

DISTRIBUSI DAN PARTISI GEOKIMIA LOGAM BERAT DALAM SEDIMEN
DI TELUK JAKARTA

TESIS

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk
memperoleh gelar Magister Sains

Oleh:

LESTARI

630508203X



UNIVERSITAS INDONESIA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
PROGRAM PASCASARJANA
PROGRAM STUDI ILMU KELAUTAN
DEPOK
2008

DISTRIBUSI DAN PARTISI GEOKIMIA LOGAM BERAT DALAM SEDIMEN
DI TELUK JAKARTA

TESIS

Oleh:
LESTARI
630508203X



UNIVERSITAS INDONESIA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
PROGRAM PASCASARJANA
PROGRAM STUDI ILMU KELAUTAN
DEPOK
2008

DISTRIBUSI DAN PARTISI GEOKIMIA LOGAM BERAT SEDIMEN DI TELUK JAKARTA

ABSTRAK

Distribusi, pengayaan serta partisi geokimia logam berat Cd, Cr, Cu, Ni, Pb dan Zn pada sedimen dasar di Teluk Jakarta telah dilakukan dengan mengkaji keberadaan dan tingkat kontaminasi sedimen serta konsentrasinya dalam fraksi geokimia. Contoh sedimen diambil pada permukaan sedimen (0-10 cm) dari 14 stasiun di Teluk Jakarta pada bulan Agustus 2007. Contoh sedimen telah dianalisis distribusi ukuran partikel, total bahan organik, kandungan total (mendekati total) logam berat Al, Fe, Mn, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb dan Zn dengan metode USEPA 3050B. Analisis partisi pada logam Cd, Cr, Cu, Ni, Pb dan Zn dengan metode ekstraksi bertahap. Hasil yang didapat dari penelitian ini menunjukkan bahwa beberapa logam dibandingkan dengan panduan mutu mengindikasikan bahwa konsentrasi rata-rata logam berat di sedimen berada dibawah panduan mutu namun pada beberapa lokasi tertentu terdapat konsentrasi yang lebih tinggi dari batas bawah. Indeks geoakumulasi mengindikasikan bahwa sampel sedimen yang diambil didapat ada beberapa stasiun yang telah terpolusi sedang logam Zn, namun pada beberapa sampel sedimen yang diambil tidak menunjukkan terpolusi oleh logam-logam yang lain, demikian juga dengan faktor pengayaan. Berdasarkan jumlah konsentrasi tiap unsur logam yang dapat dilihat dari fraksi non residual (Exchangeable, carbonates, amorf dan crystallin oksida, dan organic) logam Pb, Cd, Cr, Cu, Zn dan Ni, lebih tinggi dibandingkan dengan fraksi residual. Hal ini dapat merepresentasikan proporsi logam berat yang dapat dengan mudah teremobilisasi oleh perubahan kondisi di lingkungan serta sebagian besar sedimