadang-kadang foraminifera yang telah mati cangkangnya tenggelam ke dasar laut dan menjadi bagian dari sedimen dasar laut.

Kelompok organisme lain yang memberikan kontribusi besar pada pasir-pasir skeletal, tanpa harus mati dulu adalah terumbu karang. Banyak jenis ikan yang hidup di sekitar terumbu karang dan beberapa spesies seperti Ikan Parrot dan Ikan Trigger mengambil terumbu tersebut sebagai makanannya. Ikan-ikan predator ini menggigit terumbu karang, dan mencerna bahan organik, kemudian membuang bagian-bagian partikel karbonat yang tidak dapat dicerna.

Banyak pasir skeletal tidak termasuk foraminifera dan terumbu karang, terakumulasi hanya setelah organisme yang mensekresi skeletal tersebut mati, contohnya moluska dan branchiopoda, mensuplai pasir skeletal non koral. Untuk mengambil bagian dalam yang lunak dari moluska, organisme predator seperti gastropoda melubangi cangkang moluska tersebut. Setelah moluska mati, banyak organisme pembor lainnya melubangi cangkang tersebut seperti sponge, algae dan fungi. Beberapa material skeleton menjadi pasir tanpa melalui proses kerusakan secara biologi. Beberapa bagian skeleton mudah dideteksi, dan yang mati biasanya tersebar pada daerah yang jauh dari skeletal lainnya.

Organisme yang memberikan kontribusi paling besar partikel-partikel skeletal silikat adalah diatom dan radiolaria, sedangkan sponge dan dinoflagellate hanya mengontribusi partikel ini dalam jumlah kecil. Skeletal silikat menyusun 40% sedimen pada dasar laut, dan kelimpahan skeletal silikat dipengaruhi oleh tiga faktor yaitu: 1) kecepatan produksi cangkang silikat, 2) proporsi cangkang ini dalam partikel *terrigenous* dan karbonat, 3) pelarutan cangkang silikat pada dasar laut.

Partikel Padat Nonskeletal

Partikel-partikel padat nonskeletal tersusun dari kalsium karbonat meliputi: *Pellet*, *peloids*, oods, *grapestone*, *interclasts* dan *Pisolites*. Partikel-partikel kalsium karbonat berukuran pasir yang berbentuk bola dan elips disebut *Pellet*. Secara umum

Pellet homogen dan tanpa struktur. *Pellet* dibentuk melalui organisme pemakan endapan yang memakan lumpur. Mereka mencerna bahan organik lumpur dan mengeluarkan kapur lumpur yang tidak tercerna dalam bentuk *Fecal Pellet*. Dalam sedimen karbonat modern, *Pellet* umumnya berbentuk partikel tunggal. Hal ini disebabkan beberapa organisme dapat mengeluarkan ribuan *Pellet*.

Istilah *peloids* dimasukkan untuk semua partikel yang mirip *Pellet*. Tidak semua partikel yang menyerupai *Pellet* adalah *Fecal* asli, beberapa diantara mereka adalah kumpulan kapur lumpur yang asli ketika kapur lumpur tersebut dikeringkan melalui pemanasan atmosfera. Sewaktu kapur lumpur dikeringkan, terjadi proses pengeringan bentuk *cracks* (disebut dengan *cracks* lumpur), dan bagian kecil yang sumbing dari pengeringan lumpur tersebut menjadi bulat dan menyerupai partikel berukuran pasir yang berbentuk *Pellet*. *Fecal Pellet* dan kumpulan kapur yang berbentuk *Pellet* umumnya sulit dibedakan. Nama umum dari bagian-bagian lumpur yang hancur disebut *intraclast*. Banyak *peloids* berbentuk partikel yang berukuran pasir dan *interclasts* bulat.

Nama *ooids* berasal dari bahasa Greek yang artinya telur atau menyerupai telur karena partikel ini mirip dengan telur ikan dan *ooids* terdiri dari *araganite*. Biasanya mereka berbentuk bola dan ellips. *Ooids* hanya terbatas pada partikel-partikel yang berukuran lebih kecil dari 2 mm; jika lebih besar dan mempunyai struktur internal yang sama maka partikel-partikel

tersebut dikenal dengan nama *Pisolites*. Umumnya *ooids* modern terjadi pada daerah intertidal di mana gelombang memecah. Banyak ahli geologi menganggap bahwa dalam arus turbulenta, lingkungan perairan dangkal, *ooids* terbentuk secara inorganik. Diduga karbon dioksida dipindahkan dari kalsium karbonat dan kalsium karbonat ini diendapkan sebagai satu lapisan dalam partikel yang ada.

Partikel-partikel yang dinamakan *grapestonea (lumps)* adalah kelompok partikel-partikel skeletal, *ooids*, atau *Pellet* yang telah tersemem/terekat secara bersama. Istilah *grapestones* (batu anggur) berasal dari hasil observasi partikel-partikel ini di bawah mikroskop binokuler, yang menunjukkan adanya ikatan-ikatan berbentuk anggur. *Grapestones* terbentuk melalui pengendapan partikel-partikel yang tersemem di daerah di mana terjadinya pengadukan dasar perairan dalam periode singkat yang diikuti oleh diperpanjangnya periode stabil dasar perairan, dan alga hijau-biru membantu pengendapan semen-semen ini.

Intraclasts adalah partikel-partikel yang berukuran pasir atau lebih besar, secara tekstur analog dengan hancuran fragmen batuan dari material-material yang keras yang terakumulasi dalam daerah pengendapan. Intra artinya adalah dasar, clasts artinya hancuran/patah. Intraclasts terdiri dari berbagai ukuran dan bentuk, banyak yang berbentuk angular dan mempunyai diameter lebih dari 2 mm. Intraclasts berukuran pasir yang berubah menjadi bulat dianggap sebagai *peloids*.

Partikel-partikel berbentuk bulatan dan ellips yang diameternya lebih 2 mm disebut *Pisolites*. Pemisahan antara *Pisolites* dengan *ooids* adalah ukuran; *ooids* lebih kecil dari 2mm. Ada dua jenis *Pisolites* yang umum dijumpai yaitu: a) pisolite algae dikenal dengan nama oncolite, dan b) pisolite caliche dikenal dengan nama *pisolite vadose*

Pisolite algae terdiri dari berbagai partikel, dan ketika partikel-partikel tersebut (umumnya skeletal) *rolling* di atas permukaan sedimen, algae hijau-biru menempel dan melapisi partikel-partikel ini dengan *concentric laminae*. Pisolite algae dan *pisolite vadose* agak berbeda, di mana pisolite algae terdiri dari kalsit magnesium tinggi, sedangkan *pisolite vadose* terdiri dari kalsit magnesium rendah.

3. 2. Bentuk Partikel Sedimen

Friedman and Sander (1978) menjelaskan bahwa bentuk partikel sedimen adalah bentuk partikel secara geometri dan bentuk ini dapat menggambarkan: 1) asal partikel, 2) sejarah partikel, dan 3) struktur *lattice* internal partikel. Partikel-partikel yang diendapkan oleh organisme, bentuknya bervariasi dan mulai dari bentuk yang sederhana sampai pada yang paling kompleks. Contoh *cocolith* mensekresi partikel yang berbentuk piring, sedangkan fusulinids mensekresi partikel yang berbentuk kincir dan *crinoid* berbentuk kancing (tombol). Beberapa cangkang terjadi sebagai partikel memiliki bentuk ordinat yang indah, sedangkan yang lain berbentuk sederhana di mana ada

yang berbentuk simetris dan asimetris. Partikel-partikel *terrigenous* yang dihasilkan oleh proses *weathering* lapisan batuan memiliki bentuk yang menggambarkan asal mereka.

Bentuk-bentuk partikel seperti lemping-lemping batuan sedimen, pecahan-pecahan, *joints* atau bidang datar, mengalami perubahan secara drastis selama proses transportasi. Selama proses transportasi, partikel-partikel ini bertubrukan satu dengan lainnya sehingga sisi/sudut partikel menjadi rusak yang akhirnya merubah bentuk dari siku-siku menjadi bulat. Dengan pengujian kerikil yang berbentuk bulat atau butiran pasir, dapat diketahui sejarah proses transportasi seperti jarak yang dibutuhkan selama proses transportasi ini.

Kualitas informasi terhadap proses dapat diperoleh dari bentuk partikel-partikel ini. Kerikil yang mengalami proses turbulensi tinggi pada daerah pantai mempunyai bentuk bulat. Ada beberapa faktor yang menentukan perubahan partikel yang mengalami abrasi selama proses transportasi terjadi, yaitu: 1) bentuk awal sewaktu terlepas dari lapisan batuan, 2) komposisi; apakah satu partikel terdiri dari satu atau beberapa mineral atau fragmen batuan, 3) kekerasan dan kerapuhan partikel, 4) bagian-bagian turunan seperti patahan, *joints*, pecahan, 5) ukuran, 6) sumber transportasi, dan 7). kekuatan transportasi, termasuk jarak dan energi dari sumber transportasi.

Komposisi partikel merupakan salah satu variabel yang dapat menentukan bentuk partikel. Fragmen batuan hancur menjadi komponen-komponen, di mana partikel-partikel lunak

berubah menjadi bentuk bulat lebih cepat dari partikel keras, dan partikel-partikel yang mudah rusak menjadi pecah. Partikel-partikel berukuran besar seperti *pebble* (kerakal) lebih kuat dan tahan terhadap abrasi selama berlangsungnya proses transportasi dalam air dari pada partikel-partikel yang berukuran kecil. *Pebble* pada pantai yang berenergi tinggi menjadi subjek yang mengalami erosi lebih tinggi dan oleh karenanya terjadi perubahan bentuk, jika dibandingkan dengan *Pebble* yang terdapat pada pantai berenergi rendah. Salah satu faktor yang termasuk dalam proses pembentukan partikel-partikel berukuran besar adalah jarak perjalanan partikel tersebut dari asalnya. Partikel *pebble* yang mengalami benturan dengan batuan keras dalam proses transportasi akan menghasilkan bentuk yang berbeda dengan partikel yang berbenturan dengan batuan lunak.

Sebagian bentuk partikel-partikel mempengaruhi model transportasi dalam air di mana bentuk ikut menentukan apakah partikel-partikel tersebut ditransportasi secara *rolling* atau tersuspensi. Selama proses pengendapan melalui air, partikel berbentuk tongkat mengendap lebih cepat dari bentuk piring walaupun mempunyai volume dan densitas sama. Ada dua konsep penting yang berhubungan dengan bentuk yaitu: 1) *sphericity* dan 2) *roundness*.

3. 2. 1 Sphericity

Sphericity adalah suatu urutan tingkatan yang menunjukkan suatu partikel mendekati bentuk bola. Secara

teoritis, Sphericity (Ψ) adalah perbandingan antara permukaan partikel (A_p) dengan permukaan sphere (bulat) yang mempunyai volume (A_s).

$$\Psi = \frac{A_p}{A_s}$$

Dalam prakteknya, permukaan partikel yang tidak beraturan hampir tidak mungkin untuk dapat diukur. Oleh sebab itu cara yang lebih mudah untuk mengukur volumenya adalah dengan cara menenggelamkan ke dalam air, kemudian mendefinisikannya sebagai Sphericity (Ψ_0) yaitu:

$$\Psi_0 = \sqrt[3]{\frac{V_p}{V_{cs}} \left(\frac{V_p}{V_{cs}} \right)^{\frac{1}{3}}}$$

V_p adalah volume partikel, V_{cs} adalah volume sphere terkecil yang paling dekat pada partikel tersebut. Pengukuran sphericity harus mempertimbangkan tingkah laku hidraulik dari partikel-partikel tersebut.

3. 2. 2 Roundness

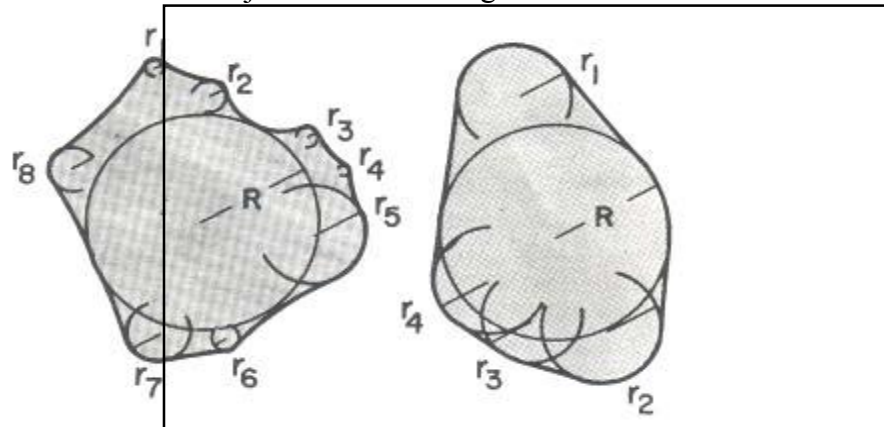
Roundness adalah bentuk partikel yang berhubungan dengan tingkat katajaman dan lekukan dari sisi-sisi dan sudutnya. *Roundness* secara geometry adalah *sphericity* yang independen. *Roundness* (P) merupakan hubungan antara jari-jari individual sisi dan sudutnya (r_i), jumlah sudut yang diukur

(N), dan jari-jari maksimum dari lingkaran tempat pengukuran (R), untuk jelasnya lihat Gambar 3. 1.

$$P = \frac{\sum(r_i/N)}{R}$$

Atau

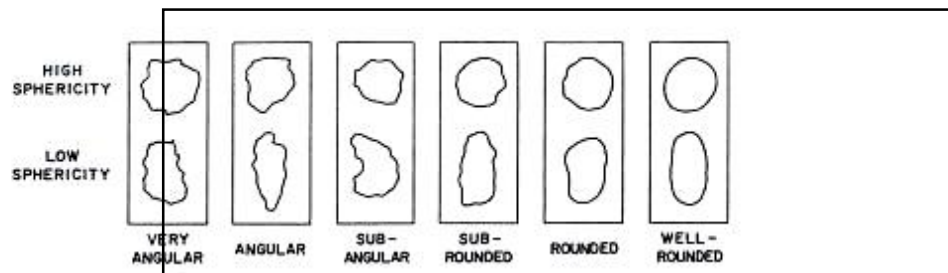
$$\text{Roundness} = \frac{\text{Rata-rata jari-jari sisi dan sudut}}{\text{Jari-jari maksimum lingkaran}}$$



Gambar 3. 1. Sayatan/potongan melintang partikel sedimen menunjukkan jari-jari sudut (r1, 2,..), dan Jari-jari maksimum (R), Krumbein dalam Friedman dan Sander (1978)

Roundness pebble ditunjukkan untuk perubahan yang terjadi pada hilir sungai, contoh *pebble* yang berbentuk angular (bersiku-siku) pada daerah hulu sungai berubah menjadi bentuk round (bulat) pada bagian hilir. Skala roundness berkisar 1 sampai 0, di mana semakin tinggi angka skala menunjukkan semakin bulat partikel tersebut. *Roundness* partikel-partikel yang berukuran pasir sangat mudah diukur yaitu dengan cara

mencocokkan outline partikel yang akan diukur dengan dua set gambar standart partikel pasir, seperti pada Gambar 3. 2.



Gambar 3. 2. Sketsa tingkatan roundness dan sphericity partikel sedimen berukuran pasir (Power dalam Friedman dan Sander, 1978)

Pada Gambar 3. 2. dapat dilihat bahwa masing-masing pasangan mempunyai sphericity yang berbeda, dan secara visual terdapat 6 kelas skala roundness yaitu:

1. Very angular
2. Angular
3. Sub angular
4. Sub rounded
5. Rounded
6. Well rounded

Angular adalah bentuk partikel-partikel sedimen yang menggambarkan tidak terjadinya abrasi atau abrasi terjadi dengan kekuatan yang kecil sekali terhadap sisi dan sudut partikel tersebut. *Roundness* partikel kuarsa yang berukuran pasir merupakan proses lambat yang tidak kelihatan; rounding

berkurang dengan berkurangnya ukuran. Partikel pasir halus dan lempung cenderung dalam bentuk *angular*. Hasil perbandingan *roundness* pasir daerah pantai dan *dune* menunjukkan bahwa partikel di daerah *dune* lebih *roundness* dari pantai. Perbedaan ini disebabkan oleh angin yang secara selektif memindahkan partikel pasir yang lebih bulat jauh dari daerah pantai. Oleh sebab itu, adanya perbedaan *roundness* lebih disebabkan oleh hasil *sorting* dari pada hasil abrasi.

IV. PROSES SEDIMENTASI

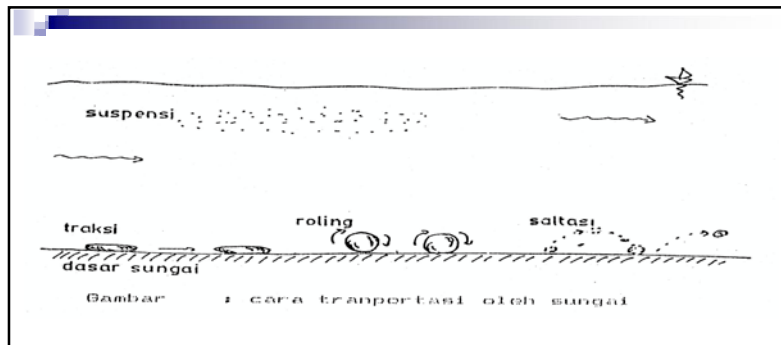
Sedimentasi adalah proses pengendapan sedimen, termasuk semua aktivitas yang mempengaruhi dan merubah sedimen menjadi batuan sedimen. Batuan sedimen merupakan batuan yang terbentuk dari akumulasi material hasil rombakan batuan yang sudah ada sebelumnya atau hasil aktivitas kimia maupun organisme, yang diendapkan pada cekungan sedimentasi yang kemudian mengalami pembatuan (Universitas Gajah Mada). Pengertian proses sedimentasi meliputi proses transportasi dan pengendapan sedimen, termasuk dalam hal ini semua sumber energi yang mampu mentranspor dan mengendapkan seperti angin, air, es, dan gravitasi (Selly, 1976). Ada tiga proses yang mempengaruhi sedimen yaitu proses fisika, biologi dan kimia (Friedman dan *Sander*, 1978).

4. 1. Proses Fisika

Bab ini membahas proses fisika yang berperan dalam mentranspor dan mengendapkan sedimen, terutama hubungan antara proses dan produk. Dengan dipahami proses ini diharapkan kita mempunyai dasar yang kuat untuk menjelaskan kondisi-kondisi fisika di mana sedimen itu diendapkan. Salah satu karakteristik sedimen yang digunakan untuk menerjemahkan lingkungan pengendapan adalah sebaran ukuran butir.

Transportasi dan pengendapan sedimen dipengaruhi oleh hukum-hukum fisika, terutama sekali peranan fluida dalam transpor sedimen yaitu fluida mentransfer energi untuk partikel-partikel dan bagaimana metode transpor, suspensi dan traksi sedimen. Untuk memindahkan partikel yang tertahan, fluida harus mentransfer energi dalam jumlah yang cukup untuk memaksa partikel-partikel tersebut terlepas dan perpindahan partikel ini bisa dalam bentuk *traksi*, *saltasi*, *rolling* dan *sliding*. Ilustrasi cara transpor sedimen dapat dilihat dari Gambar 4. 1. Fluida dapat menggerakkan partikel secara langsung dengan berbagai cara diantaranya:

1. fluida "menciptakan kekuatan/energi".
2. merubah tekanan dalam fluida dan memicu hubungan dengan gelombang.
3. dampak fluida
4. dukungan dari aliran dalam arus turbulen



Gambar 4. 1. Ilustrasi mekanisme transpor sedimen (Universitas Gajah Mada).

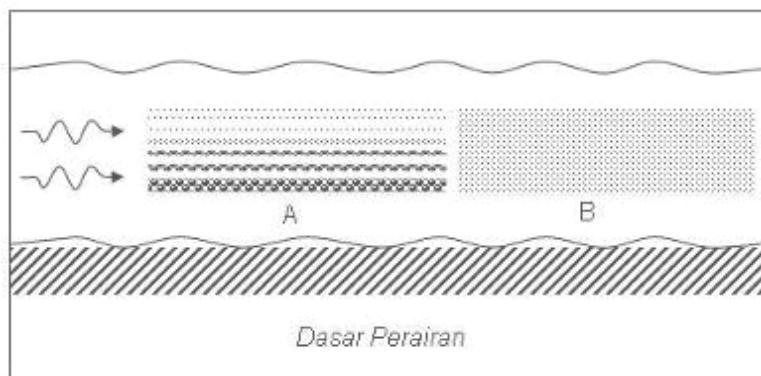
Arus mentranspor sedimen secara fisika melalui dua mekanisme berlawanan yang di dasarkan atas dua jenis muatan yaitu:

1. Muatan tersuspensi, kekuatan arus dari air atau udara menyebarkan partikel-partikel sedimen halus seperti lanau dan lempung dan ukuran pasir, kemudian memindahkan dalam aliran
2. Muatan pada lapisan dasar perairan atau muatan yang tidak secara terus menerus berada dalam bentuk suspensi atau larutan, seperti partikel-partikel yang lebih besar dan berat (*boulder, pebbles dan gravel*) dirollingkan sepanjang dasar perairan.

Kekuatan dasar untuk mentranspor muatan tersuspensi adalah aliran turbulensi. Transportasi padatan tersuspensi terjadi dalam aliran dan arus air serta dalam atmosfer. Partikel tersuspensi dalam air disebut dengan suspensi *aqueous*. Beberapa muatan tersuspensi *aqueous* secara aktif saling menukar muatan (pasir halus, pasir sangat halus dan lempung kasar) dengan substrat mereka. Kecepatan tenggelam pasir halus air 4 cm/detik. Oleh sebab itu untuk menjaga agar pasir halus tetap berada dalam suspensi maka kecepatan arus harus ± 50 cm/detik.

Suatu muatan tersuspensi yang bersifat turbulensi akan mengalami proses yang saling menukar antara muatan tersebut dengan substratnya. Sebagai akibatnya jumlah dan sebaran

ukuran partikel dari muatan tersebut akan berkurang menuju ke lapisan atas, suspensi ini disebut **Suspensi Bertingkat** (*Graded Suspension*). Sebaliknya ada suspensi bebas di mana mereka tidak saling berinteraksi dan menukur muatan dengan substratnya, sehingga jumlah dan ukuran partikel hampir sama antara lapisan, suspensi ini disebut Suspensi Seragam (*Uniform Suspension*). Perbedaan kedua suspensi ini dapat dilihat pada Gambar 4. 2.



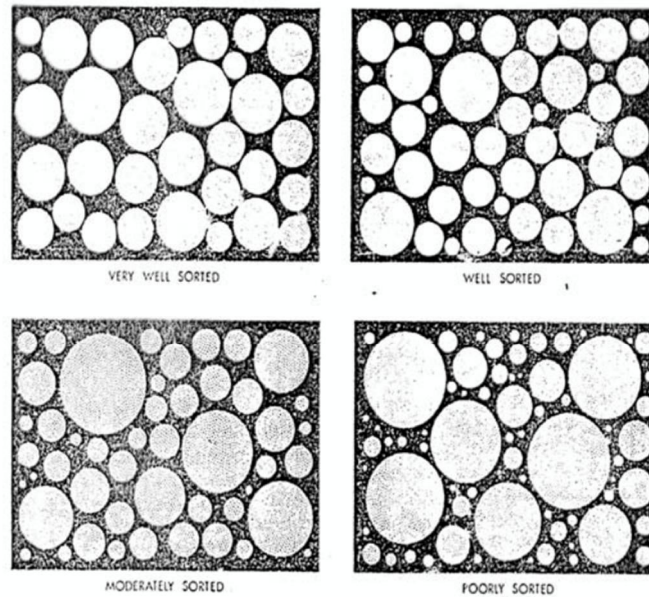
Gambar 4. 2. Suspensi bertingkat (A) dan suspensi seragam (B)

Muatan tersuspensi juga terjadi di atmosfer, dan suspensi ini dapat dibedakan menjadi suspensi pada ketinggian tinggi dan suspensi pada ketinggian rendah. Prinsip dasar yang mengatur suspensi partikel di udara (*Eolian Suspension*) sama dengan suspensi *aqueous* yaitu sama-sama terdiri dari partikel halus. Partikel yang tersuspensi dalam bentuk suspensi *eolian* tergolong dalam *well sorted sediment*, hal ini disebabkan oleh viskositas udara rendah. *Well sorted sediment* adalah sebaran

populasi partikel sedimen yang mempunyai ukuran yang hampir sama, dan mengindikasikan sumber energi yang mentranspor partikel tersebut kekuatannya hampir sama. Hasil analisis ukuran butir partikel sedimen yang tersuspensi dalam hembusan angin menunjukkan partikel berbutiran halus dan *poorly sorted sediment*. *Poorly sorted sediment* adalah sebaran populasi partikel sedimen yang mempunyai perbedaan ukuran yang mencolok, dan mengindikasikan sumber energi yang mentranspor partikel tersebut kekuatannya tidak stabil.

Sorting adalah pemilahan partikel sedimen yang menggambarkan tingkat keseragaman butiran (Gambar 4. 3), dan dapat diklasifikasikan sebagai berikut:

1. *Very well sorted* (terpilah sangat baik): besar butir hampir sama
2. *Well sorted* (terpilah baik): besar butir relatif sama
3. *Moderately well sorted* (terpilah agak baik): besar butir agak berbeda
4. *Moderately sorted* (terpilah sedang): besar butir tidak begitu sama
5. *Poorly sorted* (terpilah buruk): perbedaan besar butir cukup mencolok
6. *Very poorly sorted* (terpilah sangat buruk): perbedaan besar butir sangat mencolok
7. *Extremely sorted* (terpilah amat sangat buruk): perbedaan besar butir amat sangat mencolok

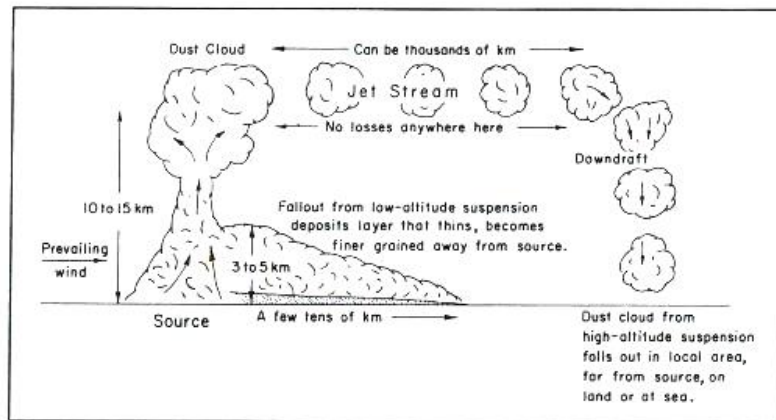


G mbar 4. 3. Klasifikasi sorting sedimen

Suspensi *eolian* terjadi pada dua ketinggian yang berbeda yaitu : 1) suspensi pada ketinggian rendah dan 2) suspensi pada ketinggian tinggi. Perbedaan kedua tipe suspensi ini adalah suspensi pada ketinggian rendah hanya terjadi pada ketinggian 3-5 km, sedangkan suspensi pada ketinggian tinggi terjadi pada ketinggian 10-15 km seperti pada Gambar 4. 4

Dalam suspensi pada ketinggian rendah, material tersuspensi dihembus ke atas oleh angin permukaan yang kuat dan awan yang timbulkan oleh letusan gunung api. Suspensi tipe ini dapat menggambarkan adanya hubungan yang jelas antara daerah asal partikel tersuspensi dan daerah pengendapan. Salah satu ciri-ciri endapannya, ketebalan lapisan dan diameter

partikel sedimen menjadi lebih kecil dibandingkan dari daerah asalnya.



Gambar 4. 4. Skema dua tipe suspensi yang berbeda yaitu suspensi pada ketinggian rendah dan suspensi pada ketinggian tinggi (Friedman dan Sander, 1978)

Suspensi pada ketinggian tinggi adalah suspensi *eoion* yang bergerak dalam arus jet, seperti percobaan senjata nuklir dan letusan gunung yang hebat. Umumnya muatan tersuspensi ini mengandung partikel sedimen yang berukuran pasir halus. Pada suspensi tipe ini, tidak menggambarkan adanya hubungan yang jelas antara endapan dan daerah asalnya.

Mekanisme transportasi partikel sedimen dilakukan dengan berbagai cara antara lain *traksi*, *saltasi*, *rolling*, dan *sliding* seperti yang dijelaskan sebelumnya. Traksi adalah bentuk sistem transpor sedimen yang memindahkan partikel

sedimen sebagai muatan lapisan dasar perairan. Selain itu traksi juga terjadi di atmosfer. Sedangkan partikel yang berpindah dari lapisan dasarnya secara melompat disebut *saltasi*.

4. 2. Proses Biologi

Aktivitas biologi mempengaruhi proses sedimentasi karena aktivitas ini dapat memberikan kontribusi pada lingkungan pengendapan dan menjadi bagian dari partikel-partikel sedimen. Beberapa aktivitas biologi tersebut antara lain:

1. Aktivitas organisme mensekresi cangkang yang mengandung kalsium karbonat.

Cangkang pada organisme berfungsi sebagai pelindung dan pendukung bagian organ tubuh yang lunak. Pada beberapa organisme ada cangkang bagian luar, umumnya terdiri dari kulit organisme tersebut, dan cangkang yang sering diendapkan adalah cangkang bagian luar mengandung kalsium karbonat. Pada laut dangkal, khususnya laut tropis, jumlah spesies dan genus organisme yang mampu mensekresi cangkang ini banyak sekali seperti koral dan alga.

2. Penghancuran cangkang-cangkang tersebut oleh organisme predator dan proses penghancuran lainnya untuk membentuk berbagai macam skeletal debris, termasuk pasir kapur dan lumpur kapur.

Hampir semua kalsium karbonat yang ditemukan di lautan berasal dari sekresi organisme yang hidup pada

perairan tersebut. Kalsium karbonat berfungsi sebagai cangkang dan merupakan baju pelindung bagi organisme tersebut. Organ tubuh lunak yang dilindungi oleh cangkang merupakan makanan yang penting bagi organisme lain. Oleh sebab itu organisme predator harus menghancurkan cangkang-cangkang tersebut untuk memperoleh makanan. Dalam skala besar predator ini memainkan peranan penting sebagai suplai sedimen dari hancuran cangkang-cangkang tersebut.

3. Organisme-organisme perangkap (*trap*) partikel-partikel sedimen

Faktor biologi lain yang penting dalam proses pengendapan sedimen adalah perangkapan (*trap*) dan pengaturan partikel-partikel sedimen yang dibawa oleh berbagai mikroorganisme. Proses perangkapan ini biasanya terjadi pada perairan dangkal seperti yang sering dilakukan oleh alga hijau-biru. Alga ini mengeluarkan semacam alas yang mengandung bahan organik bergetah yang disebut dengan mucilage (cairan pekat/getah). Ketika partikel-partikel berbutiran halus seperti kapur lumpur melalui alas ini, partikel tersebut diperangkap dan proses ini berlangsung terus menerus sehingga terbentuk suatu lapisan tipis yang menjadi bagian dari suatu endapan (sedimen).

Jenis organisme tumbuhan seperti mangrove juga berperan penting dalam proses sedimentasi. Akar

mangrove berfungsi sebagai penahan untuk menghalangi pergerakan padatan tersuspensi sehingga terbentuk lapisan atau tumpukan lumpur.

4. Proses peletisasi

Partikel-partikel kalsium karbonat berukuran pasir yang berbentuk bola dan elips disebut *Pellet*. Secara umum *Pellet* homogen dan tanpa struktur. *Pellet* dibentuk melalui organisme pemakan endapan yang memakan lumpur. Mereka mencerna bahan organik lumpur dan mengeluarkan kapur lumpur yang tidak tercerna dalam bentuk *Fecal Pellet*. Dalam sedimen karbonat modern, *Pellet* umumnya berbentuk partikel tunggal. Hal ini disebabkan beberapa organisme dapat mengeluarkan ribuan *Pellet*.

5. Proses pelubangan

Banyak organisme seperti cacing, moluska, krustasea dan insekta membuat lubang sedimen untuk mencari makan atau berlindung. Proses pelubangan ini dapat mempercepat *weathering* di daratan dan penghancuran struktur sedimen. Banyak sekali organisme yang melakukan pelubangan dalam spektrum yang cukup luas sehingga pelubangan menjadi proses biologi yang penting mempengaruhi sedimen yang diendapkan pada berbagai lingkungan baik di darat maupun di lautan.

Pelubangan memberikan informasi tentang tingkatan sejarah pengendapan, ketika pengendapan berjalan

lambat, organisme-organisme pelubang mampu mengaduk sedimen secara homogen sebaliknya ketika proses pengendapan cepat, organisme tersebut dapat melakukan pengadukan. Oleh sebab itu aktivitas pelubangan ini berguna sebagai indikator dari proses pengendapan, erosi dan waktu pelubangan. Pengadukan sedimen yang dilakukan oleh organisme dikenal dengan istilah *bioturbasi*.

Pada daerah pasang surut dan paparan benua, udang merupakan salah satu pembor yang aktif. Udang mampu melubang sedimen sampai pada ke dalaman 1 meter atau lebih dan memindahkan partikel-partikel di ke dalaman tersebut ke permukaan sehingga dapat membentuk lapisan baru setebal 6-50 cm. Begitu juga halnya dengan cacing secara terus menerus membalikkan tanah dan memindahkan tanah-tanah segar ke permukaan dengan rata-rata kecepatan 0,5 cm/ tahun. Selain secara mekanikal, cacing mampu merubah tanah secara kimia melalui proses pengunyahan dan pencernaan dalam tubuh.

6. Aktivitas mikroorganisme

Salah satu mikroorganisme yang berperan dalam proses sedimentasi adalah bakteri. Bakteri mempengaruhi proses *weathering* pada batuan. Organisme lain yang berperan dalam proses *weathering* adalah fungi, alga dan lumut (*lichen*).

4. 3. Proses Kimia

Proses kimia mempengaruhi proses pengendapan (sedimentasi) di perairan, dan proses ini dapat membentuk mineral-mineral yang akan menjadi bagian dalam endapan tersebut seperti *gypsum*, *felspar* dan *zeolites*. Salah satu proses kimia yang dapat membentuk mineral adalah *weathering*. Berbagai proses kimia terjadi pada larutan dalam sedimen khususnya proses yang mempengaruhi pH dan Eh.

Pembentukan sedimen dikontrol oleh pH, perubahan pH perairan mempengaruhi proses pelarutan dan presipitasi partikel-partikel sedimen. Reaksi kimia dalam sedimen berhubungan dengan pH khususnya kalsium karbonat yang terjadi sebagai partikel-partikel batuan dan semen. Selain itu proses perubahan fisika kimia yang terjadi setelah sedimen itu mengendap menjadi lebih penting karena reaksi kimia terjadi diantara partikel-partikel tersebut dengan air.

4. 3. 1. Pelarutan Kalsium Karbonat Sebagai Fungsi pH

Ketika pH perairan berkurang kalsium karbonat dilarutkan. Pada daerah panas, pH perairan laut dangkal $\pm 8,3$, dalam kondisi ini hampir tidak terjadi proses pelarutan partikel-partikel sedimen *aragonite* dan *calcite*.

Hasil penelitian yang dilakukan oleh Team Ekspedisi Challenger menunjukkan bahwa jumlah partikel kalsium karbonat dalam sedimen dasar laut berkurang dengan

bertambahnya ke dalaman. Pengurangan ini terjadi dengan cepat pada ke dalaman 4.000-6.000 meter. Hal ini menggambarkan kalsium karbonat dilarutkan karena konsentrasi CO₂ bertambah dengan bertambahnya ke dalaman perairan. Konsentrasi CO₂ dipengaruhi oleh aktivitas biologi karena CO₂ merupakan hasil oksidasi biologi ikatan karbon organik.

Secara umum massa air pada perairan yang lebih dalam berasal dari daerah kutub, dengan suhu yang lebih rendah dan kandungan CO₂ terlarut lebih tinggi. Panambahan konsentrasi CO₂ ini mengakibatkan rendahnya pH dan sebagai akibatnya kalsium karbaonat dilarutkan. Ke dalaman perairan di mana konsentrasi kalsium karbonat dalam sedimen berkurang sangat cepat sekali disebut dengan ke dalaman kompensasi karbonat (*Carbonate Compensation Depth: CCD*). Dengan kata lain ke dalaman kompensasi karbonat adalah suatu ke dalaman di mana kecepatan pelarutan kalsium karbonat sama dengan kecepatan suplainya.

4. 3. 2 Presipitasi Kalsium Karbonat Sebagai Fungsi pH

Meskipun permukaan air laut jenuh akan kalsium karbonat, ikatan organik mampu mencegah presipitasi kalsium karbonat karena ikatan organik ini dapat menjaga keseimbangan antara partikel-partikel karbonat dan air laut. Tetapi ketika ikatan organik berpindah reaksi menjadi tidak seimbang dan pada saat itulah kalsium karbonat dipresipitasikan. Ikatan

organik dapat berpindah sewaktu pH perairan tinggi, dan oleh karena itu presipitasi kalsium karbonat dikontrol oleh pH.

Proses biologi seperti proses fotosintesis mempengaruhi keseimbangan nilai pH di perairan karena proses ini membutuhkan CO_2 yang diambil dari perairan. Sebagai akibatnya pH perairan menjadi meningkat. Meskipun peningkatan nilai pH disebabkan oleh proses biologi yang akhirnya mempengaruhi presipitasi kalsium karbonat, presipitasi kalsium karbonat adalah suatu proses reaksi kimia anorganik.

Kalsit tidak larut dalam suasana alkali. Pada pH 9-10 hasil dari proses biologi, merupakan kondisi penting untuk pelarutan silika dan presipitasi kalsium karbonat secara serentak dalam perairan laut.

4. 3. 3. Reduksi dan Oksidasi (Eh)

Jenis proses lain yang mampu memodifikasi sedimen dalam lingkungan adalah proses oksidasi dan reduksi. Dalam lingkungan sedimen, Eh dan pH saling tergantung satu sama lainnya. Eh mengukur konsentrasi elektron dalam larutan dan pH adalah gambaran tentang konsentrasi ion-ion hidrogen atau proton. Banyak reaksi kimia di perairan tergantung dari Eh dan pH karena elektron menetralkan proton. Nilai Eh tinggi menggambarkan rendahnya konsentrasi elektron, dan hal ini biasanya diikuti oleh rendahnya nilai pH (konsentrasi proton tinggi). Sumber oksidasi yang terkuat dalam lingkungan sedimen adalah oksigen di atmosfer.

4.3.4 .*Weathering*

Weathering adalah proses yang kompleks terjadi di permukaan endapan, dan hasil akhirnya dalam bentuk:

1. Penghancuran secara mekanik batuan padat menjadi partikel-partikel lepas.

Weathering secara mekanik terbatas hanya pada daerah-daerah yang beriklim dingin, sedangkan *weathering* kimia terjadi pada semua daerah, khusus pada daerah yang beriklim panas *weathering* kimia terjadi lebih cepat dari pada daerah beriklim kering.

2. Perusakan secara kimia atau perubahan mineral termasuk pembentukan mineral-mineral baru.

Weathering kimia meliputi:

- . Pelaraut dan larutan
- . Hydrasi dan hidrolisis

Peranan *weathering* kimia tergantung pada komposisi perairan, suhu, ada tidaknya tanaman dan mikroorganisme seperti bakteri. Tanpa *weathering* kimia, permukaan bumi mirip dengan permukaan bulan dan tidak akan ada kehidupan. Kegiatan pertanian tidak mungkin bisa dilakukan tanpa adanya *weathering* ini. Banyak sumber-sumber mineral penting seperti bauksit, besi, lempung dan berbagai macam bahan keperluan hidup manusia adalah hasil dari *weathering* kimia.

V. KECEPATAN SEDIMENTASI

Kecepatan sedimentasi adalah sedimen yang mengendap di dasar perairan selama periode waktu tertentu, biasanya dinyatakan dalam satuan tebal pengendapan per waktu. Kecepatan sedimentasi (laju pengendapan sedimen) dapat ditentukan dengan berbagai metode tergantung dari bentuk data yang diinginkan. Ada dua bentuk kecepatan sedimentasi yaitu kecepatan sedimentasi relatif dan absolut.

Selain istilah kecepatan sedimentasi, ada istilah lain yang sering digunakan untuk menjelaskan jumlah (volume dan berat) sedimen yang mengendap persatuan luas area per waktu, disebut dengan istilah *akumulasi sedimen*. Secara umum metode dan peralatan penentuan tingkat akumulasi sedimen biasanya dipakai *Sediment Trap*. English dan Baker (1994) mendefinisikan bahwa *Sediment Trap* adalah peralatan yang dipakai untuk menentukan kecepatan sedimentasi. Penulis berpendapat bahwa istilah kecepatan sedimentasi yang dimaksud oleh English dan Cho sebenarnya adalah kecepatan akumulasi sedimen, karena peralatan yang digunakan merupakan peralatan yang cocok untuk mengukur kecepatan akumulasi sedimen.

Ada perbedaan prinsip antara kecepatan sedimentasi (relatif dan absolut) dan kecepatan akumulasi sedimen, yaitu satuan kecepatan sedimentasi relatif adalah persen (%), satuan kecepatan sedimentasi absolut adalah ketebalan pengendapan

per waktu (mm/tahun) sedangkan satuan akumulasi adalah satuan volume (ml/ volume sedimen trap /tahun) dan atau berat per waktu (mg/ volume sedimen trap/tahun).

Begitu juga halnya dengan perbedaan antara kecepatan sedimentasi relatif dan absolut. Kecepatan sedimentasi relatif tidak dapat menggambarkan tebal pengendapan sedimen pada suatu lokasi tetapi hanya bisa menjelaskan dan membandingkan pengendapan sedimen mana yang cepat antara satu lokasi dengan lokasi lainnya. Sebaliknya, kecepatan sedimentasi absolut selain dapat menjelaskan dan membandingkan mana yang cepat pengendapan sedimen antara satu lokasi dengan lokasi lainnya, juga dapat menentukan seberapa besar (tebal) kecepatan pengendapan sedimen tersebut.

Masing-masing metode penentuan kecepatan pengendapan sedimen di atas mempunyai tingkat kesulitan yang berbeda terutama sekali dalam pengambilan sampel di lapangan, analisis sampel di laboratorium dan analisis data. Selain itu, peralatan lapangan dan laboratorium yang digunakan untuk pengambilan sampel di lapangan dan analisis sampel di laboratorium juga berbeda. Oleh sebab itu perlu pertimbangan yang matang sebelum memutuskan tipe kecepatan sedimentasi yang akan diukur, dan hal ini tentu harus disesuaikan dengan data yang diinginkan seperti yang dijelaskan di atas.

5. 1. Sedimentasi Relatif

Sedimen laut disusun oleh berbagai material baik organik maupun anorganik, jika salah satu komponen penyusun sedimen tersebut dapat ditentukan kecepatan panambahannya (produksi), maka kecepatan sedimentasi pada daerah yang bersangkutan dapat dihitung. Salah satu komponen penting sedimen laut adalah benthik foraminifera, oleh sebab itu organisme ini dapat digunakan untuk menentukan kecepatan sedimentasi jika jumlahnya dapat diketahui, (Rifardi, 2008c).

Selanjutnya Rifardi menjelaskan bahwa penentuan kecepatan sedimentasi relatif dengan menggunakan benthik foraminifera pertama sekali diusulkan oleh Phleger (1951) dengan cara membandingkan jumlah spesies hidup (L) dengan total spesies (hidup + mati: T) yang ditemukan dalam sedimen permukaan, dan metode ini dipakai oleh ahli lainnya seperti Uchio (1960) dan Matoba (1970), mereka memberikan nama metode "NILAI L/T". Kecepatan sedimentasi relatif digunakan untuk membandingkan kecepatan sedimentasi antara stasiun sampling, dan metode ini hanya bisa digunakan untuk menentukan kecepatan sedimentasi pada sedimen permukaan. Jika hasil perhitungan didapat nilai L/T tinggi, maka kecepatan penambahan material penyusun sedimen selain benthik foraminifera tinggi sehingga kecepatan sedimentasi tinggi. Sebaliknya nilai L/T rendah, mengindikasikan bahwa kecepatan suplai material penyusun sedimen rendah

Prosedur penentuan kecepatan sedimentasi dengan menggunakan metode tersebut menurut Phleger (*dalam* Rifardi 2008c) sebagai berikut:

1. Sampel sedimen yang akan digunakan harus sampel yang mewakili daerah yang akan ditentukan kecepatan sedimentasinya. Oleh sebab itu harus digunakan sampel yang representatif dengan metode pengambilan sampel standar.
2. Identifikasi spesies benthik foraminifera hidup dan mati.
3. Populasi hidup merupakan bagian dari suplai cangkang organisme pada sedimen .
4. Total populasi (jumlah hidup dan mati) merupakan akumulasi cangkang benthik foraminifera dalam sedimen selama waktu tertentu.
5. Perbandingan populasi hidup terhadap total populasi pada tempat tertentu adalah kecepatan sedimentasi pada tempat tersebut, dan kecepatan sedimentasi ini dinyatakan dengan kecepatan relatif dalam persen (%).

Pemakaian rumus L/T cukup sederhana, apabila hasil identifikasi organisme foraminifera benthik telah diperoleh. Oleh sebab itu setelah Phleger (1951) mengusulkan rumus ini, banyak ahli sedimentologist dan foraminiferologis menghitung kecepatan sedimentasi relatif di berbagai perairan menggunakan rumus ini seperti Scruton (1953) meneliti kecepatan sedimentasi relatif di perairan Delta Mississippi, menyimpulkan bahwa

metode penghitungan ini cukup realistis untuk membedakan daerah-daerah yang mempunyai kecepatan pengendapan sedimen lambat dan cepat. Walton (1955) melakukan penelitian di Teluk Todos Santos Baja California, menyimpulkan bahwa perbandingan populasi hidup dengan populasi mati merupakan indeks yang bagus untuk menentukan kecepatan sedimentasi relatif. Phleger (1960) meneliti kecepatan sedimentasi relatif di barat laut teluk Meksiko, menemukan bahwa perbandingan populasi hidup dan mati menunjukkan kecepatan sedimentasi relatif tertinggi terjadi di bagian dalam paparan benua (*inner shelf*) dan terendah ditemukan di bagian luar paparan benua (*outer shelf*). Kecepatan sedimentasi relatif terendah pada bagian luar paparan benua disebabkan oleh faktor-faktor berikut ini: 1) sedimen yang disuplai tidak sampai pada bagian ini karena kecilnya suplai atau sedimen di perangkap pada bagian dalam dan terjadi pengendapan pada bagian dalam paparan benua; dan 2) sedimen melewati bagian ini karena adanya proses tertentu seperti gelombang dan arus kuat yang menghambat terjadinya pengendapan sedimen.

Metode penentuan kecepatan sedimentasi relatif (%) juga telah digunakan para ahli di perairan sekitar benua Asia diantaranya Matoba (1970), Oki (1989) dan Rifardi (1998). Matoba menentukan kecepatan sedimentasi di perairan teluk Matsushima bagian utara Jepang. Foraminifera benthik berasal dari sedimen permukaan dengan ketebalan 1 cm yang diambil dari sampel sedimen *corer* di teluk Matsushima. Hasil studi ini

menunjukkan bahwa kecepatan sedimentasi relatif lebih tinggi ($L/T > 10\%$) ditemukan pada bagian dalam teluk, sebaliknya bahwa kecepatan sedimentasi relatif rendah ($L/T < 10\%$) ditemukan pada bagian luar teluk. Hal ini disebabkan oleh teluk bagian dalam menerima suplai sedimen yang berasal dari daratan melalui sungai utama yaitu Sungai Takagi merupakan penyumbang sedimen terbesar, kemudian beberapa kanal seperti Tona dan Teizan juga mensuplai sedimen ke bagian ini.

Cara penghitungan Nilai L/T seperti contoh berikut ini: jika pada Stasiun A ditemukan populasi hidup (L) sebanyak 238 individu dan mati sebanyak 612 individu, berarti sebanyak 850 individu ditemukan maka kecepatan sedimentasi relatif (L/T) adalah: $238/850 \times 100\% = 28\%$. Jika pada Stasiun B ditemukan populasi hidup (L) sebanyak 8 individu dan mati sebanyak 53 individu, berarti sebanyak 61 individu yang ditemukan maka kecepatan sedimentasi relatif (L/T) adalah: $8/61 \times 100\% = 13\%$. Dengan demikian kecepatan sedimentasi Stasiun A lebih cepat dari Stasiun B.

Oki (1989) menyatakan ada beberapa kelemahan pada metode L/T ini sehingga dapat menyebabkan biasanya nilai kecepatan sedimentasi, diantaranya adalah:

1. Tidak diketahuinya kecepatan produksi foraminifera bentik dan kecepatan produksi tersebut tidak sama pada daerah yang berbeda.

2. Nilai L/T pasti lebih rendah pada stasiun yang menerima organisme bentik mati dari luar daerah/stasiun sampling yang dibawa oleh arus dasar.

Selanjutnya dijelaskan, untuk mengurangi biasanya hasil penghitungan kecepatan sedimentasi karena beberapa kelemahan di atas, Oki (1989) merevisi Nilai L/T menjadi Nilai L/TL. Total individu (hidup + mati: T) diganti dengan jumlah total individu organisme bentik yang mati dari spesies yang sama (TI) dengan spesies hidup (L). Lagi pula dengan membandingkan nilai L/TL dengan nilai L/T akan didapat jumlah spesies bentik mati yang berasal dari luar daerah/stasiun sampling.

Contoh: spesies foraminifera bentik hidup (L) adalah spesies A, B, C, D, F, G dan spesies mati (T) adalah A, B, C, D, F, G, H, I dan J, maka L/TL adalah jumlah total individu spesies A, B, C, D, F, G hidup (L) per jumlah total individu spesies A, B, C, D, F, G mati (TI). Sedangkan spesies H, I dan J yang mati adalah spesies bentik mati yang berasal dari luar daerah/stasiun sampling. Cara penghitungan Nilai L/TL sebagai berikut: jika pada Stasiun A ditemukan populasi hidup (L) sebanyak 10 individu dan yang mati dari spesies yang sama (TI) dengan spesies hidup (L) sebanyak 100 individu, maka kecepatan sedimentasi relatif (L/TL) adalah: $10/100 \times 100\% = 10\%$. Jika pada Stasiun B ditemukan populasi hidup (L) sebanyak 6 individu dan yang mati dari spesies yang sama (TI) dengan spesies hidup (L) sebanyak 120 individu, maka kecepatan

sedimentasi relatif (L/Tl) adalah: $6/120 \times 100\% = 6,0\%$. Dengan demikian kecepatan sedimentasi Stasiun A lebih cepat dari Stasiun B, ringkasannya dapat dilihat pada Tabel 5. 1

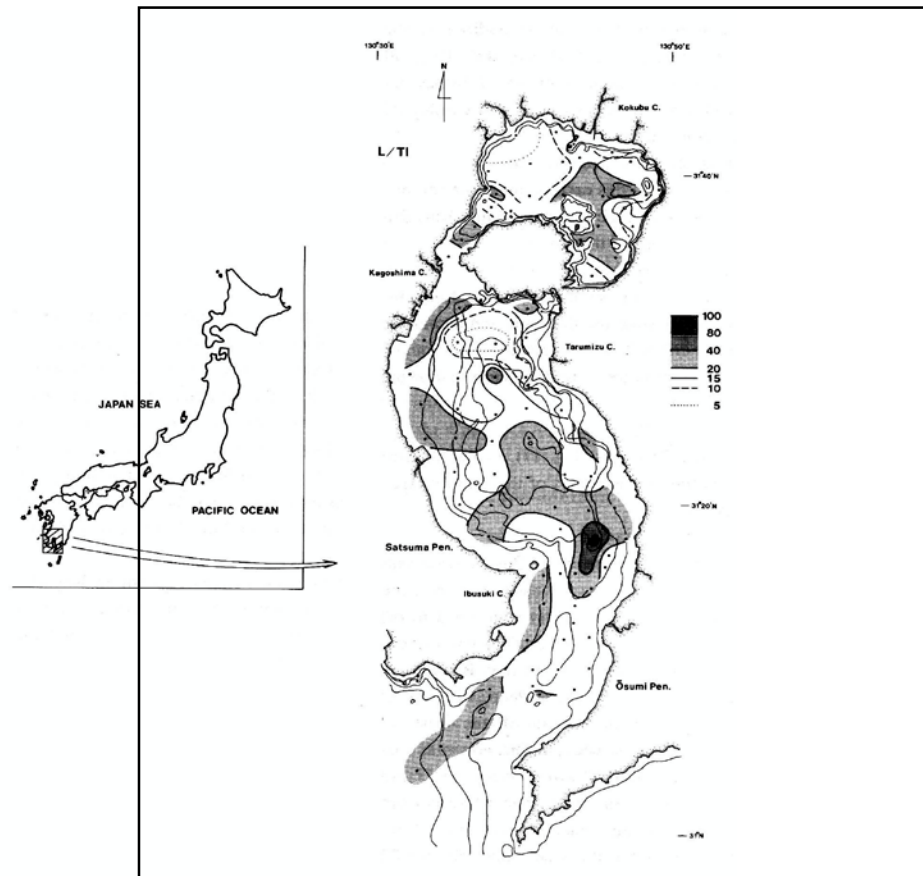
Tabel 5. 1. Hasil Perhitungan Persentase Kecepatan Sedimentasi Relatif (%)

Stasiun	Jumlah individu		L/Tl (%)
	Total (Tl)	Hidup (L)	
1	100	10	10,0
2	120	6	6,0

Oki (1989) menghitung kecepatan sedimentasi relatif (%) di Teluk Kagoshima, Kyushu Jepang menggunakan metode L/Tl. Nilai L/Tl diplotkan dalam peta wilayah studi, dan hasilnya menunjukkan terdapat dua tipe sebaran nilai L/Tl yang berbeda yaitu nilai L/Tl tinggi dan rendah seperti pada Gambar 5. 1

Pada Gambar 5. 1 dapat diidentifikasi bahwa ada lima daerah yang mempunyai kecepatan sedimentasi tinggi yaitu 1) bagian luar teluk, 2) daerah sekitar kota Ibusuki, 3) daerah perbatasan antara mulut dan pusat teluk, 4) daerah sepanjang pantai kota Kagoshima, 5) daerah sekeliling kepala teluk. Kecepatan sedimentasi tinggi pada daerah sekitar mulut teluk disebabkan oleh arus dasar yang kuat menjadi lambat karena ke dalaman bertambah pada daerah ini sehingga sedimen berukuran halus dalam bentuk tersuspensi mengendap. Tingginya kecepatan sedimentasi pada daerah sekitar kota Ibusuki disebabkan oleh adanya submarine

terrace lebih dangkal dari 10 meter, yang mengalami erosi selama 30 tahun menyebabkan suplai sedimen berukuran kasar mengendap sekitar daerah ini.



Gambar 5. 1. Sebaran nilai L/TI (Oki, 1989).

Sedangkan tingginya kecepatan sedimentasi pada daerah sepanjang pantai kota Kagoshima disebabkan oleh suplai sedimen dari sungai yang mempunyai daerah drainase luas, dan dari hasil reklamasi pantai Kota Kagoshima. Erosi yang

disebabkan oleh gelombang pada daerah sekeliling kepala teluk mengakibatkan tingginya kecepatan sedimentasi.

Pada Gambar 5. 1 juga dapat dilihat daerah-daerah yang mempunyai kecepatan sedimentasi rendah. Hal ini disebabkan oleh arus permukaan yang kuat mencegah terjadinya pengendapan padatan tersuspensi, dan sedikitnya jumlah sedimen yang di suplai ke daerah.

Metode L/Tl juga dipakai oleh Rifardi (1999) untuk menghitung kecepatan sedimentasi relatif (%) di Laut Yatsushiro, Kyushu Jepang. Hasil penelitian ini menunjukkan pola kecepatan sedimentasi yang sama dengan yang ditemukan oleh peneliti-peneliti sebelumnya seperti Scruton (1953), Walton (1955), Phleger (1960), Matoba (1970), dan Oki (1989). Kecepatan sedimentasi tertinggi ditemukan pada perairan sekitar muara sungai karena sungai merupakan penyuplai sedimen yang terbesar dibandingkan dengan sumber lainnya, dan pada daerah pertemuan antara dua massa air karena pertemuan dua massa air yang berbeda akan mengendapkan padatan tersuspensi yang dibawa oleh masing-masing massa air tersebut. Hasil ini mengindikasikan bahwa penentuan kecepatan sedimentasi relatif (%) dengan menggunakan metode L/Tl yang merupakan penyempurnaan dari metode L/T masih relevan digunakan sampai saat ini.

5. 2. Kecepatan Sedimentasi Absolut

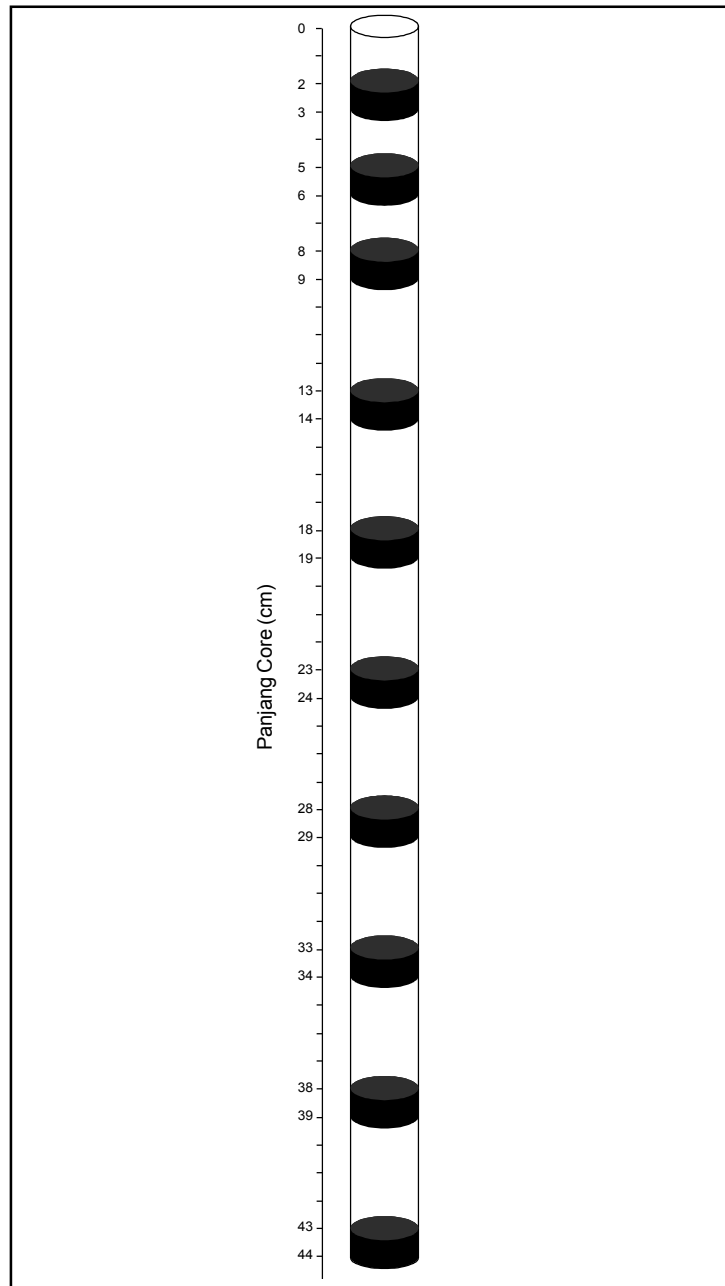
Jika tidak ada lapisan kunci pada suatu lingkungan pengendapan seperti lapisan endapan vulkanik, maka akan sulit

menentukan kecepatan sedimentasi absolut pada daerah tersebut. Banyak parameter fisika, kimia dan biologi yang dapat dijadikan lapisan kunci pada daerah pengendapan. Oleh sebab itu, untuk menentukan lapisan kunci, peneliti harus mengamati dengan teliti fenomena alam dan fenomena artifisial (aktivitas manusia) yang dapat memberikan masukan parameter-parameter tersebut ke dalam lingkungan pengendapan. Rifardi *et al.* (1998) menggunakan lapisan kunci dari salah satu parameter kimia yaitu konsentrasi total merkuri dalam sedimen untuk menghitung kecepatan sedimentasi absolut di Laut Yatsushiro Jepang. Fenomena paling menonjol adalah semenjak ditemukan penyakit Minamata, Laut Yatsushiro telah menjadi salah satu daerah sasaran penelitian intensif berkaitan dengan polusi air, sedimen dan biota laut.

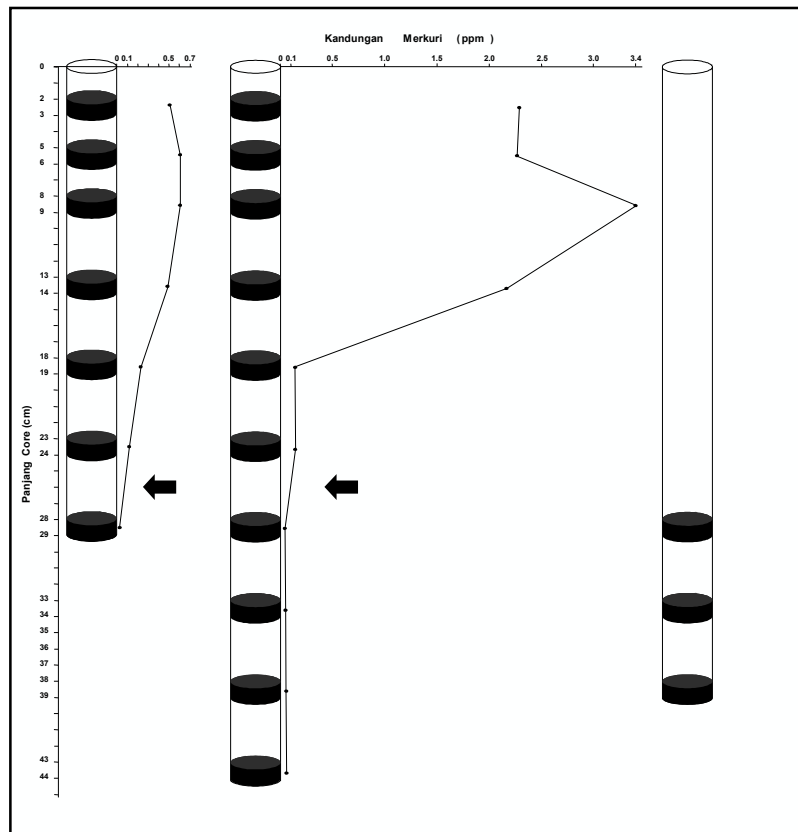
Selanjutnya dijelaskan semenjak tahun 1946 methyl merkuri dibuang ke Laut Yatsushiro melalui pipa pembuangan dari perusahaan Shinnihon Chisso Hiryo Co. Ltd. Tomiyasu *et al.* (2000) menjelaskan bahwa bahan buangan terkontaminasi merkuri masuk ke Teluk Minamata dari industri kimia selama 20 tahun sampai tahun 1965, menyebabkan *penyakit minamata*. Sebagai salah satu teluk yang terdapat di Laut Yatsushiro, Teluk Minamata merupakan penghubung antara berbagai bahan buangan yang berasal dari Kota Minamata dengan Laut Yatsushiro. Oleh sebab itu, pencemaran yang terjadi di teluk ini akan terdistribusi sampai ke Laut Yatsushiro. Atas dasar inilah kecepatan sedimentasi absolut diteliti.

Prosedur penentuan kecepatan sedimentasi absolut di Laut Yatsushiro sebagai berikut:

1. Sampel sedimen diambil dari 62 stasiun yang tersebar di Laut Yatsushiro dengan menggunakan *gravity corer*.
2. Masing-masing sampel dipotong secara horizontal dengan ketebalan 1 sentimeter
3. Sampel pada lapisan paling atas (0-2 cm) tidak digunakan karena lapisan ini telah terkontaminasi dan teraduk oleh berbagai energi seperti arus terutama arus dasar (*bottom current*) dan gelombang.
4. Berdasarkan panjang sampel core sedimen, maka diperoleh 12 potongan sampel secara horizontal untuk masing-masing stasiun yaitu 2-3, 5-6, 8-9, 13-14, 18-19, 23-24, 28-29, 33-34, 38-39, 43-44, 48-49 dan 53-54 cm, lihat Gambar 5. 2.
5. Masing-masing potongan sampel dianalisis di laboratorium dengan menggunakan alat The Sansou Automatic Mercury Analyzer Mode Hg-3500.
6. Dari hasil analisis akan diperoleh data kandungan merkuri pada masing-masing potongan sampel sedimen.
7. Data tersebut akan digunakan untuk menduga kandungan alami merkuri (*background level*) pada Laut Yatsushiro, dengan cara memplotkan pola sebaran vertikal kandungan merkuri pada masing-masing sampel seperti pada Gambar 5. 3.
8. Gambar 5. 3. adalah hasil analisis kandungan merkuri core sedimen pada stasiun 12, 19, dan 56 di Laut Yatsushiro.



Gambar 5. 2. Contoh potongan sampel core sedimen secara horizontal (● = sampel/lapisan yang dianalisis).



Gambar 5. 3. Sebaran vertikal kandungan merkuri dalam core sedimen (● = sampel/lapisan dianalisis, panah = lapisan pertama dengan merkuri > 0,1 ppm, Rifardi *et al.*, 1998)

9. Gambar 5. 3. menunjukkan sampel dengan kandungan merkuri lebih tinggi ditemukan pada sampel core sedimen bagian atas, sebaliknya kandungan lebih rendah pada sampel core sedimen bagian bawah.

10. Pada sampel core sedimen bagian lebih bawah kandungan merkuri turun secara drastis dan tidak menunjukkan adanya kecenderungan perubahan kandungan merkuri secara signifikan dengan rata-rata kandungan 0,036-0,094 ppm (kurang dari 0,1 ppm).
11. Bagian atau lapisan core sedimen yang mengandung merkuri lebih besar dari 0,1 ppm dianggap lapisan yang telah tercemar oleh merkuri.
12. Lapisan kunci adalah bagian core sedimen pertama yang menunjukkan kandungan merkuri lebih tinggi dari 0,1 ppm karena lapisan ini merupakan lapisan sedimen yang pertama sekali menerima buangan terkontaminasi merkuri. Oleh sebab itu kandungan merkuri pada bagian ini dianggap sebagai kandungan alami merkuri (*background level*) pada Laut Yatsushiro.
13. Kecepatan sedimentasi absolut dihitung mulai dari lapisan kunci tersebut sampai pada lapisan sedimen permukaan (panjang sampel core sedimen yang kandungannya lebih tinggi dari 0,1 ppm).
14. Panjang sampel core sedimen tersebut setara dengan periode waktu 50 tahun (1946-1996) karena sampel core sedimen untuk penelitian ini diambil pada tahun 1996.

Gambar 5. 3. mengindikasikan bahwa masing-masing stasiun mempunyai ke dalaman lapisan kunci yang berbeda, berarti kecepatan sedimentasi juga berbeda. Hal ini disebabkan oleh beberapa faktor antara lain jarak antara sumber pencemar dan masing-masing stasiun tidak sama sehingga waktu pengendapan bahan pencemar berbeda, dan sistem arus yang berlaku di perairan ini.

Sebaran kecepatan sedimentasi di Laut Yatsushiro Jepang yang dihitung berdasarkan lapisan kunci dapat dilihat pada Gambar 5. 4. Secara umum kecepatan sedimentasi agak lambat (kecil dari 11 cm/50 tahun) terjadi pada bagian barat, dan paling lambat (lebih kecil dari 4 cm/50 tahun) terjadi pada daerah sekitar selat. Kondisi ini disebabkan kedua daerah tersebut dipengaruhi oleh arus kuat. Sebaliknya kecepatan sedimentasi paling cepat (lebih dari 21 cm/50 tahun) ditemukan pada bagian timur, tenggara dan daerah estuaria, karena daerah-daerah ini dipengaruhi oleh massa air yang agak tenang dan suplai sedimen dari beberapa sungai yang mempunyai drainase luas.

5. 3. Akumulasi Sedimen

Seperti yang dijelaskan di atas bahwa kecepatan sedimentasi menurut English dan Cho (1994) sebenarnya adalah kecepatan akumulasi sedimen karena metode yang digunakan oleh English dan Cho untuk mengukur laju sedimentasi adalah metode yang cocok untuk mengukur kecepatan akumulasi sedimen.

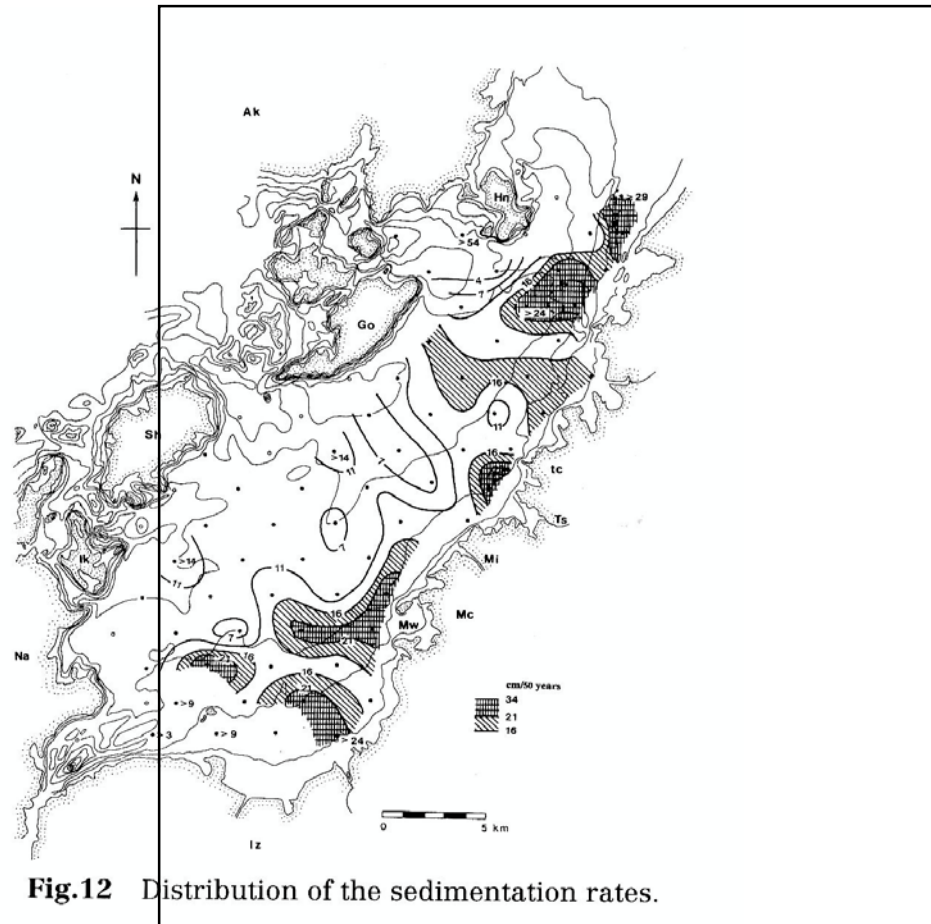


Fig.12 Distribution of the sedimentation rates.

Gambar 5. 4.Sebaran kecepatan sedimentasi Laut Yatsushiro Jepang (Rifardi *et al.*, 1998)

Ada beberapa kelemahan yang mendasar jika data yang diperoleh dengan metode ini dianggap sebagai kecepatan sedimentasi, yaitu:

1. Sedimen yang terperangkap dalam *sediment trap* tidak akan dipengaruhi oleh arus dan gelombang sehingga peranan arus dan gelombang dalam proses

sedimentasi teraibakan. Pada hal dari berbagai hasil penelitian yang telah dijelaskan di atas arus adalah salah satu faktor utama yang menentukan kecepatan sedimentasi.

2. Secara alamiah sedimen yang baru saja mengendap akan mengalami proses penyapuan dan pengendapan yang berulang-ulang oleh berbagai energi seperti arus terutama arus dasar perairan (*bottom current*), dan proses ini akan menentukan tebalnya pengendapan sedimen.
3. Sedimen yang terperangkap dalam *sediment trap* tidak akan mengalami proses pada poin 2 sehingga ketebalan pengendapan sedimen dalam *sediment trap* tidak menggambarkan kecepatan sedimentasi yang sebenarnya.
4. Oleh sebab itu, untuk mengurangi kelemahan-kelemahan di atas prinsip-prinsip akumulasi sedimen lebih tepat digunakan untuk metode ini dengan cara mengabaikan faktor-faktor alamiah yang mempengaruhinya.

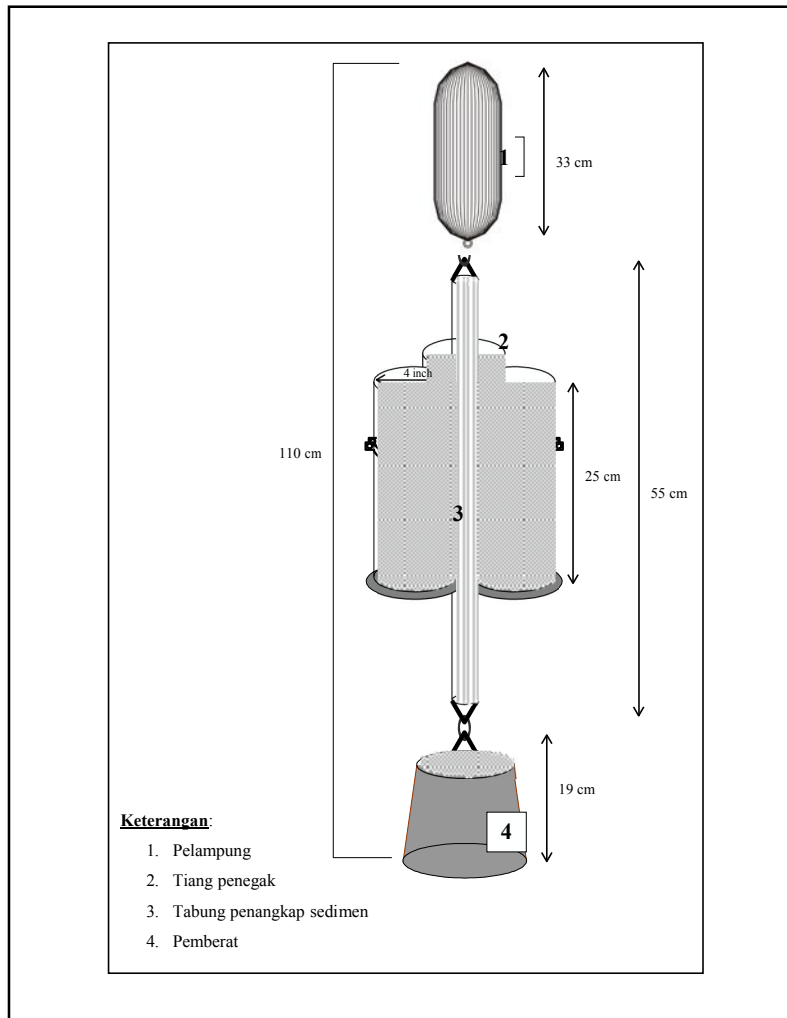
Kecepatan akumulasi sedimen pada suatu perairan diukur menggunakan *Sediment Trap* dibuat oleh penulis dengan memodifikasi rancangan English dan Baker (1994) seperti pada Gambar 5. 5. Prosedur pembuatan dan pengoperasian *Sediment Trap* sebagai berikut:

- Sediment trap yang dipakai berdiameter 5 cm, panjang 11,5 cm dan terbuat dari pipa PVC
- Sediment trap diletakkan pada setiap stasiun sampling sebanyak 3 unit dengan jarak 20 cm dari dasar perairan.
- Sediment trap diletakkan selama delapan minggu dan setiap dua minggu diangkat dan dihitung jumlah sedimen yang terakumulasi.
- Hasil perhitungan akan didapat volume dan berat sedimen yang terakumulasi per waktu akumulasi.

Akumulasi sedimen yang dihitung adalah volume dan berat sedimen yang terendapkan persatuan volume sedimen trap per waktu dengan prosedur sebagai berikut:

- Sampel sedimen yang tertahan dalam sedimen trap dipindahkan ke dalam plastik sampel
- Sampel tersebut dianalisis di laboratorium untuk menentukan volume dan beratnya
- Volume diukur dengan cara menyaring sedimen sampel dengan ayakan yang paling halus 0,063 mm untuk memisahkan lumpur dengan fraksi lainnya.
- Fraksi yang tertahan dalam ayakan tersebut dihitung volumenya (ml) , dan setelah itu dikeringkan dan ditimbang beratnya (gram).
- Sedangkan sedimen yang lolos dari ayakan, dibiarkan selama 3 hari untuk diendapkan, setelah

itu diukur volume yang terendap (ml) dan ditimbang (gram).



Gambar 5.5. Rancang bangun *sediment trap*

Akumulasi sedimen yang dihitung dengan perhitungan sebagai berikut:

$$KA = \frac{v/V}{t}$$

KA = Kecepatan akumulasi (ml/cm³/hari) atau (ml/cm²/hari)
v = volume sedimen (ml)
V = volume sedimen trap (cm³) atau luas sedimen trap (cm²)
t = waktu pemasangan sed. trap (hari).

Selain itu, akumulasi sedimen yang dihitung adalah berat sedimen yang terendapkan persatuan luas area per waktu dengan perhitungan sebagai berikut:

$$KA = \frac{W/V}{t}$$

KA = Kecepatan akumulasi (gram/ cm³/hari) atau (gram/cm²/hari)
W = berat kering sedimen (gram)
V = volume sedimen trap (cm³) atau luas sedimen trap (cm²)
t = waktu pemasangan sed. trap (hari).

English dan Baker (1994) menjelaskan penggunaan *sediment trap* untuk mengukur muatan sedimen di perairan karang. Mereka tidak menjelaskan hasil penelitian yang mereka lakukan untuk melihat pengaruh proses sedimentasi terhadap tingkat kelulushidupan dan pertumbuhan karang, tetapi lebih memfokuskan pada prosedur penelitian mulai dari pembuatan, penempatan *sediment trap* pada dasar perairan sampai pada pengangkatan alat ini ke permukaan perairan dan membawa sampel sedimen ke laboratorium.

Penulis selama periode waktu 2 tahun (tahun 2004/2005 dan 2006/2007) memakai metode ini untuk menghitung akumulasi sedimen di perairan sungai di mana sekitar Daerah Aliran Sungai (DAS) tersebut telah terjadi perubahan fungsi lahan yang menyebabkan erosi. Hasil penelitian menunjukkan *sediment trap* cukup efektif digunakan untuk menentukan besarnya pengendapan sedimen yang berasal dari material tersuspensi akibat erosi. Kecepatan akumulasi pada penelitian ini dibedakan menjadi kecepatan volume akumulasi (ml) dan berat akumulasi (gram) persatuan volume sedimen trap (cm³) selama waktu tertentu (hari).

Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa akumulasi sedimen pada tahun 2006/2007 lebih tinggi dibandingkan dengan akumulasi tahun 2004/2005. Perbedaan ini diduga karena berbedanya kecepatan erosi daerah sekitar aliran sungai yang disebabkan oleh perbedaan curah hujan. Kondisi ini diperkuat dengan jumlah partikel tersuspensi yang diukur pada tahun 2006/2007 juga lebih tinggi dari tahun 2004/2005 dan konsentrasinya telah melewati Kriteria Mutu Air Kelas II menurut PP No. 82 Tahun 2001 tentang Pengelolaan Kualitas Air dan Pengendalian Pencemaran Air, yaitu sebesar 50 mg/l. Hasil ini mengindikasikan bahwa penentuan kecepatan akumulasi sedimen dengan menggunakan *sediment trap* dapat memberikan data yang akurat tentang proses pengendapan sedimen.

VI. TRANSPOR SEDIMEN

Mempelajari transpor sedimen berarti memahami tingkah laku partikel sedimen yang bergerak dalam cairan. Selly (1976) mengatakan bahwa pergerakan partikel sedimen dalam air dapat dijelaskan dengan menggunakan persamaan *Reynolds*, suatu persamaan yang berasal dari koefisien dimensi bilangan *Reynolds* sebagai berikut:

$$R = \frac{Udp}{\mu}$$

R = bilangan *Reynolds*

U = kecepatan partikel

d = diameter partikel

p = densitas partikel

μ = viskositas fluida

Bilangan *Reynolds* dapat digunakan untuk membedakan dua tipe aliran yang berbeda yaitu tipe aliran laminar, bilangan *Reynolds* rendah, dan tipe aliran turbulensi, bilangan *Reynolds* tinggi. Tipe aliran laminar adalah aliran yang mengalir sejajar dengan permukaan perairan mulai dari lapisan atas sampai bawah. Sedangkan tipe aliran turbulensi adalah aliran yang dapat menimbulkan arus eddi (turbulensi).

Ada beberapa mekanisme pergerakan partikel sedimen dalam aliran diantara suspensi, saltasi, traksi dan *rolling* seperti yang dijelaskan dalam Bab IV. Partikel sedimen yang berukuran kasar dan berat tidak pernah dipindahkan dengan cara terangkat dari lapisan dasar perairan. Mereka dipindahkan dengan cara

rolling oleh arus yang mengalir di dasar perairan. Dengan kecepatan arus yang sama, partikel-partikel yang lebih ringan berpindah dengan cara melambung sepanjang arus dasar, proses ini disebut saltasi. Sedangkan pada kecepatan arus yang sama, partikel-partikel yang paling ringan berada dalam arus dan berpindah sesuai dengan pola arus tersebut, dikenal dengan suspensi.

Dalam bab ini transpor sedimen yang dibahas hanya terbatas pada partikel-partikel sedimen yang ditranspor dalam bentuk suspensi berdasarkan hasil penelitian penulis dalam Team PKSPL (2001) di perairan laut dangkal di Indonesia. Pembahasan akan terfokus pada mekanisme sebaran partikel sedimen meliputi jarak dan waktu transpor. Kecepatan pengendapan partikel sedimen dihitung dengan menggunakan prinsip-prinsip Hukum Stokes. Nilai kecepatan pengendapan partikel ini digunakan untuk menentukan jarak dan waktu pengendapan partikel sedimen dari sumbernya. Penelitian ini dilakukan di Laut Paya dan sekitarnya Pulau Kundur Propinsi Kepulauan Riau Indonesia.

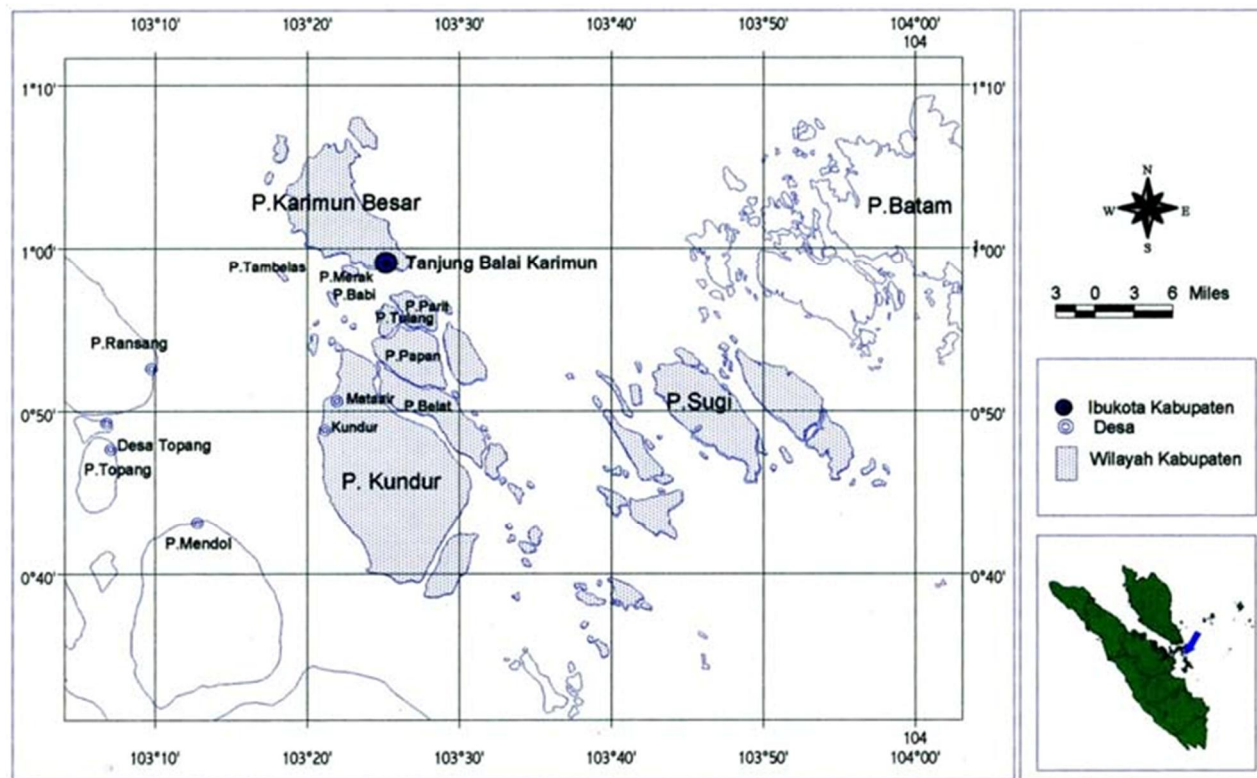
6. 1. Gambaran Umum Laut Paya

Perairan Laut Paya terletak di Pesisir Pulau Kundur Kabupaten Karimun Propinsi Kepulauan Riau Indonesia, merupakan jalur pelayaran internasional dan nasional. Perairan ini terbentang diantara Pulau Kundur, Karimun dan Pulau Mendol serta Rangsang. Perairan Laut Paya secara dominan

dipengaruhi pola oseanografi Selat Malaka dan suplai dari pesisir timur Pulau Sumatera khususnya pengaruh pemasukan berbagai material dari Sungai Kampar, dapat dilihat pada Gambar 6.1.

Perairan ini dicirikan dengan potensi sumberdaya alam bernilai ekonomis tinggi yang tersebar di wilayah pesisir dan lautan, diantaranya potensi mineral, gas dan minyak bumi, perikanan, dan pariwisata, tetapi sejak tiga dekade yang lalu terjadi penurunan potensi sumberdaya perairan di wilayah pesisir dan lautan propinsi ini, khususnya pada perairan Laut Paya Pesisir Pulau Kundur Kabupaten Karimun (Rifardi, 2006).

Berbagai tekanan ekosistem terhadap perairan Laut Paya terjadi sebagai akibat dari kombinasi antara tekanan yang disebabkan oleh aktivitas manusia dan perubahan alami. Diantara aktivitas tersebut adalah pemanfaatan potensi sumberdaya alam yang dilakukan oleh *stakeholders* yang berkepentingan, salah satunya adalah penambangan timah bawah air. Selain itu perubahan kualitas air dan karakteristik Selat Malaka secara tidak langsung mempengaruhi kualitas perairan ini. Besarnya suplai massa air dari pesisir pantai timur Pulau Sumatera dan karakteristik tipe geomorfologi pantai sekitar perairan Laut Paya juga mempengaruhi kondisi laut. Fenomena-fenomena ini diduga dapat merubah pola proses sedimentasi yang berlangsung sesuai dengan kuantitas dan kualitas tekanan ekosistem yang terjadi.



Gambar 6. 1. Perairan Laut Paya terletak di Pesisir Pulau Kundur Kabupaten Karimun Propinsi Kepulauan Riau Indonesia (PKSPL, 2001)

Perairan Laut Paya merupakan perairan yang kaya akan kandungan timah (Sn), oleh karena itu dilakukanlah eksploitasi sumberdaya ini oleh perusahaan yang berskala ekspor. Kegiatan ini selain memberikan dampak positif terhadap perekonomian nasional, juga menyebabkan terjadi dampak negatif berupa rusaknya kualitas perairan seperti penurunan kualitas fisika, kimia dan biologi perairan. Pengerukan dasar perairan sebagai upaya memperoleh potensi yang dikandungannya (timah) mengakibatkan beberapa parameter fisika perairan menjadi tidak stabil seperti tingginya konsentrasi padatan/muatan tersuspensi di perairan tersebut. Padatan tersuspensi sebagai dampak primer dari aktivitas penambangan mengakibatkan dampak sekunder dan lanjutan terhadap parameter kimia dan biologi perairan. Padatan tersuspensi yang dimaksud dalam buku ini mengacu kepada *Glossary of Geologi* dari Bates and Jackson (1987) yaitu kandungan sedimen yang terdapat dalam air selama waktu tertentu yang terdiri dari *silt*, *clay* dan *sand*, di mana sedimen ini terlepas dan tidak berhubungan dengan dasar perairan.

Ada dua tujuan utama bab ini yaitu: 1) membahas hubungan antara sebaran padatan/muatan tersuspensi dengan aktivitas penambangan bawah air dan karakteristik oseanografi, dan 2) hubungan antara sebaran sedimen, jarak dan waktu sedimentasi, dengan aktivitas penambangan bawah air dan karakteristik oseanografi perairan Laut Paya Pesisir Pulau Kundur Kabupaten Karimun. Hasil ini diharapkan dapat dimanfaatkan sebagai dasar untuk mengkaji penyebab

penurunan kualitas perairan dari sudut pandang parameter fisika, kimia dan biologi perairan, dan sebagai dasar untuk pengelolaan proses sedimentasi dan abrasi yang terjadi di perairan.

6. 2. Sebaran Sampling Sedimen

Penelitian dilakukan Maret April 2001 pada perairan Laut Paya Pesisir Pulau Kundur Kabupaten Karimun Propinsi Kepulauan Riau. Titik pengamatan (sampling points) ditentukan secara acak sesuai dengan kondisi lapangan, dan berdasarkan hal tersebut terdapat 41 titik (stasiun), di mana sebarannya lebih banyak diarahkan pada daerah aktivitas penambangan (daerah penambangan dan daerah damping) dan perairan pantai. Posisi masing-masing stasiun dapat dilihat pada Tabel 6. 1. dan Gambar 6. 2.

Sampel air diambil dari masing-masing stasiun dengan menggunakan bottle sampler dan dianalisis di laboratorium dan kandungan padatan tersuspensi dihitung dengan metode yang direkomendasikan dalam Buku APHA (1995). Selain itu, sampel sedimen permukaan dasar perairan diambil dari masing-masing stasiun dengan menggunakan Eckman Grab Sampler, kemudian ukuran butir sedimen dianalisis di laboratorium dengan menggunakan metode mekanikal (Rifardi, 2001c).

Karakteristik oseanografi di perairan Laut Paya yang diukur adalah kecepatan dan arah arus diukur dengan menggunakan current meter dan kompas, ke dalaman diukur

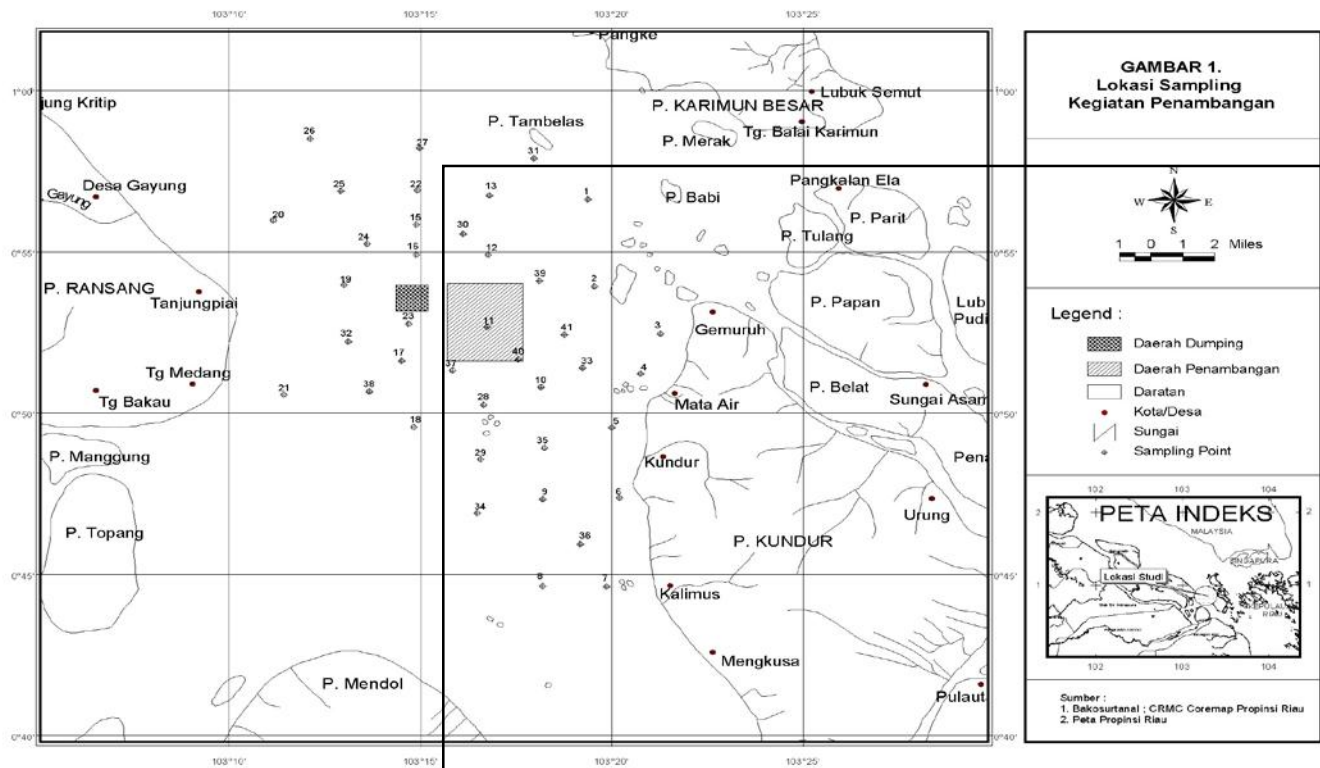
dengan echo sounding dan salinitas dengan refraktometer. Data tentang wilayah konsensi penambangan timah diperoleh dari data sekunder berupa peta konsensi penambangan dan damping area (Rifardi 2006).

Tabel 6. 1. Koordinat titik pengambilan sampel padatan tersuspensi dan dasar (Rifardi, 2006).

Stasiun	Longititude	Latitude	Stasiun	Longititude	Latitude
ST-1	103.31956200	0.94627000	ST-22	103.23253460	0.95142285
ST-2	103.32264800	0.89517200	ST-23	103.23047605	0.88280440
ST-3	103.35680000	0.87365000	ST-24	103.20811733	0.91988878
ST-4	103.34629000	0.84894900	ST-25	103.19485581	0.95129765
ST-5	103.33227600	0.81658900	ST-26	103.17880239	0.98270651
ST-6	103.33672100	0.77471000	ST-27	103.23394240	0.97642474
ST-7	103.33672100	0.71760300	ST-28	103.26744518	0.83124598
ST-8	103.29722200	0.72236200	ST-29	103.26604924	0.79774319
ST-9	103.29722200	0.77471000	ST-30	103.25557961	0.92547258
ST-10	103.29722200	0.84123200	ST-31	103.29187430	0.97084094
ST-11	103.26877000	0.87719200	ST-32	103.19974163	0.86823865
ST-12	103.26877000	0.91315200	ST-33	103.31769937	0.85288320
ST-13	103.26877000	0.94911200	ST-34	103.26395531	0.76563635
ST-14	103.24297000	0.99933100	ST-35	103.29815607	0.80402497
ST-15	103.23274700	0.93113200	ST-36	103.31630342	0.74679104
ST-16	103.23274700	0.91315200	ST-37	103.25139176	0.85148725
ST-17	103.22617000	0.85700000	ST-38	103.20951328	0.83822573
ST-18	103.23274700	0.81658900	ST-39	103.29466620	0.89825158
ST-19	103.19678700	0.89517200	ST-40	103.28489455	0.85846700
ST-20	103.16064100	0.93331400	ST-41	103.30862570	0.87242650
ST-21	103.16730300	0.83657600	-	-	-

6. 3. Padatan Tersuspensi

Hasil analisis kandungan padatan tersuspensi pada perairan Laut Paya Pesisir Pulau Kundur ditampilkan pada Tabel 6. 2.



Gambar 6. 2. Stasiun pengambilan sampel padatan tersuspensi dan dasar (Rifardi, 2006).

Tabel 6. 2. Kandungan padatan tersuspensi pada perairan Laut Paya Pesisir Pulau Kundur (Rifardi, 2006).

Stasiun	Mg/l	Stasiun	Mg/l	Stasiun	Mg/l
ST-1	63,2	ST-15	101,6	ST-29	102.0
ST-2	61,2	ST-16	79.2	ST-30	84.0
ST-3	66,8	ST-17	361.6	ST-31	77.0
ST-4	84,0	ST-18	178.0	ST-32	179.9
ST-5	63,2	ST-19	100.8	ST-33	101.4
ST-6	56,4	ST-20	112.1	ST-34	79.2
ST-7	69,6	ST-21	158.8	ST-35	84.0
ST-8	58,4	ST-22	93.2	ST-36	64.0
ST-9	44,4	ST-23	167.8	ST-37	197.2
ST-10	136,8	ST-24	102.1	ST-38	241.5
ST-11	156,4	ST-25	101.2	ST-39	93.4
ST-12	60,8	ST-26	97.5	ST-40	131.6
ST-13	63,2	ST-27	80.0	ST-41	98.9
ST-14	64,0	ST-28	138.7	-	-

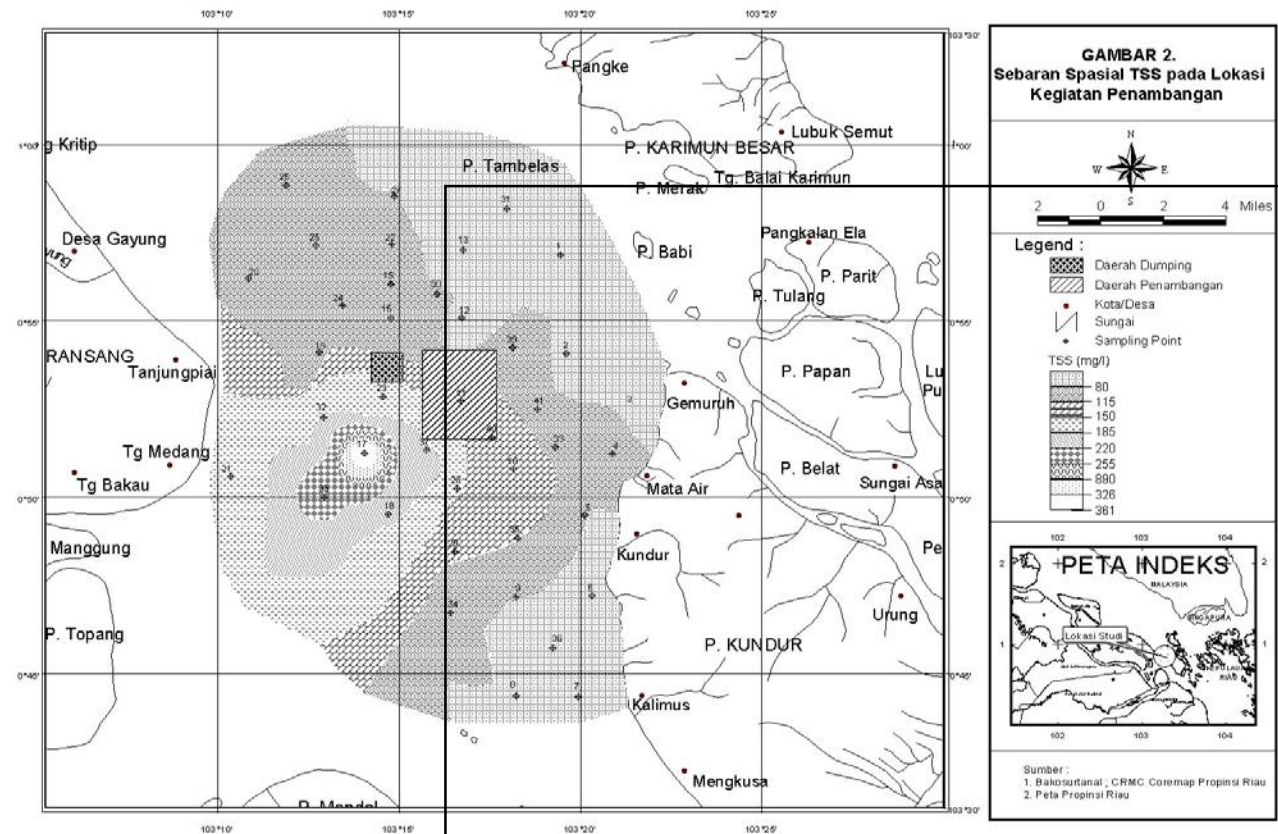
Secara umum kandungan sedimen tersuspensi pada perairan Laut Paya berkisar 44,4-360,6 mg/l, di mana kandungan terendah ditemukan pada stasiun 9 dan tertinggi pada stasiun 17 (Tabel 6. 2). Padatan tersuspensi akan mempengaruhi tingkat kekeruhan air dan intensitas cahaya matahari yang masuk ke perairan. Konsentrasi sedimen yang tinggi ini di perairan menghalangi penetrasi cahaya matahari sehingga menyebabkan berkurangnya aktivitas fotosintesis dari fitoplankton dan algae. Kondisi inilah yang menyebabkan menurunnya produktivitas perairan karena fitoplankton dan algae sebagai produser primer terganggu perkembangannya, selain itu juga mengakibatkan lapisan produktif perairan

menjadi tipis. Menurut Odum (1971), tipisnya lapisan produktif ini disebabkan oleh energi matahari yang tersedia untuk proses fotosintesis rendah, walaupun unsur haranya berlimpah.

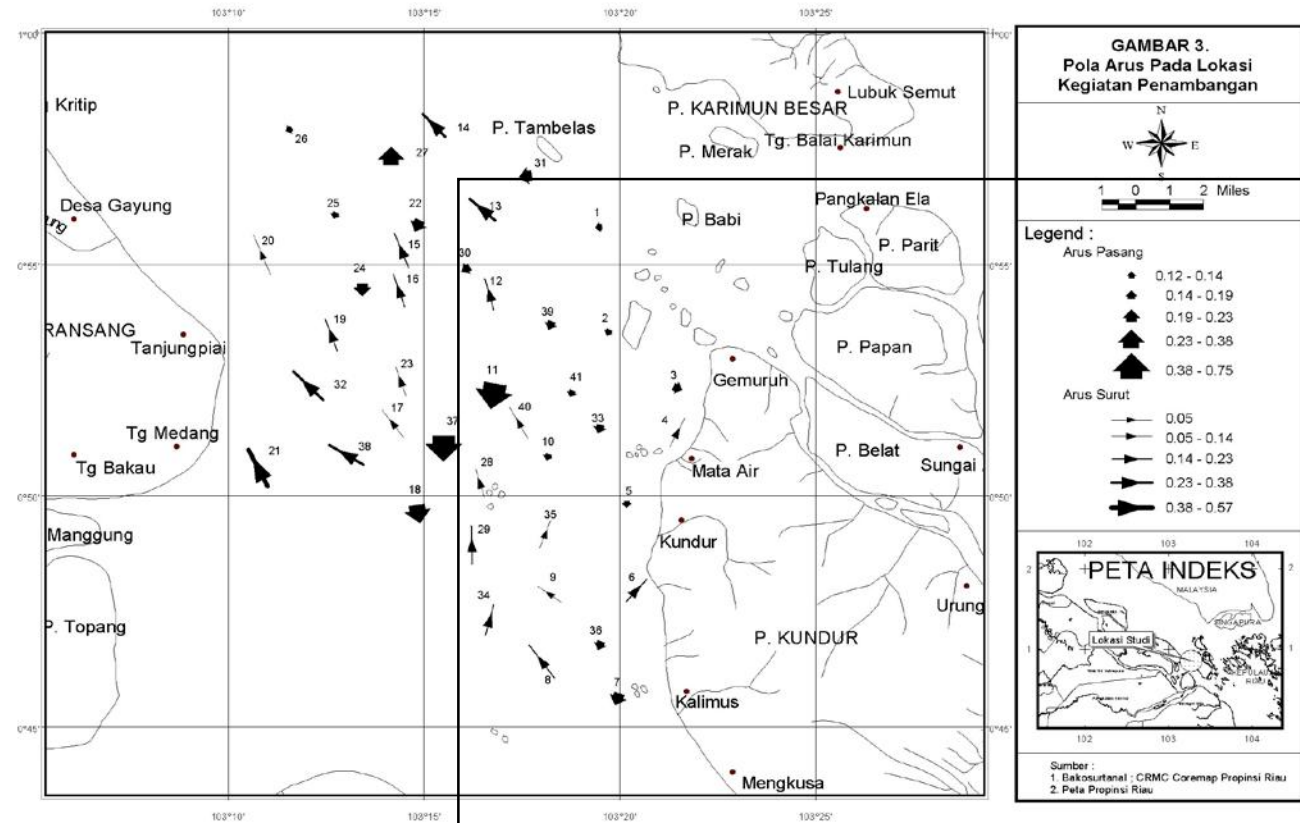
Berdasarkan Keputusan Menteri Lingkungan Hidup No. 51 Tahun 2004 tentang Baku Mutu Air Laut (sedimen tersuspensi = 20 mg/l untuk habitat koral dan lamun , dan 80 mg/l untuk mangrove), kualitas perairan wilayah studi tidak sesuai untuk kehidupan biota air, kecuali untuk mangrove pada beberapa stasiun sampling masih di bawah ambang batas. Kondisi inilah yang menyebabkan menurunnya produktivitas perairan seperti yang telah dijelaskan.

Pola kecenderungan sebaran sedimen tersuspensi secara geografi pada perairan ini dapat dilihat pada Gambar 6. 3. Pada Gambar 6. 3 terlihat bahwa kandungan padatan tersuspensi terendah ditemukan pada bagian tenggara dari lokasi penambangan (ST-9) dan tertinggi pada bagian barat daya dari lokasi penambangan dan bagian selatan dari damping area (ST-17).

Pola sebaran sedimen tersuspensi dipengaruhi oleh arah dan kecepatan arus. Pada waktu sampling dilakukan kondisi arus perairan Laut Paya dalam keadaan pasang, di mana arus pasang mengalir dari arah utara ke barat dengan kecepatan berkisar 0,12-0,75 m/detik, pola sebaran arus pasang dan surut perairan studi dapat dilihat pada Gambar 6. 4



Gambar 6. 3. Sebaran padatan tersuspensi (Rifardi, 2006).



Gambar 6. 4. Pola arus pasang surut (Rifardi, 2006).

Tingginya konsentrasi padatan tersuspensi pada daerah bagian selatan dari damping area atau bagian barat lokasi penambangan disebabkan oleh arus pasang yang mengalir dari arah utara menuju lokasi ini dengan kecepatan 0,23-0,75 m/detik mentranspor padatan tersuspensi yang berasal dari damping area dan daerah operasi penambangan. Asal dari padatan tersuspensi didukung oleh sebaran tingkat kekeruhan yang tinggi di daerah ini berkisar 74,85-165,32 NTU (berdasarkan penelitian pendahuluan yang dilakukan oleh Tim PKSPL-Faperika UNRI, 2001). Selain disebabkan oleh kegiatan penambangan timah, tingginya konsentrasi padatan tersuspensi pada lokasi ini diduga juga disebabkan oleh tingkat abrasi pantai Pulau Rangsang yang tinggi dan suplai sedimen dari sungai-sungai yang terdapat di Pulau Sumatera dan mengalir ke lokasi ini. Pantai Pulau Rangsang secara dominan disusun oleh sedimen lunak sehingga sangat mudah terabrasi dan hasilnya menyebabkan meningkatnya padatan tersuspensi di perairan. Analog dengan penelitian ini, Brahmawanto *et al.* (2000), gerusan tebing pantai oleh gelombang menyebabkan tingginya tingkat kekeruhan dan padatan tersuspensi pada perairan sekitar pantai tersebut.

Pada Gambar 6. 3.juga terlihat bahwa kandungan padatan tersuspensi terendah ditemukan pada bagian tenggara dari lokasi penambangan (ST-9) dan bagian lainnya selain bagian barat daya dari lokasi penambangan atau bagian selatan dari damping area. Apabila dibandingkan dengan sebaran kecepatan arus

pasang (Gambar 6. 4), jelas terlihat bahwa perairan dengan kandungan padatan tersuspensi rendah dicirikan oleh kecepatan arus pasang yang lambat yaitu berkisar 0,14-0,23 m/detik (bagian tenggara damping area dan penambangan) dan 0,12-0,23 m/detik (selain bagian barat daya dari lokasi penambangan atau bagian selatan dari damping area).

Menurut Rifardi dan Ujje (1993); Rifardi (1994); Rifardi dan Oki (1998) dan Rifardi, Oki dan Tomiyasu (1998), secara umum perairan dengan arus yang lambat dicirikan oleh sedimen permukaan yang mempunyai ukuran butiran halus, dan temuan ini relevan dengan hasil studi di perairan Laut Paya karena pola sebaran padatan tersuspensi akan menggambarkan pola sebaran sedimen permukaan. Hal ini juga telah dibuktikan dengan hasil penelitian yang dilakukan Rifardi (2001b), menemukan kecepatan dan arah arus menentukan kandungan dan pola sebaran padatan tersuspensi di perairan. Selain oleh lemahnya arus baik pasang maupun surut, karakteristik pantai sekitar Pulau Kundur terdiri dari sedimen yang lebih keras dibandingkan dengan Pulau Rangsang, di mana berdasarkan pengamatan secara visul saat sampling dilakukan perairan pantai sekitar Pulau Kundur didominasi oleh batuan. Karakteristik ini merupakan salah satu penyebab kandungan padatan tersuspensi sekitar daerah ini lebih rendah.

Berdasarkan hasil analisis data dan pola sebaran kandungan padatan tersuspensi dan hubungannya dengan

aktivitas penambangan bawah air (timah) dan karakteristik oseanografi perairan Laut paya, dapat disimpulkan:

1. Secara dominan penyebab tinggi kandungan padatan tersuspensi di wilayah studi adalah berasal areal/aktivitas penambangan. Kandungan padatan tersuspensi paling tinggi (150-361 mg/l) tersebar pada daerah sekitar damping dan penambangan.
2. Arus merupakan faktor yang dominan menentukan arah dan pola sebaran padatan tersuspensi.
3. Sedimen hasil abrasi pantai Pulang Rangsang dan suplai sedimen dari sungai-sungai yang mengalir ke perairan Laut Paya memberikan kontribusi yang cukup signifikan terhadap kandungan padatan tersuspensi.

6. 4. Jarak dan Waktu Deposisi Sedimen

Sampel sedimen permukaan dasar perairan dianalisis untuk memperoleh data ukuran butir sedimen, di mana data ini dianalisis untuk menentukan parameter statistik sedimen (M_z =diamater rata-rata) berdasarkan Folk dan Ward (1957). Hasil analisis ukuran butir tersebut digunakan untuk menentukan kelas ukuran masing-masing sub populasi sedimen berdasarkan skala Wentworth (*dalam* Friedman dan Sanders, 1978) dan Lewis dan McConchie (1994). Sub populasi sedimen diplotkan dalam peta wilayah studi untuk melihat sebaran secara geografi, dengan menggunakan program Arc View 3. Hasil analisis ukuran butir juga digunakan untuk menentukan tipe

sedimen di daerah studi berdasarkan Shepard Triangle (Shepard, 1975).

Kecepatan pengendapan partikel sedimen dihitung dengan menggunakan prinsip-prinsip Hukum Stokes (*dalam* Koesoemadinata 1980) sebagai berikut:

$$V = \frac{2}{3} g \frac{\rho_p - \rho_f}{\Pi} r^2$$

Keterangan :

V = kecepatan pengendapan partikel (m/det)

ρ_p = densitas partikel (g/cm^3)

ρ_f = densitas medium (g/cm^3)

r = jari-jari partikel (mm)

Π = viskositas medium (kg/(ms))

g = gravitasi (m/dt^2)

Nilai kecepatan pengendapan partikel di atas (V) digunakan untuk menentukan jarak dan waktu pengendapan partikel sedimen dari sumbernya dengan penghitungan sebagai berikut:

$$D = (\sqrt{V_a^2} + V^2) \times t$$

dan

$$t = d/V$$

Keterangan :

D = jarak pengendapan (m)

V_a = kecepatan arus (m/dt)

V = kecepatan pengendapan partikel (m/dt)

t = waktu pengendapan (dt)

d = ke dalaman rata-rata perairan (m)

Distribusi Sub-Populasi Sedimen

Hasil analisis ukuran butir sedimen disimpulkan dalam bentuk proporsi masing-masing sub populasi kelas ukuran yaitu kerikil, pasir, lumpur, diameter rata-rata, katagori dan tipe sedimen, seperti pada Tabel 6. 3.

Tabel 6. 3. Karakteristik sedimen permukaan perairan Laut Paya Pesisir Pulau Kundur (Rifardi, 2008a).

Stasiun	Kerikil (%)	Pasir (%)	Lumpur (%)	Mz (Ø)	Katagori*	Tipe
ST-1	7,55	77,31	15,14	1,73	M.Sd.	Pasir
ST-2	16,6	67,01	16,39	1,52	M.Sd	Pasir berlumpur
ST-3	0	35,81	64,19	5,80	MSt	Lumpur berpasir
ST-4	0	39,85	60,15	4,24	C.St	Lumpur berpasir
ST-5	6,36	90,29	3,35	1,21	M.Sd	Pasir
ST-6	0	51,07	48,93	4,05	C.St	Pasir berlumpur
ST-7	7,1	67,30	25,60	2,34	F.Sd	Pasir berlumpur
ST-8	9,23	76,54	14,23	1,30	M.Sd	Pasir
ST-9	16,72	68,39	14,89	1,52	M.Sd	Pasir berlumpur
ST-10	0	62,04	37,96	4,02	C.St	Pasir berlumpur
ST-11	0	83,12	16,88	3,23	Vf.Sd	Pasir
ST-12	0	48,78	51,22	4,44	C.St	Lumpur berpasir
ST-13	0	44,29	55,71	6,03	F.St	Lumpur berpasir
ST-14	0	33,32	66,78	4,75	C.St	Lumpur berpasir
ST-15	0	36,18	63,82	6,04	F.St	Lumpur berpasir
ST-16	0	22,26	77,74	6,12	F.St	Lumpur

Stasiun	Kerikil (%)	Pasir (%)	Lumpur (%)	Mz (Ø)	Katagori*	Tipe
ST-17	17,01	78,76	4,23	0,55	C.Sd	Pasir
ST-18	0	67,00	23,51	2,36	F.Sd	Pasir berlumpur
ST-19	25,59	62,84	7,57	0,65	C.Sd	Pasir berkerikil
ST-20	10,06	51,55	38,39	3,42	Vf.Sd	Pasir berlumpur
ST-21	12,31	62,80	24,89	2,45	F.Sd	Pasir berlumpur
ST-22	3,07	40,63	56,30	5,23	M.St	Lumpur berpasir
ST-23	9,19	57,49	33,32	3,12	Vf.Sd	Pasir berlumpur
ST-24	8,13	44,29	47,58	4,16	C.St	Lumpur berpasir
ST-25	6,72	44,59	48,69	4,35	C.St	Lumpur berpasir
ST-26	5,0	46,45	48,55	4,24	C.St	Lumpur berpasir
ST-27	1,85	40,75	57,40	4,76	C.St	Lumpur berpasir
ST-28	6,66	65,45	28,89	3,02	Vf.Sd	Pasir berlumpur
ST-29	8,94	67,25	23,81	2,42	F.Sd	Pasir berlumpur
ST-30	1,61	44,59	53,80	4,92	C.St	Lumpur berpasir
ST-31	3,49	53,16	43,35	4,22	C.St	Pasir berlumpur
ST-32	15,27	63,32	20,41	1,93	M.Sd	Pasir berlumpur
ST-33	3,29	59,50	37,21	3,48	Vf.Sd	Pasir berlumpur
ST-34	10,61	67,80	21,59	2,12	F.Sd	Pasir berlumpur
ST-35	7,41	66,90	25,69	2,59	F.Sd	Pasir berlumpur
ST-36	8,0	66,20	25,80	2,36	F.Sd	Pasir berlumpur
ST-37	8,3	69,10	22,60	2,53	F.Sd	Pasir berlumpur
ST-38	13,2	69,20	17,60	1,76	M.Sd	Pasir

Stasiun	Kerikil (%)	Pasir (%)	Lumpur (%)	Mz (Ø)	Katagori*	Tipe
						berlumpur
ST-39	7,81	60,28	34,51	3,45	Vf.Sd	Pasir berlumpur
ST-40	2,51	65,58	31,91	3,54	Vf.Sd	Pasir berlumpur
ST-41	5,8	61,09	33,11	3,26	Vf.Sd	Pasir berlumpur

Sumber: Data Primer

*) MSd = Medium *sand* = pasir berukuran sedang

MSt = Medium *Silt* = lempung sedang

CSd = Coarse *sand* = pasir kasar

CSt = coarse *silt* = lempung kasar

FSd = Fine *sand* = pasir halus

FSt = fine *silt* = lempung halus

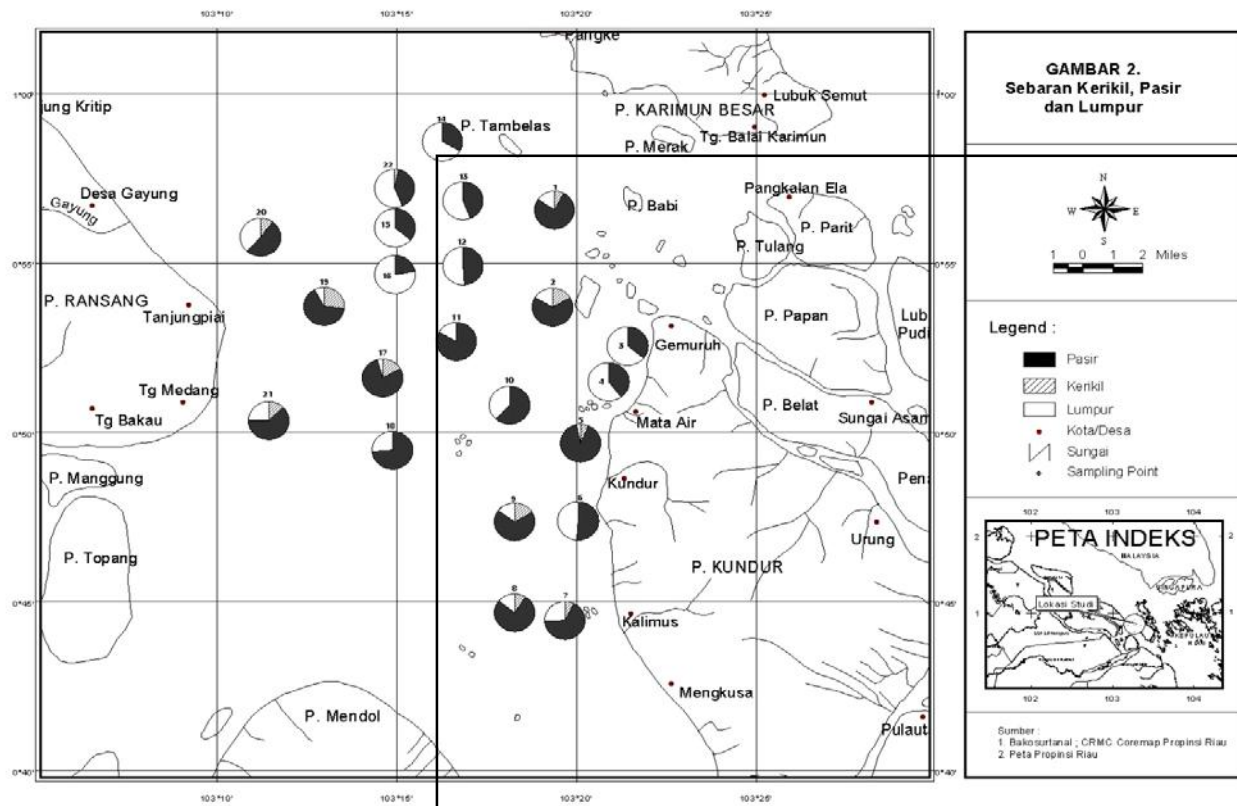
Vf.Sd = very fine *sand* = pasir sangat halus.

Secara umum sedimen permukaan daerah penelitian disusun oleh hampir semua subpopulasi kelas ukuran kecuali subpopulasi kerikil (gravel) tidak dijumpai pada stasiun 3, 4, 6, 10 s.d. 16. Proporsi kerikil yang terbesar dijumpai pada stasiun 19 sebesar 25,59%, hal ini disebabkan oleh letaknya berdekatan dengan perairan pantai berbatu dan bekas terumbu. Sedangkan proporsi pasir berkisar 22,26-90,30% dan lumpur berkisar 3,35-77,74%. Pola sebaran ketiga subpopulasi sedimen permukaan ini dipengaruhi oleh karakteristik oseanografi dan tipe sedimen penyusun pantai Pulau Rangsang, Kundur dan pulau-pulau lainnya yang mengelilingi Laut Paya seperti Pulau Karimun Besar, Merak, Babi, Parit, Papan, Topang dan Pulau Mendol. Pola sebaran subpopulasi ketiga kelas ukuran sedimen tersebut dapat dilihat pada Gambar 6. 5.

Pada Gambar 6. 5. dapat dilihat sedimen yang berukuran pasir mendominasi daerah penelitian, proporsinya melebihi 50%

kecuali daerah bagian utara yang letaknya relatif jauh dari lokasi penambangan didominasi sedimen lumpur. Apabila pola sebaran ini dibandingkan dengan pola sebaran kandungan total padatan tersuspensi di atas maka kedua sebaran mempunyai pola berlawanan. Kondisi ini disebabkan oleh aktivitas penambangan bawah air menyebabkan terjadinya perubahan morfologi dasar perairan. Selain itu, pola dan kecepatan arus pasang surut (Gambar 6. 4) memberikan pengaruh yang berbeda di mana arus ini sangat dominan mempengaruhi pola sebaran padatan tersuspensi, sedangkan morfologi perairan juga dipengaruhi oleh arus dasar perairan.

Rifardi dan Oki (1998) menemukan bahwa pada perairan laut semi tertutup, pola arus dasar perairan lebih dominan mempengaruhi tipe sedimen dibandingkan dengan pola arus permukaan. Proporsi pasir lebih dari 75% tersebar pada stasiun 1, 5, 8, 11 dan 17 terletak sepanjang pantai Pulau Kundur, kecuali stasiun 11 dan 17 terletak berdekatan dengan aktivitas penambangan. Sedimen yang menyusun perairan pantai Pulau Kundur didominasi oleh sedimen berfraksi kasar yang berasal dari hasil abrasi dan lithifikasi pantai berbatu dan bekas terumbu. Sesuai dengan prinsip pengendapan, sedimen yang berukuran kasar akan diendapkan tidak jauh dari sumbernya, dan karena alasan inilah sedimen yang terdapat di stasiun 11 dan 17 didominasi oleh sedimen bertipe pasir (Tabel 6. 3).



Gambar 6.5. Sebaran fraksi kerikil, pasir dan lumpur (Rifardi, 2008a).

Sedimen berukuran lumpur dengan proporsi lebih kecil dari 30% tersebar pada bagian selatan daerah damping dan penambangan. Hal ini terjadi diduga disebabkan oleh daerah bagian selatan dipengaruhi oleh pemasukan sedimen dari Sungai Kampar yang terletak di Pulau Sumatera. Berbeda dengan daerah bagian utara dari daerah damping dan penambangan yang dominan dipengaruhi karakteristik arus Selat Malaka, distribusi sedimen lebih didominasi oleh sedimen lumpur dengan proporsi lebih dari 30%. Davis (1978) memberikan ilustrasi proses sedimentasi di muara sungai sebagai berikut: sedimen halus akan ditranspor menuju arah ke laut kecuali jika arus pasang surut mendominasi proses pemasukan dari aliran sungai, dan sedimen-sedimen kasar akan mengendap pada daerah yang tidak jauh dari muara sungai.

Ukuran diameter rata-rata butiran sedimen ($Mz \ Ø$) menunjukkan kecenderungan pola sebaran yang hampir sama dengan sebaran pasir dan lumpur. Karakter dasar perairan yang didominasi oleh ukuran butir halus ($Mz \ Ø: >3 \ Ø$) pada bagian utara, selain disebabkan oleh hal yang telah dijelaskan, bisa juga dipengaruhi oleh karakter dasar perairan yang berupa lumpur di sebelah utara Pulau Rangsang yang ke dalamannya tidak lebih dari 5 meter (Dehidros, 2001).

Jarak dan Waktu Sedimentasi dari Daerah Damping

Jarak dan waktu proses pengendapan dari daerah damping di wilayah studi ditentukan berdasarkan metode yang telah

dijelaskan. Berdasarkan hasil analisis fraksi sedimen diperoleh gambaran bahwa sedimen permukaan di perairan Laut Paya didominasi oleh dua jenis ukuran butir sedimen yaitu pasir dan lumpur. Oleh sebab itu dalam bab ini yang dianalisis untuk menentukan proses sedimentasi adalah ukuran butir sedimen yang terdapat pada stasiun 23 (sebagai daerah damping) dan stasiun 11 (sebagai daerah penambangan). Hasil analisis ukuran butir sedimen dan karakteristik oseanografi pada stasiun 23 yang terletak di daerah damping dapat dilihat pada Tabel 6. 4.

Tabel 6. 4. Ukuran butir sedimen dan karakteristik oseanografi pada stasiun 23 dan sekitarnya

No	Parameter	Satuan	Nilai
1	Diameter pasir sangat halus	Ø; mm	3,12; 0,115
2	Densitas partikel (pasir sangat halus)	g/cm ³	2,65*
3	Densitas media	g/cm ³	1,025**
4	Kecepatan arus pasang	m/dt	0,21
5	Arah arus pasang	m/dt	180°
6	Kecepatan arus surut	m/dt	0,14
7	Arah arus surut	-	10°
8	Ke dalam perairan rerata	M	8,5

Sumber: Data Primer

* Lewis and McConchie (1994)

** Oseanografi (2005)

Berdasarkan data Tabel 6. 4, maka dasar penghitungan waktu dan jarak pengendapan untuk ukuran butir sedimen pasir sangat halus dari daerah damping pada saat pasang dan surut sebagai berikut:

$$V = \frac{2}{3g} (\rho_p - \rho_f) \frac{r^2}{\pi}$$

$$V = 2/3 \times 9,8 \text{ m/dt}^2 \frac{2,65 \text{ g/cm}^2 - 1,025 \text{ g/cm}^2}{1,07 \times 10^{-3} \text{ kg/(ms)}^{***}} (0,0575 \text{ mm})^2$$

$$V = 0.0327 \text{ cm/dt} = 0.000327 \text{ m/dt}$$

*** = *Oceanography 540-Marine geological processess-Autumn Quarter 2002* (<http://www2.ocean.washington.edu/oc540/lec02-24/>)

Berdasarkan hukum ini maka dapat dihitung jarak dan waktu pengendapan partikel sedimen dari sumbernya sebagai berikut:

Pada Saat Pasang:

$$D = (\sqrt{(Va^2) + (V^2)}) \times t \quad ;$$

$$t = d/V = t = 8,5 \text{ m}/0.000327 \text{ m/dt}$$

$$t = 25.993 \text{ dt}$$

$$t = 7,22 \text{ jam}$$

$$D = (\sqrt{(0,21^2 \text{ m/dt}) + (0.000327^2 \text{ m/dt})}) \times 25.993 \text{ dt}$$

$$D = 5.458,53 \text{ m}$$

Pada Saat Surut:

$$D = (\sqrt{(Va^2) + (V^2)}) \times t \quad ;$$

$$t = 7 \text{ m}/0.000327 \text{ m/dt}$$

$$t = 21.406 \text{ dt}$$

$$t = 5,95 \text{ jam}$$

$$D = (\sqrt{(0,14^2 \text{ m/dt}) + (0.000327^2 \text{ m/dt})}) \times 21.406 \text{ dt}$$

$$D = 2.996,85 \text{ m}$$

Hasil perhitungan matematis tersebut didapat bahwa pada saat pasang (kecepatan arus 0,22 m/dt) sedimen pasir sangat halus (diameter 3,12Ø atau 0,115 mm), ditransportasikan dari daerah damping menuju arah selatan sejauh 5.458,53 meter, dan waktu yang dibutuhkan untuk sampai sedimen ini mengalami proses deposisi pada jarak tersebut adalah 25.993 detik setara dengan 7,22 jam. Sebaliknya pada saat surut (kecepatan arus 0,14 m/dt) sedimen ini akan ditransportasikan ke arah barat laut sejauh 2.996,85 m dan waktu yang diperlukan untuk mengendap pada jarak ini adalah 21.406 dt setara dengan 5,95 jam. Arah transpor sedimen tersebut disebabkan oleh pola arus, seperti pada Gambar 6. 4, pola arus yang terjadi di perairan Laut Paya pesisir Pulau Kundur Kabupaten Karimun Propinsi Kepulauan Riau cukup bervariasi, di mana pada saat pasang arus mengalir ke arah selatan dari daerah damping, sebaliknya pada saat surut arus mengalir ke arah barat laut. Secara dominan proses sedimentasi ditentukan oleh kekuatan arus yang membawa partikel sedimen tersebut, hal terlihat dari perbedaan jarak dan waktu sedimentasi yang disebabkan oleh berbedanya kecepatan arus.

Selain itu, parameter fisika dan kimia perairan juga berperan penting dalam proses sedimentasi, diantaranya suhu dan salinitas. Hasil pengukuran secara *In situ*, suhu perairan lokasi penelitian berkisar 28,6 - 30,5°C, salinitas berkisar 25-32‰ dan pada suhu stasiun 23 suhu air 29,7 °C dan salinitas 29‰ (BKPSL, 2001). Suhu, salinitas dan densitas perairan

mempengaruhi kecepatan tenggelam partikel sedimen (Friedman,1978; Lewis and McConchie, 1994), dan densitas suatu perairan ditentukan oleh suhu dan salinitas perairan tersebut (Millero and Sohn, 1992). Perbedaan proses sedimentasi antara stasiun satu dengan lainnya di lokasi penelitian ini diduga juga disebabkan oleh karakteristik fisika dan kimia perairan.

Jarak dan Waktu Sedimentasi dari Daerah Penambangan

Hasil analisis ukuran butir sedimen dan karakteristik oseanografi pada stasiun 11 dan sekitarnya yang terletak di daerah penambangan dapat dilihat pada Tabel 6. 5.

Tabel 6. 5. Ukuran butir sedimen dan karakteristik oseanografi pada stasiun 11 dan sekitarnya

No	Parameter	Satuan	Nilai
1	Diameter pasir sangat halus	Ø; mm	3,23; 0,1065
2	Densitas partikel (pasir sangat halus)	g/cm ³	2,65*
3	Densitas media	g/cm ³	1,025**
4	Kecepatan arus pasang	m/dt	0,32
5	Arah arus pasang	m/dt	170°
6	Kecepatan arus surut	m/dt	0,14
7	Arah arus surut	-	10°
8	Ke dalam perairan rerata	M	12,9

Sumber: Data Primer

Berdasarkan data pada Tabel 5, maka dasar penghitungan waktu dan jarak pengendapan untuk ukuran butir sedimen pasir

sangat halus dari daerah penambangan pada saat pasang dan surut sebagai berikut:

$$V = \frac{2}{3g} (\rho_p - \rho_f) r^2$$

$$V = 2/3 \times 9,8 \text{ m/dt}^2 \frac{2,65 \text{ g/cm}^2 - 1,025 \text{ g/cm}^2}{1,07 \times 10^{-3} \text{ kg/(ms)}^{**}} (0,05325 \text{ mm})^2$$

$$V = 0.028 \text{ cm/dt} = 0.00028 \text{ m/dt}$$

Berdasarkan hukum ini maka dapat dihitung jarak dan waktu pengendapan partikel sedimen dari sumbernya sebagai berikut:

Pada Saat Pasang:

$$D = (\sqrt{Va^2} + V^2) \times t \quad ;$$

$$t = d/V = t = 12,9 \text{ m}/0.00028 \text{ m/dt}$$

$$t = 46.701 \text{ dt}$$

$$t = 12,79 \text{ jam}$$

$$D = (\sqrt{0,32^2 \text{ m/dt}} + (0.00028^2 \text{ m/dt}) \times 46.701 \text{ dt}$$

$$D = 14.944 \text{ m}$$

$$D = 14,9 \text{ km}$$

Pada Saat Surut:

$$D = (\sqrt{Va^2} + V^2) \times t \quad ;$$

$$t = 11,29 \text{ m}/0.00028 \text{ m/dt}$$

$$t = 40.321 \text{ dt}$$

$$t = 11,2 \text{ jam}$$

$$D = (\sqrt{0,14^2 \text{ m/dt}} + (0.00028^2 \text{ m/dt}) \times 40.321 \text{ dt}$$

$$D = 5.644,95 \text{ m}$$

$$D = 5,6 \text{ km}$$

Sedimen yang tergolong pasir sangat halus pada saat arus pasang, ditransportasikan dari daerah penambangan menuju arah selatan sejauh 14.944 m, dan waktu yang dibutuhkan untuk sampai sedimen ini mengalami proses deposisi pada jarak tersebut adalah 46.701 detik setara dengan 12,79 jam. Sebaliknya pada saat surut sedimen ini akan ditransportasikan menuju arah barat laut sejauh 5.644,95 m dan waktu yang diperlukan untuk mengendap pada jarak ini adalah 40.321 dt setara dengan 11,2 jam.

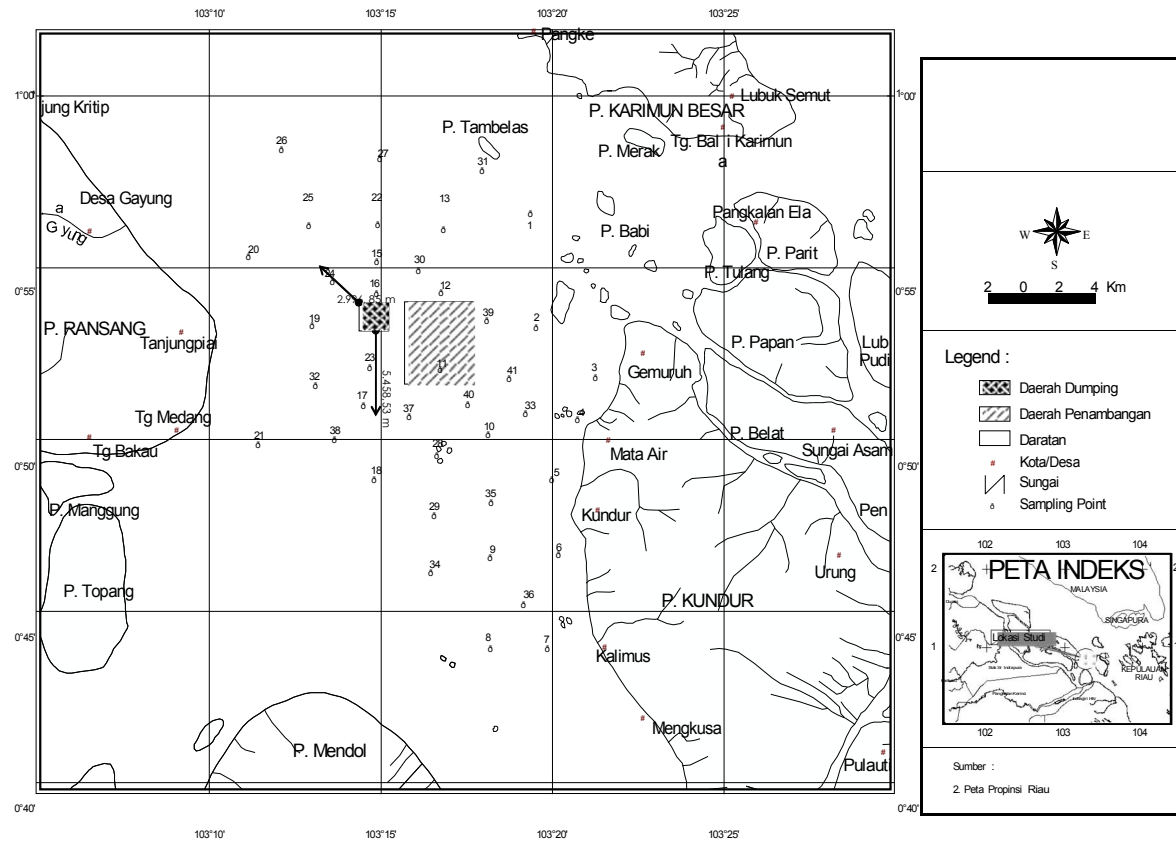
Apabila hasil ini dibandingkan dengan hasil proses sedimentasi dari daerah damping, terdapat perbedaan yang cukup mencolok baik pada saat pasang maupun surut. Hal ini disebabkan oleh perbedaan bentuk batimetri dan kecepatan arus, di mana pada daerah penambangan terjadi proses pendalaman dasar laut dan arus daerah sekitarnya lebih kuat, sebaliknya pada daerah damping terjadi proses pendangkalan dan arusnya lebih lemah.

Berdasarkan hubungan antara distribusi sedimen, jarak dan waktu sedimentasi, dengan aktivitas penambangan bawah

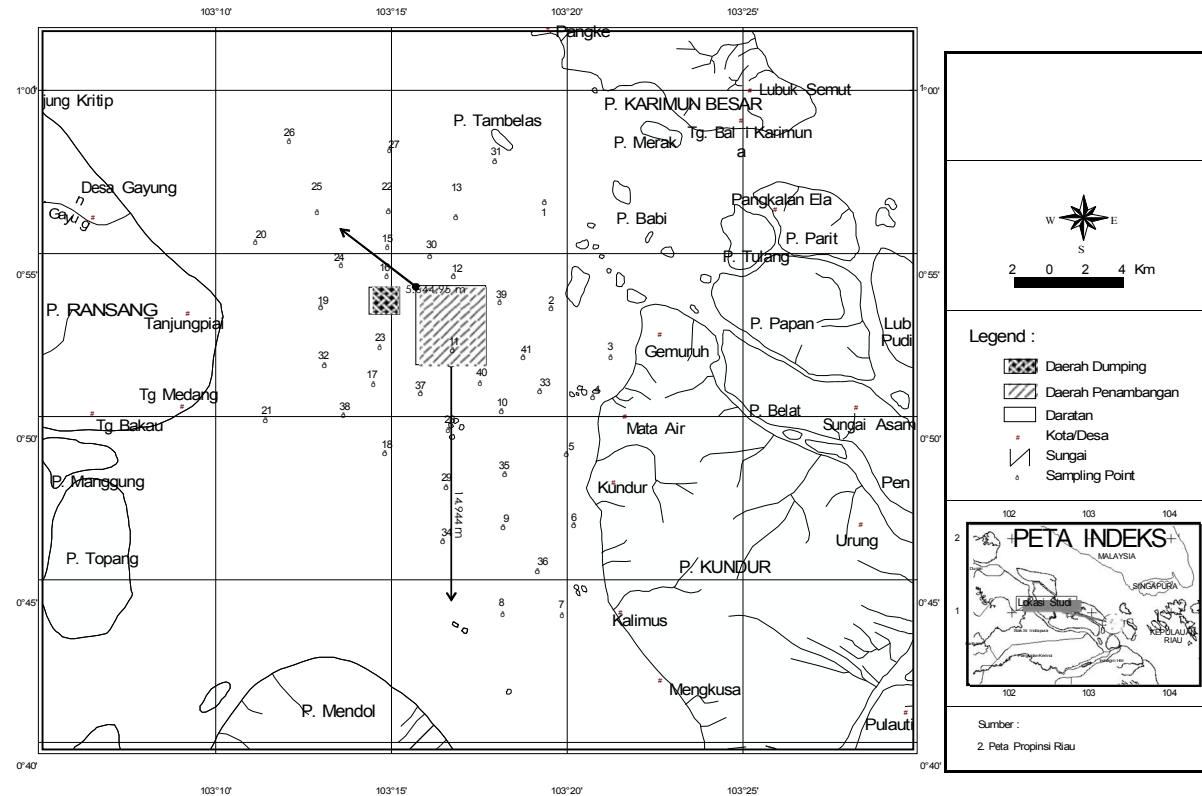
air dan karakteristik oseonografi perairan Laut Paya Pesisir Pulau Kundur Kabupaten Karimun, dapat disimpulkan:

1. Secara umum bagian selatan dari daerah damping dan penambangan dipengaruhi oleh pemasukan sedimen dari sungai-sungai yang berasal dari pulau Sumatera, sedangkan daerah bagian utara dari daerah damping dan penambangan secara dominan dipengaruhi karakteristik arus Selat Malaka.
2. Perairan Laut Paya didominasi sedimen dari subpopulasi pasir (fraksi pasir) khususnya lokasi yang berdekatan dengan daerah damping dan penambangan serta pantai. Sedangkan sedimen subpopulasi lumpur (fraksi lumpur) secara dominan tersebar pada bagian utara jauh dari daerah damping dan penambangan.
3. Arus dasar perairan dan perubahan tipe morfologi dasar perairan akibat penambangan bawah air memainkan peranan penting dalam pola sebaran sedimen di lokasi penelitian ini.
4. Pada saat pasang, sedimen pasir sangat halus ditransportasikan dari daerah damping menuju arah selatan sejauh 5.458,53 meter, dengan waktu deposisi 25.993 detik. Sebaliknya pada saat surut sedimen ini akan ditransportasikan ke arah barat laut sejauh 2.996,85 m dalam waktu 21.406 detik, lihat Gambar 6. 6.
5. Pada saat arus pasang, sedimen pasir sangat halus ditransportasikan dari daerah penambangan menuju arah

selatan sejauh 14.944 m, dengan waktu deposisi 46.701. Sebaliknya pada saat surut sedimen ini akan ditransportasikan menuju arah barat laut sejauh 5.644,95 m dalam waktu 40.321 dt, lihat Gambar 6. 7.



Gambar 6.6. Arah dan jarak transpor sedimen dari daerah damping



Gambar 6.7. Arah dan jarak transpor sedimen dari daerah penambangan

VII. SEDIMENTASI DAN EKOLOGI

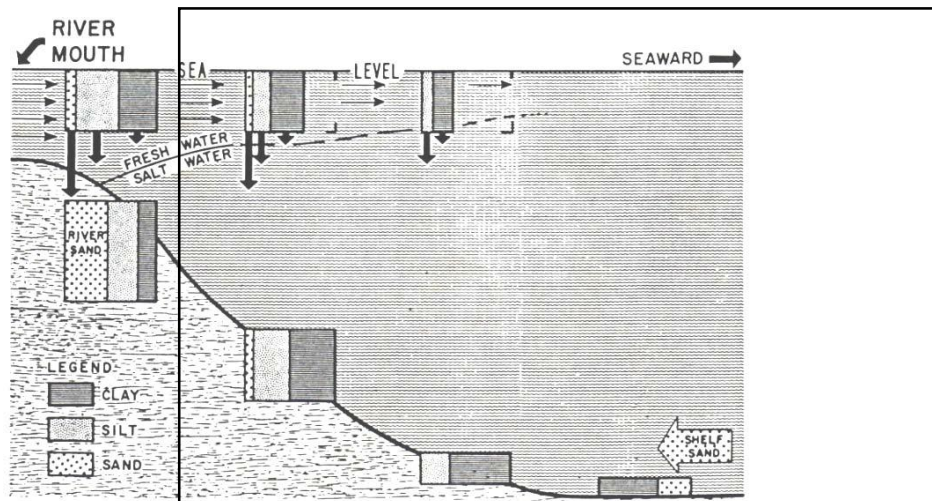
7. 1. Sedimentasi Perairan Pantai

Sedimen yang terdapat pada lingkungan pantai seperti teluk, estuaria, *dune*, delta, dan rawa paya merupakan sedimen yang rentan terkena dampak oleh dua kekuatan yaitu alamiah dan antropogenik. Lingkungan ini merupakan daerah pertemuan antara daratan dan lautan yang dicirikan oleh berbagai kondisi yang kompleks karena secara umum konsentrasi kehidupan dan aktivitas manusia berada di dalamnya. Semenjak adanya peradaban manusia, lingkungan pantai telah menjadi daerah tujuan pengembangan komunitas sosial dan budaya. Oleh sebab itu kenyataan yang ada sekarang menunjukkan pusat-pusat pemukiman, perindustrian dan pariwisata banyak ditemukan pada lingkungan pantai. Kondisi inilah yang menyebabkan perubahan karakteristik sedimen pantai baik fisik maupun kualitas.

Perkembangan komunitas sosial dan budaya yang pesat di daratan seperti pembukaan wilayah untuk pemukiman, perindustrian, pariwisata, pertanian, perkebunan (*landclearing*), dan bentuk alih fungsi lahan lainnya mengakibatkan terjadinya erosi lapisan permukaan endapan daratan dan akan mempengaruhi proses sedimentasi di perairan pantai dan laut. Beberapa perairan pantai mengalami proses pendangkalan akibat terakumulasinya hasil erosi dari daratan. Di beberapa muara sungai terbentuk delta dalam waktu singkat sebagai cikal

bakal lahirnya pulau-pulau sedimentasi baru, contoh kasus sedimentasi yang menarik terjadi di muara sungai Rokan pantai timur Pulau Sumatera di mana pada daerah ini dalam beberapa dekade terbentuk delta-delta baru dan garis pantai bertambah menjorok ke laut. Salah satu pulau baru yang muncul diduga dari proses ini adalah Pulau Barkley. Proses sedimentasi telah merubah bentuk dasar ekologi wilayah perairan sekitar muara sungai Rokan.

Proses pengendapan sedimen yang berasal dari hasil erosi di daratan menyebabkan berbedanya tekstur sedimen (fisik) antara perairan pantai dan laut. Proses pengendapan ini diilustrasikan oleh Scruton dalam Davis (1978) seperti pada Gambar 7. 1.



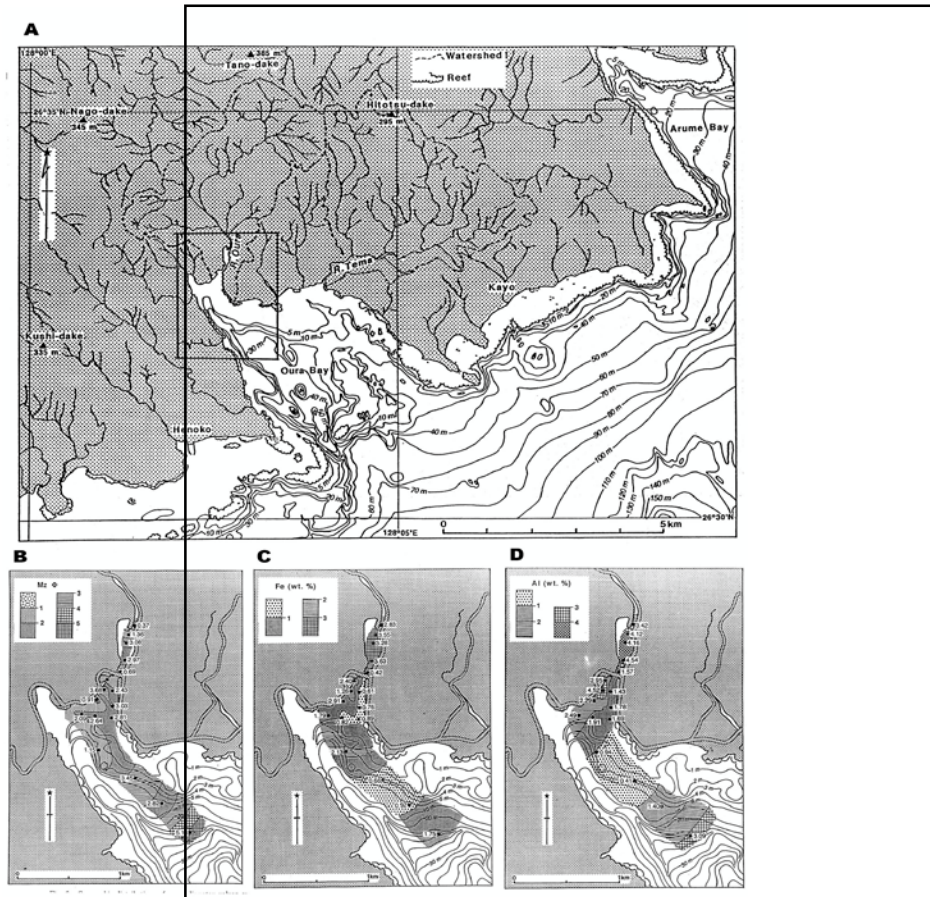
Gambar 7. 1. Proses pengendapan sedimen (Scruton dalam Davis, 1978)

Ilustrasi tersebut menjelaskan proses sedimentasi pada mulut sungai (estuaria) dan menuju laut. Sedimen dengan

ukuran butir kasar (pasir) akan mengendap tidak jauh dari sumbernya yaitu pada daerah sekitar mulut sungai, sebaliknya semakin jauh dari mulut sungai, maka proporsi pasir yang diendapkan semakin sedikit dan pada daerah ini (menuju laut) pengendapan didominasi oleh sedimen berukuran halus (lempung dan lanau).

Analog dengan ilustrasi proses sedimentasi di atas, Rifardi dan Ujiie (1993) menemukan perubahan tekstur sedimen di perairan pantai sekitar perairan estuaria Oura Pulau Okinawa Jepang Selatan akibat pemasukan sedimen dari daratan. Tingginya intensitas suplai sedimen disebabkan oleh pengembangan wilayah daratan yang cukup pesat. Sebaran ukuran butir sedimen menunjukkan sedimen berukuran kasar ditemukan di dekat sumbernya di daratan sekitar muara sungai (estuaria) sedangkan sedimen halus diendapkan pada perairan yang lebih dalam menuju laut seperti pada Gambar 7. 2. Selanjutnya proses sedimentasi ini dibuktikan dengan menganalisis kandungan Fe, Al dan K dalam sedimen karena sebaran Fe, Al dan K yang terikat dalam sedimen mengindikasikan rute perjalanan sedimen *terrigenous* (sedimen yang berasal dari hasil lithifikasi di daratan, dibahas dalam Bab III). Hasil analisis menunjukkan bahwa kandungan Fe, Al dan K dalam sedimen menggambarkan kecenderungan pola sebaran yang sama dengan ukuran butir sedimen. Kandungan Fe, Al dan K lebih tinggi ditemukan pada daerah yang didominasi oleh ukuran butir sedimen kasar di sekitar daerah estuaria dan begitu

juga sebaliknya kandungan lebih rendah ditemukan pada daerah menuju laut yang didominasi oleh sedimen berukuran halus.



Gambar 7. 2. Perairan Estuaria Oura Jepang Selatan (A), daerah dalam kotak menunjukkan daerah pada Gambar B, C dan D; B = sebaran diameter sedimen (Mz); C = sebaran kandungan Fe dalam sedimen dan C = kandungan Al dalam sedimen (Rifardi dan Ujiie, 1993).

Rifardi (1999) menemukan *bimodal* sebaran ukuran butir sedimen permukaan Laut Yatsushiro Jepang di sekitar lokasi yang menerima hasil erosi galian batu yang ada di daratan.

Bimodal sebaran ukuran butir artinya sebaran ukuran butir didominasi oleh dua ukuran butir sedimen yang berbeda. Pada laut ini, sebaran ukuran butir didominasi oleh pasir halus dan lempung kasar. Fraksi pasir diduga berasal dari hasil erosi galian batu yang dibawa oleh hujan dan disebarkan oleh arus permukaan kemudian mengendap di dasar laut tersebut. Sedangkan lempung disebarkan oleh arus dasar yang lemah.

Kekuatan alamiah seperti pola arus dan tingkah laku gelombang pada perairan pantai mampu membentuk dan mengubah proses sedimentasi. Salah satu hasil penelitian yang dilakukan P2KP2 (2001) di perairan pantai Bengkalis, Sumatera membuktikan bahwa arus dan gelombang merupakan salah satu kekuatan yang menentukan arah sedimentasi pada perairan ini. Peranan gelombang yang datang menuju pantai dan arus yang bergerak sejajar dengan garis pantai (*longshore current*) menyebabkan pantai Desa Muntai dan Simpang Ayam tergerus atau terabrasi beberapa meter dalam kurun waktu sepuluh tahun, sebaliknya pada bagian pantai lain di perairan Bengkalis mengalami proses sedimentasi karena sedimen hasil abrasi ini ditranspor dan dideposisi pada daerah ini.

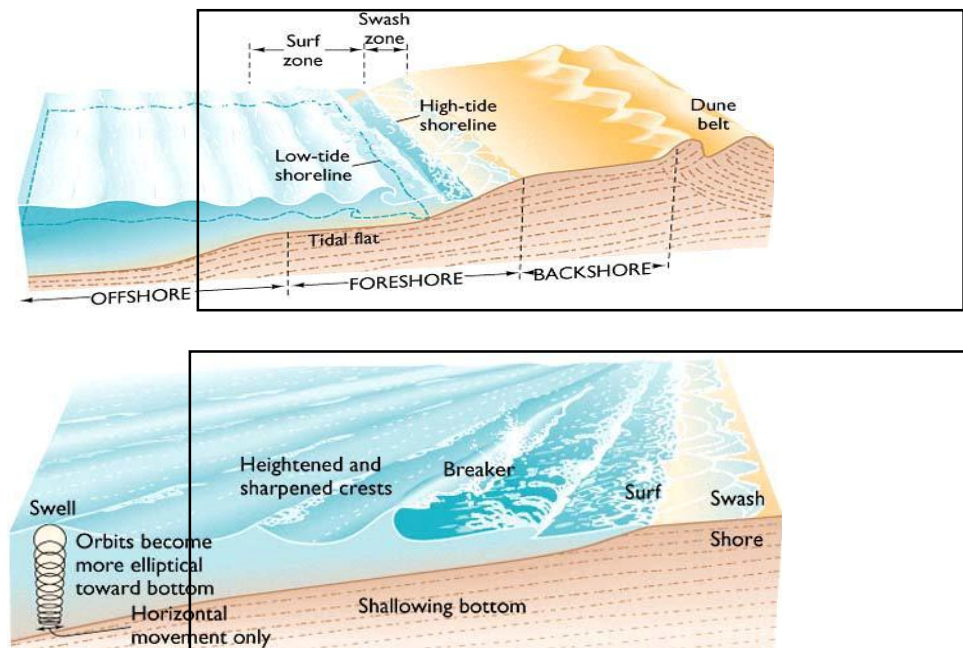
Brahmawanto *et al.* (2000) menjelaskan hubungan antara pola arus dengan beberapa bagian pantai perairan Selat Rupaat Kota Dumai Sumatera yang mengalami abrasi. Mereka menemukan pola umum pergerakan air pasang surut di sekitar pantai ini dipengaruhi oleh kondisi geografis Selat Rupaat yang membelok di depan perairan pantai Kota Dumai. Pada saat

pasang, air bergerak dari utara menuju selatan dan membelok ke arah timur atau tenggara. Sebaliknya pada saat surut, air bergerak dari timur menuju barat kemudian membelok ke utara. Pergerakan air semacam ini dapat membangkitkan arus menyusur pantai (*longshore current*) yang menyebabkan abrasi pada bibir pantai.

Pergerakan sedimen pantai atau transport sedimen pantai adalah gerakan sedimen di daerah pantai yang disebabkan oleh gelombang dan arus yang dibangkitkannya. Di kawasan pantai terdapat dua arah transport sedimen, yaitu pertama adalah pergerakan sedimen tegak lurus pantai (*cross-shore transport*) atau boleh juga disebut dengan pergerakan sedimen menuju dan meninggalkan pantai (*onshore-offshore transport*). Yang kedua, pergerakan sedimen sepanjang pantai atau sejajar pantai yang biasa diistilahkan dengan *longshore transport* (<http://faiqun.edublogs.org/2008/05/30/pergerakan-sedimen-pantai/#more-210>).

Gelombang yang datang menuju pantai membawa massa air dan momentum, searah penjalaran gelombangnya. Hal ini menyebabkan terjadinya arus di sekitar kawasan pantai. Penjalaran gelombang menuju pantai akan melintasi daerah-daerah lepas pantai (*offshore zone*), daerah gelombang pecah (*surf zone*), dan daerah deburan ombak di pantai (*swash zone*). Diantara ketiga daerah tersebut, Triatmodojo (1999) menjelaskan bahwa karakteristik gelombang di daerah *surf zone* dan *swash zone* adalah yang paling penting di dalam analisis proses pantai.

Daerah penjalaran gelombang menuju pantai seperti pada Gambar 7. 3.

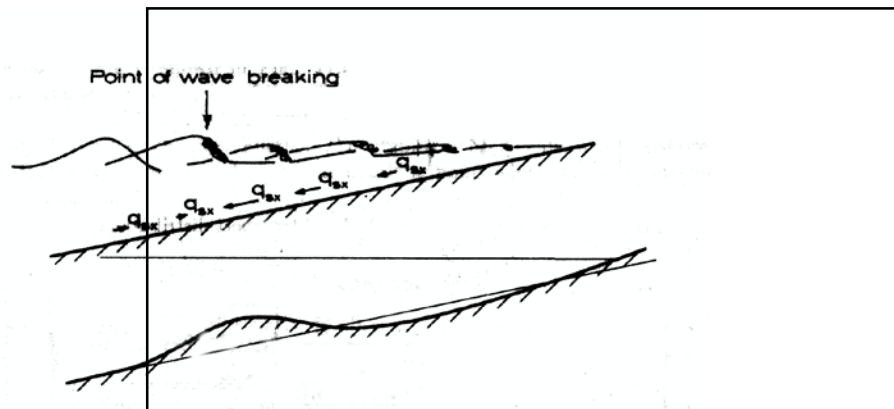


Gambar 7. 3.Daerah penjalaran gelombang menuju pantai (<http://faiqun.edublogs.org/2008/04/19/arus-di-sekitar-pantai-nearshore-circulation/>)

Pergerakan sedimen tegak lurus pantai

Selanjutnya dijelaskan, gelombang yang menjalar menuju pantai membawa massa air dan momentum searah penjalarnya. Transpor massa dan momentum tersebut akan menimbulkan arus di daerah dekat pantai. Gelombang pecah menimbulkan arus dan turbulensi yang sangat besar yang dapat

menggerakkan sedimen dasar. Di daerah *surf zone*, kecepatan partikel air hanya bergerak searah penjalaran gelombangnya. Di *swash zone*, gelombang yang memecah pantai menyebabkan massa air bergerak ke atas dan kemudian turun kembali pada permukaan pantai. Gerak massa air tersebut disertai dengan terangkutnya sedimen, lihat Gambar 7. 4.

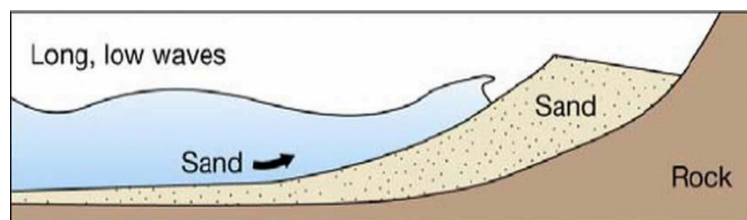


Gambar 7. 4.Skema gambar pergerakan sedimen tegak lurus pantai (<http://faiqun.edublogs.org/files/2008/05/cross-shore-transport.jpg>)

Pada gambar di atas terlihat bahwa arus dan partikel air di dasar bergerak searah penjalaran gelombang menuju pantai. Di daerah mulai pecahnya gelombang (*point of wave breaking*) yang biasa disebut dengan *surf zone*, terlihat adanya pertemuan pergerakan sedimen yang menuju pantai dan yang bergerak kembali ke tengah laut. Selain itu, pergerakan sedimen di luar daerah *surf zone* akan mulai melemah. Akibatnya, di titik ini

akan terbentuk bukit penghalang (bar) yang memanjang sejajar pantai (Fredsoe and Deigaard,1992).

Pergantian musim juga mempengaruhi proses pantai. Turbulensi dari gelombang pecah mengubah sedimen dasar (*bed load*) menjadi suspensi (*suspended load*). Kesenjangan/ketidaksamaan hantaman gelombang (antara dua musim) mengakibatkan penggerusan yang kemudian membentuk pantai-pantai curam yang menyisakan sedimen-sedimen bergradasi lebih kasar. Sebagai contoh di negara kita yang dipengaruhi angin muson, biasanya pada saat bertiup angin timur, gelombang laut akan bersifat konstruktif yaitu membawa sedimen menuju pantai. Demikian juga yang terjadi pada kawasan pantai saat angin tenang atau musim panas (*summertime*). Gambaran kondisi pantai cenderung seperti pada gambar di bawah ini (Gambar 7. 5).

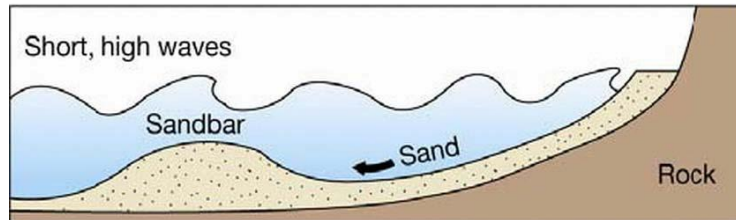


Gambar 7. 5.Potongan melintang profil pantai saat angin tenang (<http://faiqun.edublogs.org/files/2008/05/cross-shore-1.jpg>)

Sebaliknya bila bertiup angin barat, saat bertiup angin badai (*storm*), ataupun saat musim dingin (*wintertime*), maka gelombang laut akan bersifat merusak pantai (*destruktif*) karena massa air akan mengangkut sebagian besar sedimen menuju

tengah laut. Sedimen itu kemudian teronggok di daerah *surf zone* membentuk bukit pasir (*sand-bar*). Gambaran kondisi pantai seperti ini dapat dilihat pada gambar berikut (

Gambar 7. 6).



Gambar 7. 6. Potongan melintang profil pantai saat angin badai (<http://faiqun.edublogs.org/files/2008/05/cross-shore-2.jpg>)

Ombak badai yang curam akan mengikis muka pantai dan mengangkut sedimen menjadi bukit penghalang di *surf zone* di kawasan lepas pantai (*offshore*). Gelombang normal akan membawa kembali sedimen di bukit penghalang membentuk kembali muka pantai seperti sedia kala. Keadaan ini dinamakan sebagai “keseimbangan dinamis” (*dynamic equilibrium*). Selain itu, pergerakan sedimen menuju dan meninggalkan pantai dapat terjadi pula pada dua kemungkinan. Kemungkinan pertama, sedimen bergerak kembali terbawa sirkulasi sel yang berupa *rip current* dan yang kedua terbawa bersama aliran balik (*back flows*).



Gambar 7. 7. Profil pantai yang curam tergerus gelombang badai (<http://faiqun.edublogs.org/files/2008/05/cross-shore-3.jpg>)

Menurut Triatmodjo (1999), gerak air di dekat dasar akan menimbulkan tegangan geser pada sedimen dasar. Bila nilai tegangan geser dasar lebih besar dari pada tegangan kritis erosinya, maka partikel sedimen akan bergerak. Dengan demikian dapat kita simpulkan bahwa variabel-variabel yang mempengaruhi pergerakan sedimen pantai antara lain: diameter sedimen, rapat massa sedimen, porositas, dan kecepatan arus atau gaya yang ditimbulkan oleh aliran air.

Rifardi (2008b) menemukan bahwa pola arus dan tipe morfologi dasar perairan memainkan peranan penting terhadap karakteristik dan sebaran sedimen di perairan Laut Paya Pesisir Pulau Kundur Kabupaten Karimun Indonesia. Sebaran sedimen

ditentukan oleh arus dasar dan pasang surut. Pada perairan ini ditemukan aktivitas penambangan bawah air yang juga ikut mempengaruhi karakteristik dan pola sebaran sedimen. Ada dua rute sedimentasi, yaitu rute selatan dan utara dari daerah aktivitas penambangan, di mana rute ini ditentukan oleh pola arus pasang surut dan bathimetri perairan. Pada saat pasang, sedimen pasir sangat halus ditransportasikan dari daerah penambangan menuju arah selatan. Sebaliknya pada saat surut sedimen ini akan ditransportasikan ke arah barat laut dari penambangan. Jarak dan waktu deposisi sedimen ini lebih besar dan cepat selama pasang dari pada surut, Perbedaan jarak dan waktu deposisi mengindikasikan bahwa kecepatan arus memainkan peranan penting dalam proses deposisi sedimen.

7. 2. Pencemaran Dasar Perairan

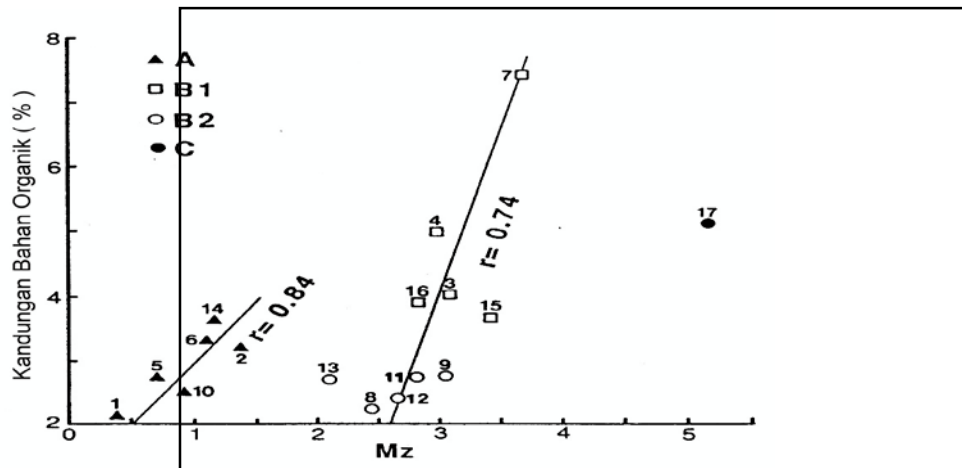
Laut berfungsi sebagai wadah bagi semua bahan buangan hasil aktivitas yang ada di daratan dan lautan baik aktivitas antropogenik maupun alami. Secara alamiah laut akan melakukan asimilasi terhadap semua bahan asing yang diterimanya. Apabila kecepatan asimilasi lebih lambat dari suplai bahan tersebut, maka laut akan kehilangan kemampuan asimilasinya dan pada saat itulah terjadi tekanan ekosistem yang mengakibatkan pencemaran. Menurut Peraturan Pemerintah RI No. 82 tahun 2002, *Pencemaran air* adalah masuknya atau dimasukkannya makhluk hidup, zat, energi dan atau komponen lain ke dalam air oleh kegiatan manusia, sehingga kualitas air

turun sampai ke tingkat tertentu yang menyebabkan air tidak dapat berfungsi sesuai dengan peruntukannya. Dalam kondisi seperti ini fungsi ekosistem lain akan mengalami kemerosotan dan terganggunya keseimbangan serta stabilitas kondisi setiap subsistem yang ada dalam ekosistem. Dengan demikian dapat dikatakan bahwa daya dukung menurun dan daya tampung pada laut tersebut telah terlampaui. *Daya tampung* adalah kemampuan lingkungan hidup untuk menyerap zat, energi dan atau komponen lain yang masuk ke dalam lingkungan tanpa mengakibatkan terjadinya pencemaran. *Daya dukung* adalah kemampuan lingkungan untuk mendukung perikehidupan manusia dan makhluk lainnya (jumlah/satuan luas).

Bahan pencemar yang masuk ke dalam perairan dapat dikelompokkan menjadi bahan pencemar organik dan anorganik. Secara umum sifat bahan pencemar organik larut dalam air, sebaliknya anorganik tidak larut dalam air. Oleh sebab itu bahan pencemar tersebut selalu berada dalam kolom air dan dasar perairan. Bahan pencemar terlarut bersifat labil dan selalu mengalami pengenceran (dilusi) dan bereaksi dengan air laut sehingga sulit mendeteksi sumber pencemar jika terjadi pencemaran di laut luas. Sebaliknya dasar perairan mempunyai kemampuan absorpsi terhadap bahan asing (pencemar) yang masuk dan kemampuan absorpsi ini tergantung pada ukuran butir sedimen. Semakin halus butiran sedimen dasar perairan semakin kuat daya absorpsinya dan sebaliknya.

Walaupun bahan organik larut dalam air, sedimen juga mempunyai kemampuan menyerapnya. Rifardi dan Ujiie (1993) menjelaskan hubungan antara ukuran butir sedimen dengan kandungan bahan organik sedimen. Tujuh belas sampel sedimen dari tujuh belas stasiun di perairan estuaria (Oura Jepang selatan) dikelompokkan menjadi empat kelompok (A: pasir kasar, B1: pasir halus dengan nilai sorting rendah, B2: pasir halus dengan nilai sorting tinggi, dan C: lumpur) dan masing-masing sampel dianalisis kandungan bahan organik dengan menggunakan Metode *Ignition Loss*. Selanjutnya hasil analisis dibandingkan dengan ukuran butir sedimen (Mz) masing-masing stasiun. Hubungan ini menunjukkan koefisien korelasi berkisar 0,74-0,84 yaitu semakin halus ukuran butir semakin tinggi kandungan bahan organiknya. Hal ini berarti bahwa bahan organik cenderung untuk diabsorpsi atau diikat oleh fraksi lumpur. Secara rinci hubungan ini dapat dilihat pada Gambar 7. 8.

Sebagaimana yang telah dijelaskan dalam Bab I bahwa sedimen adalah salah satu media di alam yang mampu menyimpan material hasil berbagai macam dampak aktivitas manusia, dan juga merupakan media yang valid memberikan informasi terhadap semua bentuk material yang diakumulasinya. Dalam Bab ini dijelaskan beberapa kasus pencemaran perairan yang terjadi dan diungkapkan beberapa tahun setelah kejadian tersebut melalui pembuktian hasil analisis sedimen perairan.



Gambar 7. 8. Hubungan antara ukuran butir sedimen (Mz: Ø) dan bahan organik sedimen (Rifardi dan Ujiie, 1993).

Hasil penelitian yang dilakukan CSIRO tentang pencemaran dasar perairan Teluk Buyat Sulawesi Utara Indonesia oleh material tailing PT Newmont dikutip dari Mineral Policy Institute, Australia (mpi@mpi.org.au, 31 Oktober 2004), menjelaskan sampel yang diambil CSIRO di Teluk Buyat Sulawesi Indonesia di titik-titik yang paling terkena dampak tailing Newmont menunjukkan kandungan arsen yang luar biasa tinggi yaitu 678 ppm, 491 ppm dan 466 ppm. Temuan CSIRO sesungguhnya menunjukkan bahwa sedimen di dasar Teluk Buyat telah terkontaminasi oleh limbah tambang (tailing) dengan kandungan arsen yang mencapai 10 sampai 20 kali lipat lebih tinggi dari acuan sedimen dasar laut Australia/Selandia Baru serta acuan ambang batas yang mungkin menimbulkan dampak beracun [*Probable (toxic)*]

Effects Level] yang diterapkan oleh US dan Canada. Hasil yang tak jauh berbeda juga ditemukan untuk kandungan antimon dalam sedimen dasar laut Teluk Buyat. Antimon adalah salah satu logam berat beracun yang terkandung dalam limbah tambang Newmont. Acuan konsentrasi antimon dalam sedimen dasar laut yang diterapkan di US/Canada adalah 9 ppm sedangkan acuan di Australia/Selandia Baru sebesar 25 ppm.

Tomiyasu *et al.* (2000) menemukan kandungan merkuri melebihi kandungan alaminya dalam sedimen (0,1 ppm) di Teluk Minamata Jepang. Mereka melakukan penelitian tentang kandungan merkuri pada sedimen tahun 1996, lima puluh tahun setelah terjadinya pencemaran pertama di Teluk ini yaitu tahun 1946. Limbah yang terkontaminasi merkuri telah dibuang ke Teluk Mimanata dari industri kimia selama dua puluh tahun (1946 – 1965) menyebabkan munculnya penyakit minamata dan teluk ini menjadi dikenal oleh masyarakat dunia khususnya para peneliti setelah ditemukan penyakit minamata sehingga menjadi daerah sasaran penelitian intensif berkaitan dengan polusi air, sedimen dan biota laut. Tomiyasu dan kawan-kawan menjelaskan sedimen permukaan yang terkontaminasi merkuri berada dalam kondisi tidak stabil dan kelihatannya masih bergerak selama 30 tahun sejak aktivitas industri dihentikan tahun 1965. Hasil penelitian mereka membuktikan bahwa sedimen laut merupakan media yang dapat menyimpan sejarah pengendapan

Laut yang berhubungan langsung dengan Teluk Minamata adalah Laut Yatsushiro, dan Rifardi (2008c) menjelaskan hubungan antara sebaran vertikal foraminifera benthik (*Bulimina denudata*) dan kandungan merkuri dalam core sedimen yang diambil dari laut tersebut dengan menggunakan *Gravity Corer*. Lapisan core sedimen yang mengandung merkuri lebih besar dari 0,1 ppm dianggap lapisan yang telah tercemar oleh merkuri, seperti yang telah dijabarkan secara mendalam dalam Bab V. *Bulimina denudata* ditemukan dengan persentase tinggi pada setiap lapisan core sedimen yang mengandung konsentrasi merkuri tinggi (0,14-3,46 ppm), sebaliknya persentasenya rendah pada lapisan core yang belum terpolusi. Presentase *Bulimina denudata* bertambah secara drastis pada lapisan yang mengandung merkuri tinggi. Semua kenyataan di atas mengindikasikan bahwa *Bulimina denudata* mungkin dapat dijadikan sebagai indikator pencemaran merkuri pada sedimen. Tetapi frekwensi *Bulimina denudata* cenderung menurun pada lapisan sedimen yang mengandung merkuri lebih dari 3 ppm, kondisi ini menggambarkan bahwa *Bulimina denudata* tidak cocok hidup dalam kondisi lingkungan sedimen dengan merkuri tinggi tetapi mempunyai toleransi terhadap polutan merkuri.

Hubungan antara karakteristik sedimen (kandungan bahan organik dan ukuran butir sedimen) dasar perairan dengan aktivitas antropogenik di perairan laut dangkal diteliti oleh Arifin (2008). Hasil penelitiannya menyimpulkan bahwa kandungan bahan organik sedimen dipengaruhi oleh aktivitas

antropogenik yaitu suplai bahan organik yang berasal dari aktivitas di daratan dan masuk ke perairan, kemudian mengendap di dasar dan di absorpsi oleh sedimen. Sebaliknya karakteristik fisik sedimen (ukuran butir) tidak dipengaruhi oleh aktivitas antropogenik tetapi dominan dikontrol oleh oseanografi fisika perairan.

7. 3. Teknik dan Rekayasa Pantai

Secara umum aplikasi sedimentologi dapat difokuskan pada empat isu yaitu: 1) polusi dan kontaminasi dalam sedimen, 2) sejarah ekosistem, 3) produksi sedimen di perairan pantai seperti akumulasi/sedimentasi, erosi/abrasi, transportasi dan kekeruhan, dan 4) arus permukaan dan dasar perairan. Dalam sub bab ini hanya dibahas aplikasi sedimentologi khususnya hubungan antara fraksi sedimen dan teknik/rekayasa pantai dalam mengendalikan proses erosi dan abrasi, karena ukuran fraksi sedimen dapat menggambarkan proses transportasi dan pengendapan. Suatu endapan sedimen disusun dari berbagai partikel sedimen yang berasal dari sumber yang berbeda-beda

Sebaran ukuran dalam endapan sedimen terjadi oleh beberapa sebab, salah satunya adalah kemampuan aliran. Sebaran ukuran butir sedimen di perairan menggambarkan karakteristik umum oseanografi (gelombang dan pola arus baik arus permukaan serta arus dasar), dan gambaran ini mengindikasikan kondisi oseanografi yang berlaku pada perairan tersebut selama periode umur lingkungan pengendapan.

Proses sedimentasi dan abrasi disebabkan oleh kekuatan oseonografi dalam hal ini gelombang akan mengikis muka pantai dan mengangkut sedimen menjadi bukit penghalang di lokasi gelombang pecah kawasan lepas pantai (*offshore*) seperti yang dijelaskan pada sub bab diatas. Gelombang normal akan membawa kembali sedimen di bukit penghalang membentuk kembali muka pantai seperti sedia kala. Oleh sebab itu data sebaran ukuran butir sedimen dapat digunakan sebagai informasi penting untuk melakukan rekayasa pantai dalam mengendalikan proses erosi dan abrasi tersebut.

Parameter ukuran butir sedimen seperti diameter, skewness, sorting dan kurtosis dapat digunakan untuk menginterpretasikan kondisi lingkungan oseanografi. Diameter butiran sedimen merupakan ukuran besar kecilnya partikel sedimen dan mengindikasikan kekuatan energi (gelombang dan arus) yang terjadi pada lingkungan pengendapan. Dasar perairan yang didominasi oleh partikel sedimen berukuran kasar menggambarkan perairan tersebut dipengaruhi oleh gelombang dan arus kuat, sebaliknya jika didominasi oleh partikel-partikel halus maka perairan dalam kondisi tenang dan arus lemah.

Skewness memberikan informasi terhadap kecenderungan sebaran butiran sedimen. Jika nilai skewness positif maka sebaran butiran sedimen cenderung didominasi oleh partikel-partikel halus dan sebaliknya nilai skewness negatif sebaran butiran sedimen cenderung didominasi oleh partikel-partikel

kasar. Kecendrungan ini secara langsung menggambarkan dominansi kekuatan energi yang bekerja pada suatu perairan.

Sorting atau pemilahan menggambarkan tingkat keseragaman butiran sedimen. Nilai sorting dapat memberikan informasi tentang kestabilan kondisi oseanografi. Nilai sorting dapat dikelompok menjadi tujuh kelompok sebagai berikut:

1. terpilah sangat baik: besar butir hampir sama,
2. terpilah baik: besar butir relatif sama
3. terpilah agak baik: besar butir agak berbeda
4. terpilah sedang: besar butir tidak begitu sama
5. terpilah buruk: perbedaan besar butir cukup mencolok
6. terpilah sangat buruk: perbedaan besar butir sangat mencolok
7. terpilah amat sangat buruk: perbedaan besar butir amat sangat mencolok

Ketujuh kelompok di atas mengindikasikan tujuh tingkat kestabilan kondisi oseanografi (arus dan gelombang). Jika nilai sorting termasuk dalam kelompok satu (terpilah sangat baik) maka kekuatan arus dan gelombang sangat stabil, artinya kekuatannya hampir sama setiap saat sehingga besar butir sedimen yang didapatkan juga hampir sama. Jika nilai sorting termasuk dalam kelompok tujuh (terpilah sangat buruk) maka kekuatan arus dan gelombang sangat tidak stabil, artinya kekuatannya tidak sama setiap saat sehingga besar butir sedimen yang didapatkan berbeda sangat mencolok.

Kurtosis mengukur puncak kurva sebaran sedimen dan berhubungan dengan penyebaran distribusi normal sebaran butir sedimen. Nilai kurtosis digunakan untuk menguatkan asumsi yang dibuat tentang pola arus melalui analisis sorting. Kurva yang sangat datar menggambarkan sedimen yang terpilah buruk atau kurva *BIMODAL* disebut *PLATYKURTIC*. Kurva yang mempunyai puncak sangat tajam menggambarkan sedimen yang terpilah baik disebut *LEPTOKURTIC*.

Apabila nilai parameter ukuran butir sedimen diplotkan pada peta wilayah perairan dalam bentuk sebaran berdasarkan konturnya, maka akan diperoleh gambaran pola arus dan gelombang beserta kekuatannya. Arah sedimentasi dan sumber sedimen (abrasi) dapat dianalisis dari peta sebaran parameter sk sedimen tersebut. Teknik/rekayasa pantai dapat dilakukan dengan cara memodifikasi proses sedimentasi dan abrasi melalui analisis arah sedimentasi dan sumber sedimen. Hal ini berarti kita dapat mencegah, mengarahkan dan mengalihkan proses sedimentasi dan abrasi pada perairan pantai dengan membuat berbagai bentuk rancang bangun di pantai.

Rifardi (2001a dan b) membuat gambaran sebaran parameter ukuran butir sedimen di daerah estuaria sungai Mesjid Selat Rupa Sumatera. Gambaran ini diperoleh melalui penelitian yang dilatarbelakangi oleh tingginya tingkat abrasi pantai di estuaria tersebut. Hasil penelitian menunjukkan arus menyusuri pantai sebagai salah satu kekuatan dominan penyebab terjadinya abrasi. Pola arus ini dapat digambarkan

melalui sebaran ukuran butir sedimen. Proses abrasi pantai dapat dihalangi dengan cara mencegah arus tersebut melewati pantai estuaria sungai Mesjid, seperti membuat bangunan penghalang atau pengarah arus di pantai ini.

VIII. SEDIMENTASI, DEGRADASI EKOSISTEM DAN PERUBAHAN IKLIM

Bab ini menganalisis dan menjelaskan hubungan yang terjadi antara proses sedimentasi dan degradasi fungsi ekosistem perairan, dan perubahan iklim yang menjadi persoalan global saat ini. Proses sedimentasi yang dimaksud disini adalah semua material yang berasal proses fisika, kimia dan biologi yang masih berada dalam badan/kolom air dan belum mengalami pengendapan.

Proses sedimentasi adalah proses pengendapan butiran sedimen dari kolom air ke dasar perairan Uktoselya (1992). Sedimen dalam bentuk *suspended solid* dibawa ke dalam lapisan (kolom) air (Friedman dan Sanders, 1978). Proses ini secara detil telah diuraikan dalam Bab IV.

Hubungan antara proses sedimentasi dan degradasi fungsi ekosistem perairan, dan perubahan iklim diuraikan berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan oleh penulis dan mahasiswa bimbingan strata 1 (S1) dan strata 2 (S2), dan hasil penelitian ini sebagian telah diterbitkan dalam tulisan ilmiah diantaranya Rifardi *et al* (2011) dan Rifardi (2011). Secara umum hasil penelitian tersebut menjelaskan bahwa material yang berada dalam lapisan (kolom) air sebelum mengalami pengendapan (*total suspended solid: TSS*) mempengaruhi kapasitas asimilasi

perairan, produktivitas primer perairan, dan kemampuan perairan menyerap CO₂.

8. 1. Sedimentasi dan Kapasitas Asimilasi Perairan

Hubungan antara proses sedimentasi dalam hal ini sebaran *total suspended solid* (TSS) dengan kapasitas asimilasi perairan diuraikan berdasarkan hasil penelitian *thesis* Idris (2011) mahasiswa bimbingan penulis. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kapasitas asimilasi berbagai parameter kimia dan fisika perairan salah satu parameter tersebut adalah TSS di Perairan Lobam Provinsi Kepulauan Riau Indonesia.

Perairan Lobam merupakan jalur pelayaran, dan tempat bermuaranya berbagai aktivitas industri dan masyarakat setempat sehingga meningkatkan konsentrasi TSS. Perairan Lobam yang merupakan perairan pantai tertutup karena secara geografis daerah ini terlindung dari pengaruh gelombang dan arus laut secara langsung. Karakteristik pantai perairan relatif landai, bersubstrat pasir dan lumpur. Daerah ini dipengaruhi oleh dua musim yaitu musim timur dan musim barat dengan kecepatan arus 0,10-0,17 m/detik (Wikipedia, 2011 *dalam* Idris, 2011).

Musim timur ditandai dengan musim kemarau (Februari – Agustus) dimana arus mengalir dari barat ke timur yang tidak banyak membawa sedimen, sehingga yang di endapkan di pantai barat relatif sedikit daripada di pantai timur. Sebaliknya musim barat ditandai dengan musim penghujan (September –

Januari) dimana arus mengalir dari barat ke timur disertai curah hujan yang tinggi, diikuti dengan sungai membawa banyak sedimen kemudian terbawa arus dan mengendap di pantai timur.

Penelitian dilaksanakan pada bulan Agustus-November 2010 dengan cara pengambilan sampel air untuk menentukan konsentrasi dan kapasitas asimilasi TSS perairan Lobam (Gambar 8. 1).

Untuk mencapai tujuan penelitian, perairan Lobam dibagi menjadi 3 (tiga) stasiun yaitu Stasiun 1 terletak di muara sungai sebagai sumber pemasukan total suspended solid, Stasiun 2 berjarak 500 m dari Muara, dan Stasiun 3 berjarak 1.000 m dari muara sungai.

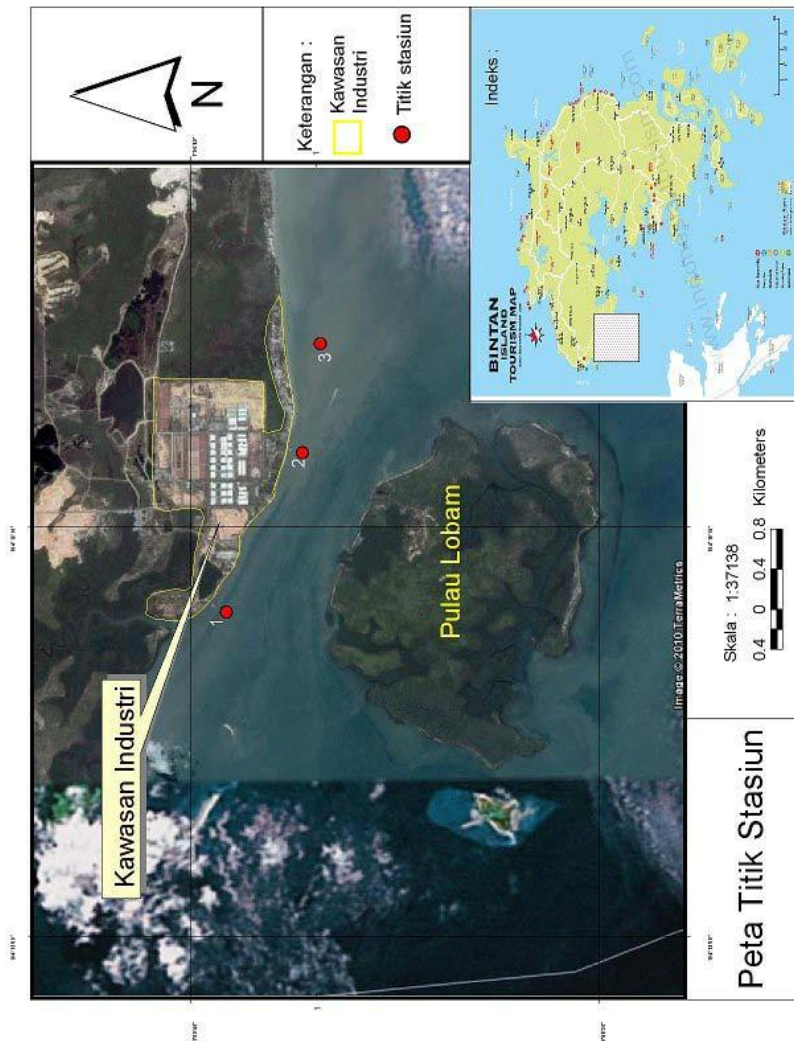
Kapasitas asimilasi perairan Lobam terhadap parameter TSS ditentukan dengan menghitung beban pencemar TSS dari sumber pencemar (Stasiun 1). Beban pencemar dihitung dengan cara mengukur debit air dan konsentrasi parameter TSS di muara sungai (Stasiun 1) yang masuk ke perairan Lobam, dengan rumus berikut:

$$BP = Q \times C \times 3600 \times 24 \times 30 \times 1 \times 10^{-6} \text{ (Mezuan, 2007)}$$

BP = Beban pencemaran yang masuk dari sungai (ton/bulan)

Q = Debit perairan (m³/detik)

C = Konsentrasi beban pencemar (mg/l)



Gambar 8. 1. Stasiun pengambilan sampel total suspended solid (Idris, 2011)

Debit sungai dihitung dengan mengalikan luas penampang sungai dengan kecepatan aliran sungai. Sedangkan konsentrasi beban pencemar TSS dihitung dengan metode

gravimetrik. Angka $3600 \times 24 \times 30 \times 1 \times 10^{-6}$ bertujuan untuk mengkonversi satuan beban pencemar menjadi ton/bulan.

Nilai kapasitas asimilasi ditentukan dengan cara membuat grafik hubungan antara konsentrasi parameter limbah (TSS) dengan beban pencemar. Nilai kapasitas asimilasi didapat dari perpotongan dengan nilai baku mutu untuk parameter yang diuji (Mezuan, 2007).

Nilai Kapasitas Asimilasi dihitung berdasarkan persamaan regresi linier berikut:

$$Y = a + bx$$

Y = Baku mutu, dapat digunakan baku mutu yang relevan dengan tujuan penelitian dan dalam penelitian digunakan baku mutu berdasarkan Kep.Men.LH No. 51/Men-LH/2004.

a = Konstanta nilai Y pada perpotongan garis linear dengan sumbu vertikal

b = Konstanta slope yang berhubungan dengan variabel x

x = Kapasitas asimilasi pada stasiun 2 dan 3

Hasil analisis sampel air yang diambil pada masing-masing stasiun, diperoleh konsentrasi TSS pada Stasiun 1 = 23 ppm, Stasiun 2 = 22,11 ppm dan Stasiun 3 = 21,44 ppm. Konsentrasi ini di bawah standar baku mutu maksimal yang diperkenankan yaitu 80 ppm (Kep.Men.LH.No 51 tahun 2004). Nilai rata-rata TSS tertinggi terdapat pada stasiun 1 yaitu 23 ppm dan terendah terdapat pada stasiun 3 yaitu 21,44 ppm.

Stasiun 1 merupakan tempat penerima limbah sebelum terdistribusi ke laut oleh arus dan gelombang. Sumber limbah berasal dari limbah domestik masyarakat dan industri khususnya yang berada di sekitar sungai.

Proses sedimentasi pada mulut sungai (estuaria) menuju laut telah dijelaskan dalam Bab IV dimana sedimen dengan ukuran butir kasar (pasir) akan mengendap tidak jauh dari sumbernya yaitu pada daerah sekitar mulut sungai, sebaliknya semakin jauh dari mulut sungai, maka proporsi pasir yang diendapkan semakin sedikit dan pada daerah ini (menuju laut) pengendapan didominasi oleh sedimen berukuran halus (lempung dan lanau). Proses ini juga terjadi terhadap tingkah laku TSS di Perairan Lobam.

Nilai TSS pada Stasiun 1 lebih tinggi dari Stasiun 2 dan 3. Hal ini disebabkan oleh selain hal-hal yang dijelaskan diatas, juga oleh proses disperse konsentrasi TSS perairan laut karena pengaruh arus, gelombang dan pergerakan angin.

Berdasarkan nilai konsentrasi TSS dan debit air sungai yang masuk ke perairan Lobam, beban pencemar TSS mencapai 399,90 ton/bulan. Untuk menentukan apakah beban pencemar ini telah atau belum melampaui kemampuan perairan Lobam menerima tanpa menyebabkan terjadinya penurunan kualitas air yang ditetapkan sesuai peruntukannya, maka perlu dihitung kapasitas asimilasi.

Kapasitas asimilasi yang ditentukan adalah kapasitas asimilasi perairan Lobam pada Stasiun 2 dan 3. Kapasitas

asimilasi TSS pada Stasiun 2 diperoleh melalui fungsi $y = 13,7073+0,0210x$ dengan $R^2 = 0,670$ dan dari fungsi ini didapatkan garis perpotongan hubungan beban pencemaran dan kualitas perairan dengan baku mutu, sehingga didapat nilai kapasitas asimilasi sebesar 3.3154,68 ton/bulan. Selanjutnya Kapasitas asimilasi TSS pada Stasiun 3 diperoleh melalui fungsi $y = 13,0405+0,0210x$ dengan $R^2 = 0,679$, sebesar 3.186,32 ton/bulan.

Berdasarkan data diatas dapat disimpulkan bahwa perairan Lobam menerima beban pencemar TSS sebesar 399,90 ton/bulan dan kapasitas asimilasi TSS perairan ini pada Stasiun 2 dan 3 berturut-turut 3.3154,68 ton/bulan dan 3.186,32 ton/bulan. Dengan demikian beban pencemar TSS yang masuk keperairan ini belum melampaui kapasitas asimilasinya. Kondisi ini didukung oleh nilai konsentrasi TSS yang belum melebihi baku mutu peruntukannya.

8. 2. Sedimentasi dan Degradasi Ekosistem Perairan

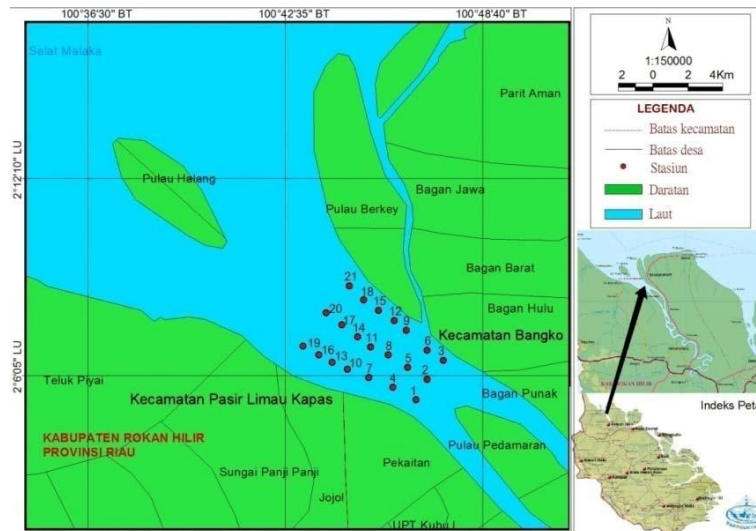
TSS mempengaruhi tingkat kekeruhan air sehingga mengurangi intensitas cahaya matahari masuk ke perairan, dan sebagai akibatnya aktivitas fotosintesis makrophyta dan mikrophyta seperti algae dan fitoplankton terganggu. Kondisi inilah yang menyebabkan menurunnya fungsi ekosistem perairan sebagai produser primer. Sejalan dengan hal ini, Odum (1971) menjelaskan tipisnya lapisan produktif ini disebabkan

oleh energi matahari yang tersedia untuk proses fotosintesis rendah, walaupun unsur haranya berlimpah.

Dalam Subbab ini dikaji secara ilmiah hubungan antara proses sedimentasi dengan degradasi fungsi ekosistem khususnya penurunan produktifitas perairan, berdasarkan studi kasus yang dilakukan oleh penulis dan mahasiswa bimbingan di perairan Estuaria Bagan Pantai Timur Sumatera Indonesia (lihat Gambar 8.2). Hasil penelitian ini telah dipublikasi dalam Rifardi *et al* (2011).

Daerah penelitian dibatasi pada bagian selatan Perairan Estuaria Bagan, panjang lebih kurang 12 km dan lebar 6 km, terletak pada koordinat 1°14' - 2°45' Lintang Utara dan 100°17' - 101°21' Bujur Timur. Kedalaman Perairan berkisar antara 1-8 m. Vegetasi yang tumbuh di sepanjang pantai perairan yang dominan adalah mangrove (*Rhizophora sp*), disamping itu terdapat juga jenis api-api (*Avicennia sp*).

Secara umum penelitian bertujuan untuk menjelaskan hubungan antara karakteristik sedimen dan kondisi lingkungan sekitar Perairan Esturia Bagan berdasarkan analisis sampel sedimen permukaan dan TSS, serta konsekuensi terhadap degradasi fungsi ekosistem khususnya penurunan produktivitas perairan.



Gambar 8. 2. Peta physiographic perairan Esturia Bagan, tanda panah menunjukkan daerah penelitian dalam kotak (Rifardi *et al*, 2011)

Physiographic Perairan Estuaria Bagan

Perairan Estuaria Bagan merupakan wilayah perairan yang berhubungan langsung dengan Selat Malaka suatu selat tersibuk akan aktifitas transportasi pelayaran dunia. Pada Perairan ini bermuara Sungai Rokan salah satu dari empat sungai besar di Propinsi Riau. Sungai ini melintasi dua kabupaten di Propinsi Riau (Rokan Hulu dan Hilir) sejauh 400 kilometer. Pesatnya pembangunan dan pengembangan wilayah di kabupaten tersebut mempengaruhi kelangsungan sumberdaya perairan Perairan Estuaria Bagan, terutama tingginya material tersuspensi yang berasal dari hulu sungai dan yang dibawa arus

pasang mengendap di sekitar muara Sungai Rokan sehingga mengakibatkan pendangkalan perairan.

Perairan Estuaria Bagan, suatu perairan semi tertutup, terletak di Pantai Timur Pulau Sumatera, Indonesia (Gambar 8.2). Topografi perairan ini relatif landai dengan kedalaman berkisar 1-8 meter dan memanjang dari selatan ke utara lebih kurang 28 km dan lebar berkisar 4-18 km. Bagian selatan dicirikan dengan salinitas rendah karena menerima pemasukan air tawar dari Sungai Rokan dengan daerah darinasel luas meliputi daratan Sumatera Bagian Timur, sedangkan bagian utara dipengaruhi oleh arus pasang surut yang cukup kuat dari Selat Malaka.

Perairan ini memiliki karakter pasang surut *semi-diurnal* artinya terjadi dua kali pasang dan dua kali surut. Kecepatan arus berkisar antara 0,35 – 0,69 m/detik pada saat surut dan 0,61 – 0,74 m/detik pada saat pasang. Selain itu, memiliki iklim tropis yang dipengaruhi oleh dua musim yaitu musim hujan dan musim kemarau.

Sedimen Permukaan dan TSS

Sedimen permukaan dasar dan TSS yang digunakan dalam penelitian ini berasal dari 21 stasiun (Gambar 8.2). Sampel sedimen permukaan dasar diambil dengan menggunakan sediment sampler, selanjutnya dianalisis dengan berbagai pendekatan yaitu *mechanical grain size analysis*. *Ignition loss method* untuk menentukan konsentrasi bahan

organik, dan *bulk chemical analysis* untuk menentukan konsentrasi logam berat (Fe, Al dan K). Sampel air diambil menggunakan *Van dorn sampler* bertujuan untuk menentukan konsentrasi TSS di lapisan permukaan dan dasar perairan dengan cara padatan total dikurangi padatan terlarut. Pengambilan sampel air dilakukan pada saat surut dan pasang.

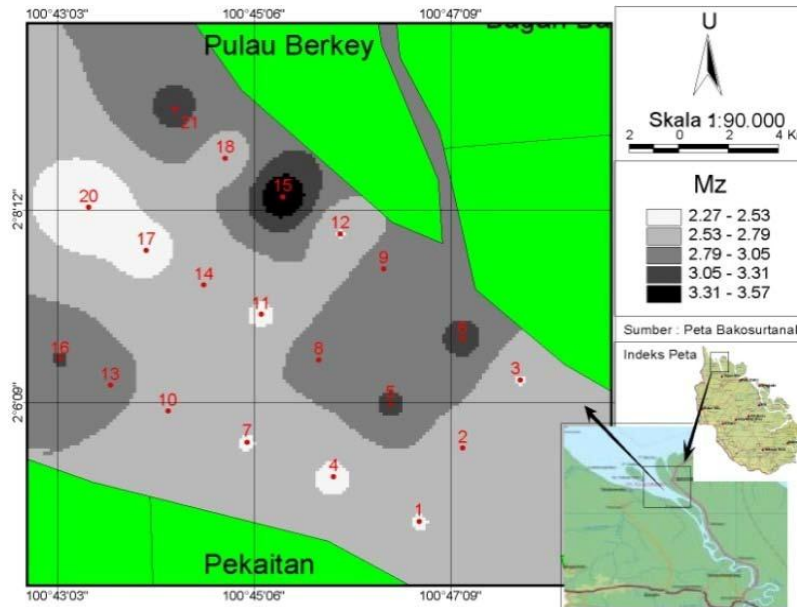
Sedimen permukaan dasar

Hasil *Mechanical grain size analysis* 21 sampel dapat dilihat Tabel 8.1, dan sebaran diameter rata rata sedimen ($Mz \emptyset$) pada Gambar 8.3.

Tabel 8.1 Hasil analisis *Mechanical grain size analysis* sedimen permukaan dasar (Rifardi *et al*, 2011)

Stasi- un	Proporsi Fraksi (%)			Paramater				Tipe Sedi- men
	Kerikil	Pasir	Lumpur	Mz (\emptyset)	Sorting (\emptyset)	SK1	KG	
1	0,36	99,17	0,47	2,53	0,63	0,04	0,82	Pasir
2	0,02	99,44	0,58	2,67	0,57	0,14	0,92	Pasir
3	0,22	98,91	0,85	2,53	0,80	0,17	0,67	Pasir
4	0,99	98,05	0,95	2,50	0,72	0,12	0,63	Pasir
5	0,49	79,82	19,68	3,10	1,22	0,43	1,84	Pasir
6	0,13	97,83	2,02	3,13	0,50	0,08	0,88	Pasir
7	1,60	97,03	1,35	2,53	0,81	-0,01	0,89	Pasir
8	0,13	84,33	15,52	2,97	1,30	0,34	1,61	Pasir
9	8,25	90,30	1,44	2,90	0,62	0,38	0,73	Pasir
10	0,30	98,06	1,05	2,57	0,80	-0,01	0,79	Pasir
11	0,04	92,04	7,90	2,50	1,14	0,27	1,67	Pasir
12	0,25	84,88	14,86	2,53	1,51	0,64	1,59	Pasir
13	0,65	94,46	4,87	2,90	0,73	-0,06	1,02	Pasir
14	0,08	99,15	0,75	2,60	0,67	-0,02	0,78	Pasir
15	0,62	75,09	24,28	3,57	1,52	0,36	1,91	Pasir
16	0,66	88,26	6,31	3,07	0,83	0,23	1,31	Pasir
17	0,05	99,41	0,52	2,43	0,61	0,06	1,11	Pasir
18	0,04	96,01	3,94	2,67	0,74	-0,03	0,98	Pasir
19	0,55	91,33	8,10	2,83	1,18	0,72	1,32	Pasir
20	0,17	99,33	0,48	2,27	0,92	-0,21	0,88	Pasir
21	0	85,06	14,93	3,13	1,03	0,32	1,76	Pasir

Secara umum bagian selatan perairan Estuaria Bagan dicirikan oleh sedimen pasir halus sampai pasir sangat halus (Mz: 2,27-3,57 ϕ). Sebaran geografi ukuran partikel sedimen dapat dilihat pada Gambar 8.3.



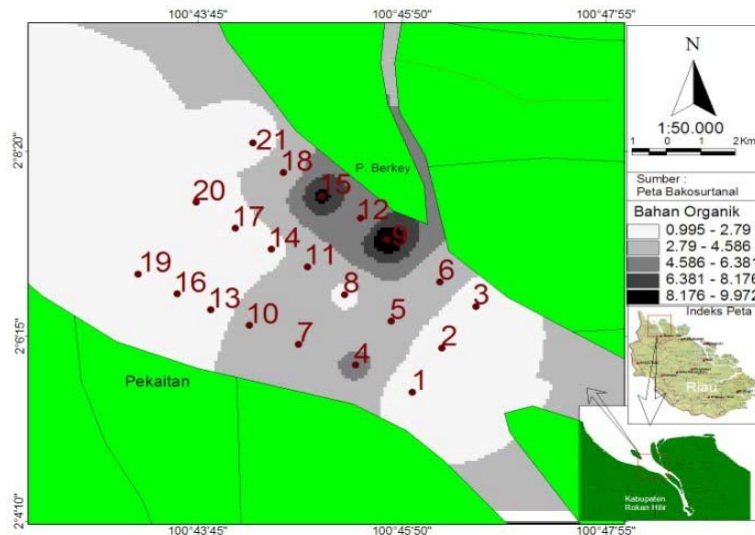
Gambar 8.3. Sebaran diameter rata-rata (Mz: ϕ) sedimen permukaan dasar (Rifardi *et al*, 2011)

Partikel sedimen pasir halus mendominasi bagian sebelah utara atau mengarah ke Selat Malaka, meskipun pada beberapa tempat yang tersebar di lima stasiun yaitu stasiun 5, 6, 15, 16 dan 21 (cenderung menyebar di sekitar Selat Berkey) ditemukan pasir sangat halus. Sebaran partikel tersebut tidak sesuai dengan kondisi perairan Estuaria Bagan saat ini karena dengan kecepatan arus yang cukup tinggi (0.35 – 0.69 m/detik pada saat surut dan 0.61 – 0.74 m/detik pada saat pasang) hanya partikel

yang berukuran kasar yang akan mengendap. Oleh sebab sebaran partikel sedimen halus yang ditemukan saat ini merupakan gambaran kondisi arus pada saat partikel tersebut mengalami proses sedimentasi. Ukuran butir sedimen halus mengindikasikan kekuatan arus (aliran) lemah untuk mentranspor sedimen, begitu juga sebaliknya, hal ini juga ditemukan oleh Rifardi dan Ujiie (1993) dan Rifardi *et al* (1998), menemukan perairan dengan kecepatan arus kuat dicirikan oleh ukuran partikel sedimen kasar, merupakan indikasi besar/kuatnya kekuatan arus dan gelombang yang bekerja pada lingkungan pengendapan tersebut.

Hasil analisis sedimen dengan *Ignition loss method* menunjukkan bahwa kandungan bahan organik sedimen di lokasi penelitian rendah berkisar 0,99-10,01% dengan rata-rata 3,31%. Kandungan bahan organik tertinggi ditemukan pada stasiun 9 (10,01%) dan terendah pada stasiun 2 (0,99%), Gambar 8.4.

Sebaran kandungan bahan organik lebih besar dari 4% ditemukan sepanjang pantai Pulau Berkey dan konsentrasi 2-4% mendominasi lokasi penelitian yang memanjang dari selatan ke utara (dari pantai Pekaitan sampai pantai Pulau Barkey). Gambaran ini mengindikasikan bahwa sedimen *terrigenous* merupakan jenis yang dominan di perairan ini.



Gambar 8. 4. Sebaran kandungan bahan organik pada sedimen permukaan dasar (Rifardi *et al*, 2011).

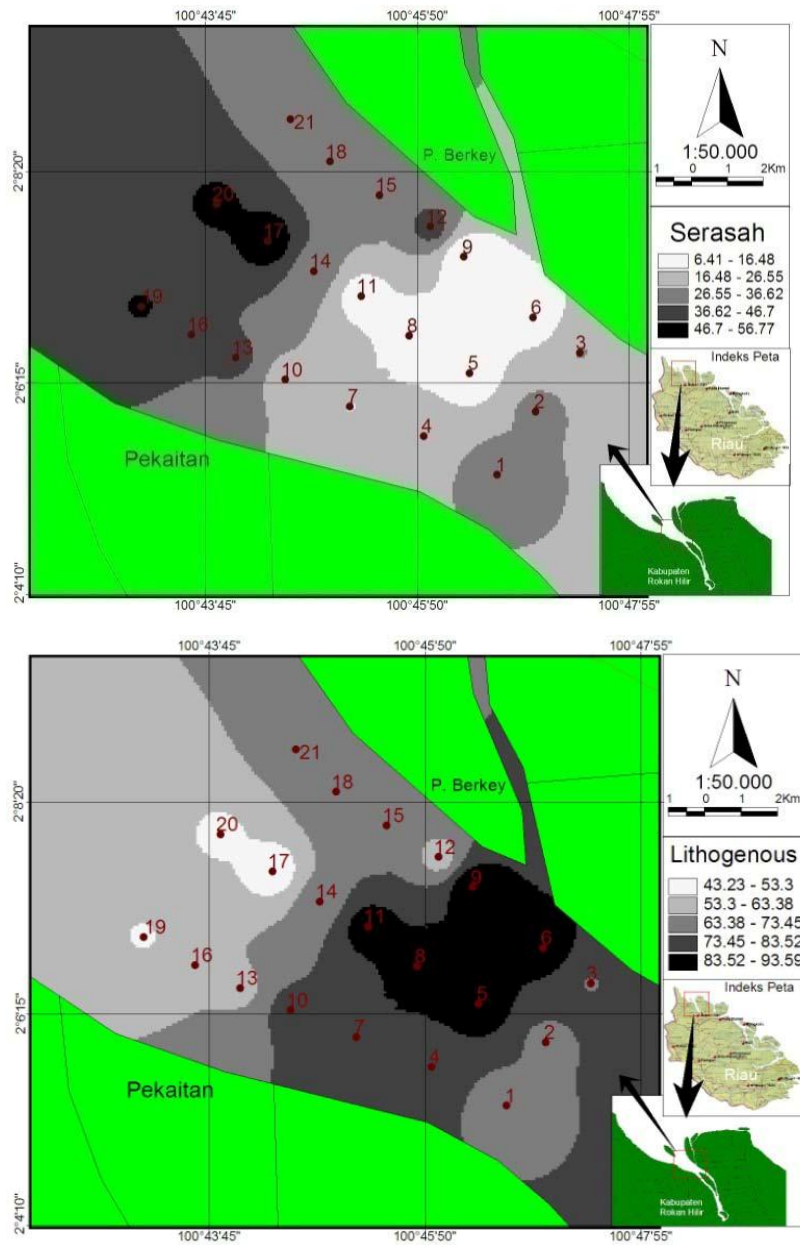
Sebaran kandungan bahan organik lebih besar dari 4% ditemukan sepanjang pantai Pulau Berkey dan konsentrasi 2-4% mendominasi lokasi penelitian yang memanjang dari selatan ke utara (dari pantai Pekaitan sampai pantai Pulau Berkey). Gambaran ini mengindikasikan bahwa sedimen *terrigenous* merupakan jenis yang dominan di perairan ini.

Dominansi jenis sedimen ini semakin jelas ketika hasil analisis komposisi sedimen menunjukkan sedimen Esturia Bagan disusun oleh dua jenis sedimen yaitu *lithogenous* dan *biogenous*. Sedimen *lithogenous* terdiri dari batuan dan mineral mika, sedangkan sedimen *biogenous* berasal dari hasil dekomposisi tanaman mangrove yang terdapat sepanjang pantai Perairan Bagian Selatan Estuaria Bagan, disebut dengan

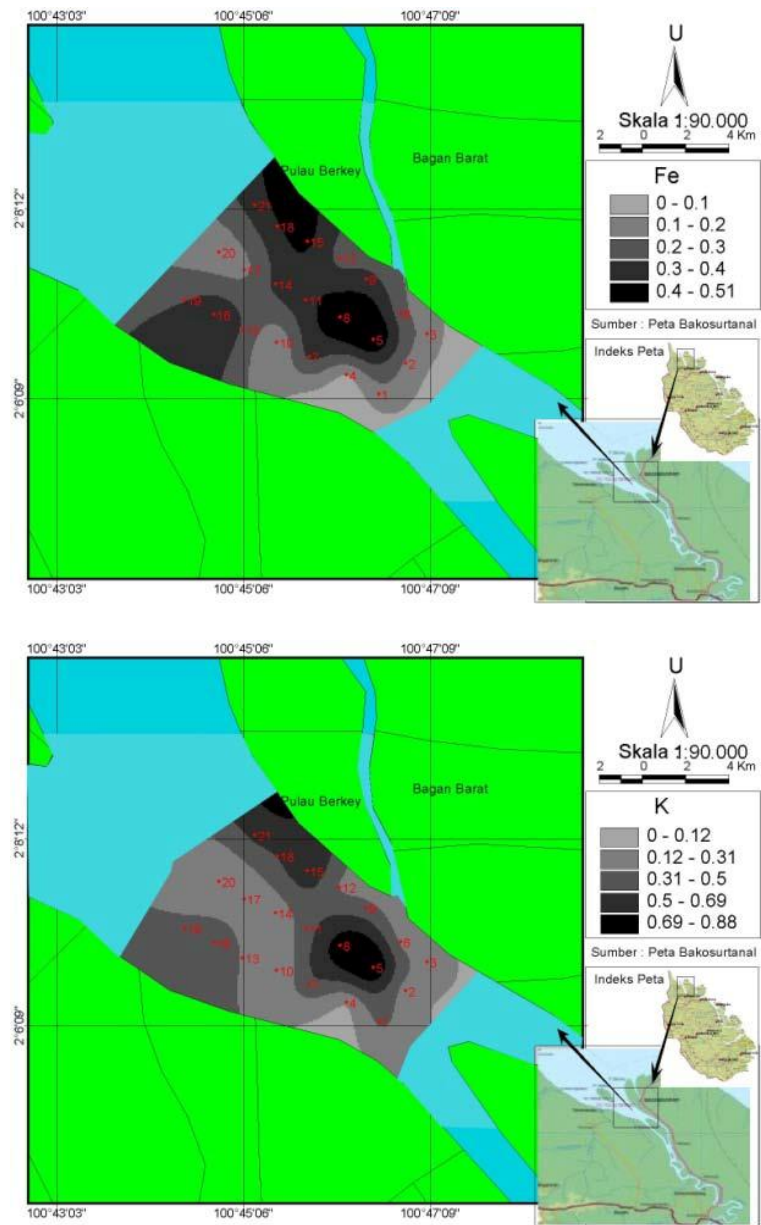
serasah. Sedimen *lithogenous* batuan mendominasi lokasi penelitian (37,6-90,8%) dan mineral mika merupakan material penyusun sedimen dalam jumlah kecil (2,8-8,8%). Sedimen *biogenous* 6,4-56,8%, sebaran jenis sedimen dipetakan pada Gambar 8.5.

Sebaran sedimen *lithogenous* dominan ditemukan daerah yang berdekatan dengan muara sungai, sebaliknya sedimen *biogenous* mendominasi daerah yang mengarah ke laut. Sebaran ini menggambarkan suplai sedimen berasal dari material hasil erosi dari daratan dan abrasi dan juga dari bahan organik serta hasil dekomposisi vegetasi pantai yang kemudian dibawa oleh arus dan gelombang pada saat surut dan terakumulasi di dasar perairan. Perubahan kandungan komposisi sedimen disebabkan juga oleh jarak antara sumber material sedimen dan daerah pengendapan. Dengan demikian perairan Estuaria Bagan menerima pemasukan sedimen dari dari tiga sumber utama yaitu daratan Sumatera melalui Sungai Rokan, abrasi pantai (termasuk dekomposisi vegetasi pantai) dan Selat Malaka melalui arus pasang.

Asal sedimen *lithogeneous* khususnya *terrigenous* dari daratan Sumatera dan abrasi pantai jelas terlihat jika sebaran konsentrasi logam Fe dan K (Gambar 8.6) dibandingkan dengan sebaran sedimen *biogenous*. Pola sebaran cenderung saling berlawanan dimana pada daerah konsentrasi Fe dan K tinggi ditemukan kandungan sedimen *biogenous* rendah.



Gambar 8. 5. Sebaran sedimen *Lithogenous* dan *Biogenous* (Serasah) (Rifardi *et al*, 2011)

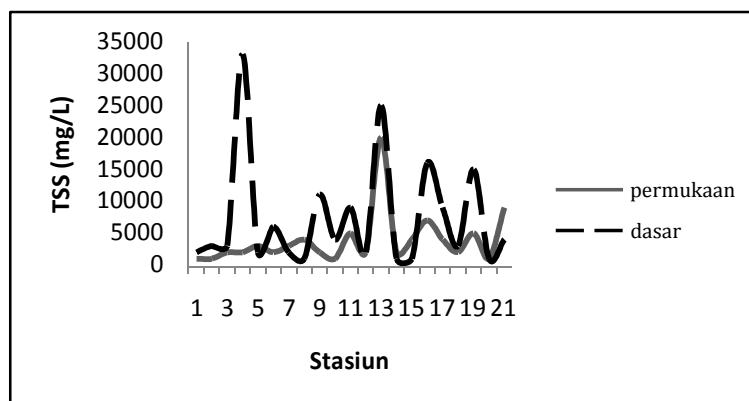


Gambar 8.6. Sebaran Fe dan K pada sedimen permukaan dasar (Rifardi et al, 2011)

Pola sebaran tersebut menggambarkan rute perjalanan dan suplai sedimen *terrigenous* ke perairan Estuaria Bagan. Karena Fe dan K terikat dalam silikat termasuk mineral-mineral *clay*, maka banyak peneliti (Ujiie et al, 1983; Yamamoto and Yuine, 1985; Ujiie and Oshiro, 1993) menganggap bahwa sebaran kedua elemen ini menggambarkan suplai material *terrigenous*. Kondisi ini diperkuat dengan kandungan bahan organik sedimen rendah pada semua stasiun penelitian (kurang dari 10%). Rifardi dan Ujiie (1993) menemukan korelasi negatif antara konsentrasi logam Fe dan kandungan bahan organik sedimen di perairan Estuaria Oura, Jepang selatan, merupakan indikasi pemasukan sedimen *terrigenous*.

Total padatan tersuspensi

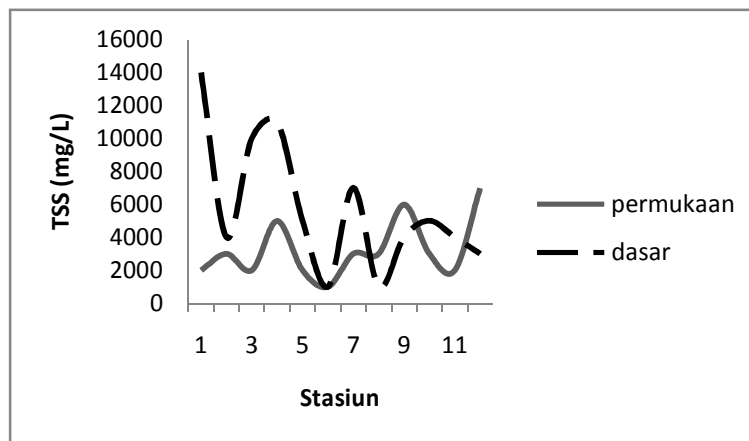
Rute perjalanan dan sebaran sedimen di Perairan Bagan Selatan mempengaruhi sebaran konsentrasi TSS. Secara umum konsentrasi TSS pada dasar perairan lebih tinggi dari permukaan perairan pada saat saat surut (Gambar 8.7).



Gambar 8. 7. Padatan tersuspensi di setiap stasiun saat Surut (Rifardi et al, 2011)

Perbedaan konsentrasi TSS dasar dan permukaan perairan disebabkan oleh kekuatan arus pada perairan ini mendorong terjadi proses erosi dan pengadukan dasar perairan sehingga terlepas butiran partikel sedimen dari endapan dasar.

Pola sebaran TSS pada saat pasang hampir sama dengan pada saat surut dimana konsentrasi di dasar perairan lebih tinggi dibanding dengan di permukaan perairan (Gambar 8.8). Konsentrasi TSS dekat dasar (2.000-33.000 mg/l) lebih tinggi dari permukaan perairan (1.000-20.000 mg/l).



Gambar 8.8. Padatan tersuspensi di setiap stasiun saat pasang (Rifardi *et al*, 2011)

Jika dibandingkan antara Gambar 8.7 dan 8.8, maka dapat dilihat bahwa konsentrasi TSS pada saat surut lebih tinggi dari pada saat pasang meskipun kecepatan arus pada saat surut berkisar 0,35 – 0,69 m/detik lebih tinggi dari pada saat pasang 0,61 – 0,74 m/detik. Kondisi ini disebabkan pada saat surut massa air yang berasal dari Sungai Rokan membawa partikel

tersuspensi lebih banyak dari massa air yang berasal dari arah Selat Malaka pada saat pasang. Rahmansyah dan Rifardi (2010) menemukan suplai TSS dari Sungai Rokan yang masuk ke Muara Sungai ini rata-rata 1.546 mg/l pada saat surut dan dari arah Selat Malaka sebesar 1.220 mg/l pada saat pasang. Selain itu, arus surut menturbulensi sedimen permukaan Muara Sungai Rokan (kedalaman 1-6 meter) dan ditranspor ke arah Estuaria Bagan.

Proses sedimentasi mempengaruhi fungsi perairan Estuaria Bagan khususnya degradasi fungsi ekosistem perairan. Perairan ini menerima pemasukan sedimen dari tiga sumber utama yaitu daratan Sumatera melalui Sungai Rokan, abrasi pantai dan Selat Malaka melalui arus pasang.

Pola dan proses sedimentasi menyebabkan menurunnya secara drastis kemampuan fungsi ekosistem Perairan Bagian Selatan Estuaria Bagan karena terganggu produktivitas *phytoplankton* dan *makrophyta*. Konsentrasi TSS dan tingkat kekeruhan (40-360 NTU) sangat tinggi (*extremely high*) menghambat proses fotosintesis tumbuhan air. Kondisi kualitas air esturia belum tercemar apabila konsentrasi padatan total tersuspensi (TSS) dibawah 20 mg/l untuk koral dan lamun, dan 80 mg/l untuk mangrove, dan tingkat kekeruhan lebih kecil dari 5 NTU, (Kep.Men.LH No.51 tahun 2004).

Bagian selatan Perairan Estuaria Bagan yang dijadikan studi kasus untuk menjelaskan degradasi fungsi ekosistem mempunyai luas 30,36 Km² setara dengan 30.360.000 m² atau

3.306 ha. Proses transpor sedimen melalui perairan ini menghambat penetrasi cahaya yang masuk ke perairan sehingga mengganggu proses fotosintesis yang dilakukan oleh tumbuhan air seperti yang telah dijelaskan diatas. Produktivitas *Phytoplankton* dan *Makrophyta* di perairan Estuaria mencapai 500 g C/m²/tahun (Mann, 1973). Jika proses sedimentasi tidak menyebabkan penurunan kualitas air, maka Perairan Estuaria Bagan mempunyai kemampuan menghasilkan produktivitas primer 15.180 ton C/tahun. Dengan kata lain, proses sedimentasi yang berlangsung di perairan ini mengakibatkan hilangnya fungsi ekosistem sebagai produser primer sebesar 15.180 ton C/tahun.

8. 3. Sedimentasi dan Pemanasan Global

Ada hubungan antara fenomena pengendapan (sedimentasi) akibat akselerasi proses sedimentasi yang berasal dari suplai sedimen daratan (aktifitas antropogenik) dan angkutan sedimen oleh arus dan gelombang (aktifitas alami) dengan pemanasan global. Kemampuan ekosistem perairan dalam menyerap emisi gas rumah kaca seperti CO₂ digambarkan dengan melakukan studi kasus di Perairan Bagian Selatan Estuaria Bagan Pantai Timur Sumatera, Indonesia (Rifardi, 2011).

Pemanasan global mengakibatkan perubahan iklim membawa dampak berupa kemarau yang berkepanjangan, banjir, badai dan peningkatan permukaan air laut. Kenaikan

emisi Gas Rumah Kaca (GRK) yang telah terjadi sejak abad ke 19 memberikan dampak signifikan terhadap pemanasan global (*global warming*).

Perubahan iklim disebabkan oleh proses alami bumi diantaranya rotasi bumi yang mengakibatkan pendataran dan pembengkakan disebabkan oleh kekuatan sentrifugal, teori lempeng tektonik, aktivitas vulkanik, karakteristik lautan, dan oleh aktivitas manusia. Aktivitas manusia merupakan faktor penyebab perubahan iklim yang sangat mungkin untuk bisa dikelola. Emisi GRK CO₂ (karbondioksida), CH₄ (methane), N₂O (nitrogen oksida), CCl₂F₂, CHClF₂, CF₄, (perfluoromethane), dan SF₆ (sulphure hexa-fluoride) berasal dari berbagai sektor aktivitas manusia antara lain penggunaan lahan, perubahan penggunaan lahan, dan kehutanan, energi (pembangkit listrik, transportasi, industri, rumah tangga), dan lainnya.

Pengurangan jumlah emisi karbon dari sektor kehutanan menjadi penting karena tidak saja mendukung upaya dunia untuk membatasi terjadinya peningkatan suhu bumi, tetapi juga memberikan manfaat lain bagi kepentingan masyarakat, ekosistem dan keanekaragaman hayati. Walaupun demikian salah satu ekosistem yang sering dilupakan dan diabaikan peranannya dalam menyerap emisi adalah ekosistem perairan.

Semakin banyaknya pemanfaatan bakar fosil dewasa ini menyebabkan semakin banyaknya emisi gas CO₂ yang dibebaskan ke atmosfer. Di sisi lain, jumlah tutupan vegetasi di

daratan sudah semakin berkurang sebagai akibat pembukaan hutan dan lahan pertanian, baik untuk pemukiman ataupun industri. Sehingga andalan “cadangan” yang memungkinkan untuk menyerap CO₂ adalah vegetasi atau tumbuhan yang ada di perairan, (Supriharyono, 2007).

Luas permukaan bumi 510 juta Km² dan 73% merupakan perairan menjadi potensi besar dalam menyerap gas emisi. Kualitas perairan dipengaruhi oleh aktifitas antropogenik dan alami, dan dampak yang ditimbulkan oleh kedua aktifitas ini salah satunya adalah meningkatkan suplai sedimen sehingga menurunkan fungsi ekosistem perairan tersebut.

Sub Bab ini akan menjelaskan fenomena pengendapan (sedimentasi) akibat adanya akselerasi proses sedimentasi berasal dari suplai sedimen daratan (aktifitas antropogenik) dan angkutan sedimen oleh arus dan gelombang (aktifitas alami) dan hubungannya dengan pemanasan global. Studi fenomena sedimentasi dilakukan oleh Rifardi *et al* (2011) di Perairan Bagian Selatan Estuaria Bagan Pantai Timur Sumatera, Indonesia dan hasil studi ini telah dijelaskan secara rinci pada Sub Bab 8.2. Sub Bab ini mengaplikasikan hasil studi tersebut dengan pemanasan global.

Bagian selatan Perairan Estuaria Bagan mempunyai luas 30,36 Km² setara dengan 30.360.000 m² atau 3.306 ha. Proses transport sedimen melalui perairan ini menyebabkan meningkatnya konsentrasi TSS dan tingkat kekeruhan jauh melebihi kondisi normal seperti yang telah dijelaskan

disebelumnya. Kondisi ini menghambat penetrasi cahaya yang masuk ke perairan sehingga mengganggu proses fotosintesis yang dilakukan oleh tumbuhan air.

Produktivitas *Phytoplankton* dan *Makrophyta* di perairan Estuaria mencapai 500 g C/m²/tahun (Mann, 1973). BM CO₂=44gmol dan C=12grat, maka untuk menghasilkan produktivitas tersebut dibutuhkan CO₂ sekitar 1.833 g/m²/tahun (Supriharyono, 2007). Dengan demikian, jika kualitas air Bagian selatan Perairan Estuaria Bagan dalam kondisi baik (normal) maka akan mampu menyerap CO₂ sebesar 55.649,88 ton/tahun.

Badan Lingkungan Hidup Propinsi Riau (2010) menyatakan, konversi stock C ke unit emisi CO₂ dilakukan dengan mengalikan stock C dengan -44/12, dan untuk konversi removal CO₂ dikalikan dengan +44/12. Tanda negatif menunjukkan equivalensi C dalam menyerap CO₂ dari atmosfer ke dalam biomass, sedangkan tanda positif menggambarkan equivalensi C yang teremisi ke atmosfer dalam bentuk CO₂. Stok karbon pada beberapa kategori penutupan lahan dapat dilihat pada Tabel 8.2.

Tabel 8.2. Nilai estimasi biomasa (Badan Lingkungan Hidup Propinsi Riau, 2010)

No.	Type penutupan lahan	Biomasa (ton/ha)	C (ton/ha)	Keterangan
1.	Hutan rawa gambut tropis primer	252,02	126,01	Rochmayanto (2009)
2.	Hutan rawa gambut tropis sekunder	166,98	83,49	Rochmayanto (2009)
3.	Hutan tanaman lahan gambut <i>Acacia crassicarpa</i>	44,94	22,47	Rochmayanto (2009)
4.	Kelapa sawit	26,60	13,30	Ginoga (2009)
5.	Karet	42,58	2,29	Ginoga (2009)

Jumlah CO₂ diserap oleh masing-masing tipe penutupan lahan sebagai berikut: 1) Hutan rawa gambut tropis primer sebesar 462,03 ton/ha, 2). Hutan rawa gambut tropis sekunder sebesar 306,13 to/ha, 3) Hutan tanaman lahan gambut *Acacia crassicarpa* sebesar 82,39 ton/ha, 4) Kelapa sawit sebesar 48,77 ton/ha, dan 5) Karet sebesar 8,40 ton/ha.

Jika perairan Bagian Selatan Estuaria Bagan mampu menyerap CO₂ sebesar 55.649,88 ton/tahun, maka kemampuan tersebut setara dengan kemampuan menyerap CO₂ hutan rawa gambut tropis primer seluas 120,44 ha, hutan rawa gambut tropis sekunder seluas 181,78 ha, hutan tanaman lahan gambut *Acacia crassicarpa* seluas 675,44 ha, kebun kelapa sawit seluas 1141,14 ha, dan kebun karet seluas 6.627,61 ha.

DAFTAR PUSTAKA

- Akimoto, K., Chisato, M., Akiko, S., and Keiko, F. 2002. Atlas of Holocene Benthic Foraminifera of Shimabara Bay, Kyushu, Southwest Japan. KAUM Monographs. The Kagoshima University Museum. 112pp.
- Anwar, S. 2001. Metode Penelitian Kondisi Fungsi Hidrologis DAS Cimanuk-Cisanggarung dan Beberapa DAS di P. Jawa Melalui Analisis Hidrograf dan Analisis Angkutan Sedimen. Disertasi Program Pasca Sarjana/S3 Institute Pertanian Bogor. Bogor. (Tidak diterbitkan).
- Arifin, B. 2008. Karakteristik Sedimen Ditinjau dari Aktivitas Antropogenik di Perairan Dumai. Skripsi Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan Universitas Riau Pekanbaru, 70 halaman (*skripsi*).
- Badan Lingkungan Hidup Propinsi Riau. 2010. Laporan Kerja Akhir. Pusat Informasi Perubahan Iklim (PIPI) Propinsi Riau, Pekanbaru.
- Bates and Jackson, J. A. 1987. Glossary of Geology. (*editors*). American Geological Institute, Alexandria, Virginia
- Boltovskoy, E., Giussani, G., Watanabe, S. and Wright, R. 1980. Atlas of Benthic Self Foraminifera of The Southwest Atlantic. Dr. W. Junk b.v. Publisher., 147p.
- Bramawanto, R., Rifardi, dan Ghalib, M. 2000. Karakteristik gelombang dan sedimen di Pelabuhan Stasiun Kelautan Universitas Riau dan sekitarnya, Selat Rupa Pantai Timur Sumatera. Jour. Perikanan dan Kelautan Univ. Riau. 5 (13) 25-38.
- Davis, R., A. 1978. Coastal Sedimentary Environments. Springer-Verlag. 419pp.

- Debenay, J., P. and Fabrice, R., 1997. Distribution of the Twenty Seven Dominant Species of Shelf Benthic Foraminifers on the Continental Shelf, North of Dakar (Senegal). *Marine Micropaleontology*. (29): 237-255.
- Donnici, S., Rossana, S., B. and Giancarlo, T., 1997. Living Benthic Foraminifera in the Lagoon of Venice (Italy): Population Dynamics and its Significance. *Micropaleontology* 43 (44):440-454
- English, S. W. and Baker, V. 1994. Survey Manual for Tropical Marine Resources. Australian Insititute of Marine Science, 368p.
- Folk, R.L and Ward, W.C. 1957. Brazos River bar: a Study Significance of Grain Size Parameter. *Jour. Sed. Pet.*, 27:3-26.
- Fredsoe, J. & Deigaard, R. (1992). *Mechanics of Coastal Sediment Transport*.
- Friedman, G. M. dan *Sanders*, J. E. 1978. *Principles od Sedimentology*. John wiley & Sons, Inc, 792pp.
- Harloff, J. and Mackensen, A. 1997. Recent Benthic Foraminiferal Associations and Ecology of the Scotia Sea and Argentine Basin. *Marine Micropaleontology* 31 (1997): 1-29.
- Hatta, A. and Ujiie, H. 1992. Benthic Foraminifera From Coaral Seas Between Ishigaki and Iriomote Islands, Southern Ryukyu Island Arc, Northwestern Pacific. *Bull. Coll. Sci., Univ. Ryukyus*, 53, 49-119; 54, 163-287.
- Hohenegger, J., Piller, W. E. and Ball. C. 1993. Horizontal and Vertical Spatial Microdistribution of Foraminifers in The Shallow Subtidal Gulf of Trieste, Northern Adriatic Sea. *Jour. Foraminifera Res.*, 23 (2), 79-101.

- Idris, F. 2011. Kapasitas Asimilasi Perairan Lobam Provinsi Kepulauan Riau. Program Studi Ilmu Lingkungan. Program Pascasarjana Universitas Riau, 80 halaman (*Thesis*).
- Koesoemadinata. 1980. Prinsip-prinsip Sedimentasi. Departemen Teknik Geologi. Institut Teknologi. Bandung. 124 hal.
- Lewis, D. W and McConchie, D. 1994. Analytical Sedimentology. Chapman and Hall. New York, London, 197pp.
- Mann, K.H. 1973. Seaweeds : Their productivity and strategy for growth. *Science*, 182: 975-981.
- Matoba, Y., Tomizawa, A., Murayama, T., Shiraishi, T., Aita, Y., and Okamoto, K. 1990. Neogene and Quaternary Sedimentary Sequences in the Oga Peninsula. In Guidebook For Field Trips Organized on The Occasion of Fourth International Symposium of Benthic Foraminifera Sendai, 1990, Fossil and Recent Benthic Foraminifera in Some Selected Regions of Japan, Tohoku Univ., p. B1-B62.
- Mezuan. 2007. Kajian Kapasitas Asimilasi Perairan Teluk Jakarta. Sekolah Pascasarjana Institut Pertanian Bogor. Institut Pertanian Bogor. Bogor. 69 Halaman (*Thesis*).
- Millero, F. J. and and Sohn, M. L. 1992. Chemical Oceanography. CRC Press, Inc., 531pp.
- Mojares, E. M., Tomita, K., Rifardi, Oki, K., and Kawano, M., 1996. Quantitative Estimation and Distribution of Detrital Clay Minerals In The Surface Sediments of South Yatsushiro Kai, Japan. *Clay Sci.* 10 (1): 95-112.
- Okada, H and Smith, J., A. 2005. The Evolution of Clastic Sedimentology. Dundedin Academic Press. 251pp.

- Uktoselya, H. 1992. Beberapa Aspek Fisika Air Laut dan Peranannya Dalam Masalah Pencemaran. Hal 143-154 dalam D. H. Kunarso dan Ruyitno (eds). Laporan Seminar Pencemaran Laut. Lembaga Oceanografi Nasional LIPI, Jakarta.
- Presiden RI. 2002. Peraturan Pemerintah Republik Indonesia. Nomor 82 tahun 2002 tentang Pengelolaan Kualitas Air dan Pengendalian Pencemaran Air. Sekretaris Negara. Jakarta.
- Pusat Penelitian Kawasan Pantai dan Perairan. 2001. Studi Konservasi Hutan Mangrove di Pantai Perairan Bengkalis. Kabupaten Bengkalis. Universitas Riau. Pekanbaru.
- Resig, J., M. and Hue, K., C., 1997. Pliocene-Holocene Benthic Foraminiferal Assemblages and Water Mass History, ODP 806, Western Equatorial Pacific. *Micropaleontology*. 43 (4): 419-439.
- Ramansyah, W., dan Rifardi. 2010. Sebaran Padatan Tersuspensi di Perairan Muara Sungai Rokan, Propinsi Riau Indonesia. Prosiding Seminar Nasional Perspektif Sumberdaya Alam dan Lingkungan Hidup Dalam Menghadapi Perubahan Iklim. Badan Kerjasama Pusat Studi Lingkungan Indonesia. ISBN 978-979-792-217-4.
- Rifardi and Ujiej, H. 1993. Sedimentological Aspects of the Oura River Estuary and its Environs on the East Coast of Northern Okinawa Island. *Bull. Coll. Sci., Univ. Ryukyus*, 56, 145-163.
- Rifardi, Oki, K. and Tomiyasu, T. 1998. Sedimentary Environments Based on Textures Surface Sediments and Sedimentation Rates in the South Yatsushiro Kai (Sea), Southwest Kyushu, Japan. *Jour. Sedimentol. Soc. Japan*. (48): 67-84.
- Rifardi and Oki, K. 1998. Relative Sedimentation Rates and L/TI values of benthic foraminifers in the Taphonomy

Inferred From The Southern Yatsushiro Kai (Sea), Southwest Kyushu, Japan. *Fossils*, (65) 10-30.

- Rifardi. 1999. Ecological Analysis of Living Benthic Foraminifera in Surface Sediments from the South Yatsushiro Kai (Sea), Southwest Kyushu, Japan. Disertasi. United Graduate School of Agriculture Science. Kagoshima University, Kagoshima (*un publication*)
- Rifardi. 2001a. Karakteristik Sedimen Daerah Mangrove dan Pantai Perairan Selat Rupa, Pantai Timur Sumatera. *Journal Ilmu Kelautan Universitas Diponegoro*. VI (21) : 62-71.
- Rifardi. 2001b. Study on Sedimentology from the Sungai Mesjid Estuary and its Environs in the Rupa Strait, the East Coast of Sumatera Island. *Journal of Coastal Development*. Research Institute Diponegoro University. 4(2)87-97.
- Rifardi. 2001c. Penuntun Praktikum Sedimentologi Laut. Program Studi Ilmu Kelautan Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan Universitas Riau, Pekanbaru, 62 hal.
- Rifardi. 2002. Ecological Analysis of Living Benthic Foraminifera in Surface Sediments from the South Yatsushiro Kai (Sea), Southwest Kyushu, Japan. *Journal of Coastal Development*. Research Institute Diponegoro University. 5(3)117-129.
- Rifardi. 2003. Karakteristik Sedimen pada Musim yang Berbeda di Sungai Kampar sekitar Aktivitas Masyarakat. *Jurnal Aquatic Science*, Pusat Penelitian Kawasan Pantai dan Perairan, Universitas Riau, 1(2)8-17.
- Rifardi. 2006. Studi Muatan Tersuspensi di Perairan Laut Paya Pesisir Pulau Kundur Kabupaten Karimun Propinsi Kepulauan. *Journal Ilmu Kelautan Univ. Riau*. 21 (VI) 62-71.

- Rifardi. 2008a. Deposisi Sedimen di Perairan Laut Dangkal. Ilmu Kelautan. Indonesia Journal Of Marine Sciences 13(3)147-152.
- Rifardi. 2008b. Distribution of Sediment, Benthic Foraminifera and Mercury in the South Yatsushiro Sea, Kyushu, Japan. Journal of Coastal Development. Research Institute Diponegoro University. Journal of Coastal Development. Research Institute Diponegoro University. 11(3)104-112.
- Rifardi. 2008c. Benthik Foraminifera: Sebaran pada *Recent sediment*. Unri Press, Pekanbaru, 154 hal.
- Rifardi , Rufli, E., Rangga, A. L., Roza, Y., Sari, N. P., 2011. Lingkungan Pengendapan Perairan Selatan Estuaria Bagan dan Sekitarnya Pantai Timur Sumatera Indonesia. *Jurnal Ilmu Lingkungan* 5(1) 66-81.
- Rifardi. 2011. Pemanasan Global dari Sudut Pandang Aspek Sedimentologi Studi Kasus: Perairan Bagian Selatan Estuaria Bagan Pantai Timur Sumatera, Indonesia. *Prosiding Seminar Antarbangsa ke-4. International Seminar Universiti Kebangsaan Malaysia. Perpustakaan Negara Malaysia* ISBN 978-983-2457-34-3
- Safitri, A., N., Rifardi, Hamidy R., 2009. Ukuran Butir Sedimen Perairan Pantai Dumai Selat Rupa Bagian Timur Sumatera. *Jurnal Ilmu Lingkungan* 3 (1) 75-83.
- Shepard, F. P. 1954. Nomenclature Based on *Sand-Silt-Clay* ratio. *Jour. Sed. Pet.*, 24: 151-158.
- Supriharyono, 2007. Pengelolaan potensi sumberdaya hayati laut dan pantai sebagaiantisipasi dampak pemanasan bumi Disampaikan pada Seminar-Lokakarya BKPSL Tentang Perubahan Iklim, di Denpasar Indonesia.
- Tomiyasu, T., Nagano, A., Sakamoto, H., Rifardi, Oki, K. and Akagi, H. 2000. Mercury Contamination in the Yatsushiro sea south-western Japan: spatial variations of mercury in

sediment. *Journal of the science of the total environment*
257: 121-132.

Triatmodjo, B. 1999. "Teknik Pantai".

Ujice, H., Yamamoto, S., Okitsu, M. and Nagano, K., 1983.
Sedimentological aspects of Nakagusuku Bay, Okinawa
Subtropical, Japan. *Galaxea* (2): 95-117.

Ujiie, H and Rifardi, D., 1993. Some Benthic Foraminifera from
The Oura River Estuary and its Environs, Okinawa. *Bull.*
Coll. Sci., Univ. Ryukyus, 56, 121-243.

Ujice, H. and Y. Oshiro, 1993. Surface Sediments of Coral
Seas, West of Miyako Island and its environs, Ryukyus
Island Arc, Japan. *Rep. Tech. Res. Center. Japan National
Oil Corp*

Ujiie, H. and F. Shioya. 1980. Sedimen in Bay of Nago and
Around the Islands of Sesoko. *Sesoko Mar. Sci. Lab.,
Tech. Rept.* 7 (1-17).

Universitas Gajah Mada. *Pedoman Praktikum Geologi Fisik.*
Seksi Geologi fisik, laboratorium geodinamis, Fakultas
Teknik Universitas Gajah Mada, Yogyakarta. 124 hal.

Yamamoto, S. and A. Yuine, 1985. Sedimentation and Some
Chemical Characteristics of Terrigenous Brown Mud in the
Tengan River Estuary and its Adjacent Area of the Kin
Bay, Okinawa. *Galaxea* (4): 77-79.

Wilkinson, C., Dan, D., S. and Goldberg, J. 2006. Status
Terumbu Karang di Negara-Negara yang Terkena
Tsunami, *Australian Institute of Marine Science*. 164p.

INDEKS SUBJEK

A

abrasi · 17, 32, 33, 36, 82, 89, 91,
96, 113, 126, 127, 129
absorpsi · 121, 126
Acacia crassicarpa · 155
algae · 28, 31, 85, 137
ancient sediment · 2
angular · 15, 30, 35, 36, 37
anthracite · 25
antropogenik · 13, 109, 120, 125,
151, 153 aqueous
· 41, 42 argonite ·
29, 50 artifisial · 6, 7,
13, 65 asimetris · 32
atmosfera · 2, 3, 9, 26, 29

B

back flows · 118
batubara · 25
bed load · 16, 117
bimodal · 112
BIMODAL · 129
binokuler · 23, 30
biogenous · 144, 145
biostratigraphi · 2
bioturbasi · 49
bituminous · 25
bitumen · 25
blebs · 26
bottom current · 66, 72
boulder · 17, 19, 41
branchiopoda · 28
bulk chemical analysis · 141

C

caliche · 31
cangkang · 14, 26, 27, 28, 31, 46,
47, 58
carbonaceous · 22
Cesium · 9
clay · 17, 22, 23, 81, 148
cobble · 17
cocolith · 31
concentric · 31
core sampler · 4
corer · 59, 66
cracks · 29
crinoid · 31
cross-shore transport · 114
current meter · 82

D

debris · 26, 27, 46
degradasi · 14
Delta · 58
densitas · 18, 33, 77, 92, 101
destruktif · 117
Detritus · 25
diatom · 28
dinoflagellate · 28
dredger · 4
dune · 37, 109
dynamic equilibrium · 118

E

Echo Sounding · 4, 83
Eckman Grab · 82
Eh · 17, 50, 52
ekologi · 2, 8, 9, 10, 110

EKOLOGI SEDIMEN LAUT · 9

elips · 28, 48
eolian · 42, 44, 45
EOLIAN SUSPENSION · 42
evaporasi · 19
Extremely sorted · 43

F

fecal · 29, 48
feldspars · 22, 23, 50
fitoplankton · 137
fluida · 40, 77
foraminifera · 27, 28, 57, 58, 60, 61, 125
foraminiferologist · 58
fossil · 2
fotosintesis · 137
fragmen · 14, 22, 26, 30, 32
fraksi · 5, 73, 97, 99, 105, 122, 126
fungi · 28, 49
fusulinids · 31

G

gamma · 9
gastropoda · 28
geologi · 1, 8, 30
geometri · 31, 34
geomorphologi · 79
glacier · 23
glauconites · 26
global warming · 152
GRADED SUSPENSION · 42
grapestone · 28, 30
Gravel · 17
gravimetrik · 135
gravity · 66
Gravity Corer · 125
Greek · 29
grinding · 23
gypsum · 50

H

hidraulik · 34
hidrologi · 2, 5
hidrosfera · 9

I

Ignition Loss · 122, 140, 143
inner shelf · 59
Insitu · 101
interclasts · 28, 29, 30
isotop · 5, 9

J

joints · 32

K

kalsit · 31, 52
kalsium · 18, 26, 27, 28, 30, 46, 48, 50, 51, 52
kapasitas asimilasi · 132, 133, 135, 136
karbon · 5, 25, 30, 51
karbonat · 18, 26, 27, 28, 30, 46, 48, 50, 51, 52
klastik · 16
koral · 28, 46
kosmik · 3
kristal · 14, 24, 26
kurtosis · 127, 129

L

laminae · 31
lanau · 19, 41, 111, 136
larva · 26
lattice · 22, 26, 31
LEPTOKURTIC · 129

lithic · 26 lithifikasi ·
111 lithogenous · 144,
145 lithostratigraphi ·
1 litifikasi · 16
longshore current · 113, 114
longshore transport · 114

M

makrophyta · 137, 150, 154
mechanical grain size analysis · 140
mensekresi · 28, 31, 46
metamorfose · 23, 25
mika · 26
mikroorganisme · 14, 47, 49, 53
mikrophyta · 137
mikroskop · 30
Minamata · 3, 65, 124, 125
Moderately sorted · 43
Moderately well sorted · 43
molting · 27
moluska · 27, 28, 48
morphologi · 5, 16, 105, 119
Morphologi · 14
Mud · 17

N

nonklastik · 16
nonskeletal · 28

O

offshore zone · 114
onshore-offshore transport · 114
oids · 28, 29, 30, 31
organisme · 13, 14, 26, 27, 28, 29,
31, 46, 47, 48, 49, 57, 58, 61
oseanografi · 2, 3, 4, 6, 79, 81, 82,
91, 95, 99, 102, 126, 127, 128
Ostracoda · 27
outer shelf · 59

P

Parrot · 27
partikel · 5, 14, 15, 16, 17, 18, 19,
21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29,
30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 40, 41,
42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50,
51, 53, 76, 77, 78, 92, 99, 100,
101, 102, 103, 116, 119, 127
Paya · 18, 78, 79, 80, 81, 82, 83, 85,
86, 90, 91, 93, 95, 99, 101, 105,
119
pebble · 17, 33, 35
Pebble · 33 peletisasi
· 14, 48 pellet · 28,
29, 30, 48 peloids ·
28, 29, 30 pH · 17,
50, 51, 52 fisiologi ·
2
phytoplankton · 150, 154
piroklastik · 14, 25, 26
pisolites · 28, 30, 31
PLATYKURTIC · 129
Poorly sorted · 43
poorly sorted sediment · 43
precipitasi · 26
predator · 27, 28, 46, 47
presipitasi · 18, 19, 50, 51, 52
proton · 52

R

radio isotop · 5
radioaktif · 9
radiolaria · 28
recent sediment · 2, 11
refraktometer · 83
Reynolds · 77
rip current · 118
rolling · 15, 31, 33, 40, 45, 77
rounded · 36
roundness · 15, 33, 34, 35, 36, 37

S

salinitas · 18, 83, 101
saltasi · 15, 40, 45, 77
Sand · 17
sand-bar · 118
sedimen · 1, 2, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10,
11, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 21,
22, 23, 24, 27, 28, 29, 31, 32, 35,
36, 39, 40, 41, 43, 44, 45, 46, 47,
48, 49, 50, 51, 52, 55, 56, 57, 58,
59, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69,
70, 72, 73, 75, 76, 77, 78, 81, 82,
83, 85, 86, 87, 89, 90, 91, 92, 93,
95, 98, 99, 100, 101, 102, 103,
104, 105, 107, 108, 109, 110,
111, 112, 113, 114, 115, 116,
117, 118, 119, 121, 122, 123,
124, 125, 126, 127, 128, 129,
136
sediment trap · 55, 72, 71, 72, 74,
75, 76
sedimentasi · 1, 5, 7, 9, 10, 18, 39,
46, 47, 49, 50, 55, 56, 57, 58, 59,
60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 69, 70,
71, 72, 75, 79, 81, 98, 99, 101,
104, 109, 110, 111, 113, 120,
126, 127, 129, 136
sedimentologi · 1, 2, 3, 4, 7, 9, 11,
126
SEDIMENTOLOGI LINGKUNGAN · 7,
8
SEDIMENTOLOGI SOSIAL · 7, 8
sedimentologist · 58
Sedimentum · 1
sekresi · 14, 26, 27, 46
semi-diurnal · 140
sentrifuge · 24
silikat · 22, 23, 27, 28
silt · 17, 81, 95
simetris · 32
skala richter · 6
skeletal · 26, 27, 28, 30, 31, 46
skeleton · 27, 28
skewness · 127
Skewness · 127
sliding · 40, 45

sorting · 37, 43, 44, 122, 127, 128,
129
spektrum elektromagnetik · 4
sphere · 34
sphericity · 33, 34, 36
sponge · 28
storm · 117
stratigraphi · 1
stratosphera · 26
summertime · 117
surf zone · 114, 116, 118
suspended load · 16, 117
suspended solid · 131
suspensi · 15, 16, 19, 33, 40, 41, 42,
44, 45, 77, 78, 117
swash zone · 114, 116

T

tailing · 10, 123
Tekstur · 16
terrace · 63
terrigenous · 14, 22, 23, 24, 28,
32, 111, 145, 148
topografi · 3
total suspended solid · 131, 133
traksi · 15, 40, 45, 77
transpor · 5, 15, 19, 40, 45, 77, 78,
101, 107, 108
Trigger · 27
trilobites · 27
tsunami · 6
turbulen · 30, 40
turbulensi · 16, 32, 41, 77, 115, 117

U

UNIFORM SUSPENSION · 42

V

vadose · 31
Van dorn sampler · 141

Very poorly sorted · 43
Very well sorted · 43
viskositas · 42, 77, 92
vitric · 26
vulkanik · 14, 23, 26, 64
vulkanogenik · 3

W

weathering · 17, 22, 23, 24, 32, 48,
49, 50, 53

Well sorted · 42, 43
wintertime · 117

Z

zeolites · 50

RIWAYAT HIDUP PENULIS



Prof. Dr. Ir. Rifardi, M.Sc

Prof. DR. IR. RIFARDI, M.Sc adalah dosen tetap pada Jurusan Ilmu Kelautan Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan Universitas Riau dan dosen Program Pasca Sarjana Program Studi Ilmu Kelautan Universitas Riau. Dilahirkan di Pekanbaru Propinsi Riau 25 Januari 1964. Jenjang pendidikan yang pernah ditempuh adalah Fakultas Perikanan Universitas Riau tahun 1989 (Ir. Manajemen Sumberdaya Perairan), Graduate School of Marine Science, University of the Ryukyus, Jepang tahun 1993 (M.Sc. bidang Marine Sedimentology and Environmental Studies, the Undergraduate School of Agricultural Sciences, Kagoshima University, Jepang tahun 1999 (Ph.D bidang Ecology of Marine Sediment). Pernah memimpin Pusat Kajian Sumberdaya Pesisir dan Lautan (PKSPL) Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan Universitas Riau (1999-2001) Pusat Penelitian Kawasan Pantai dan Perairan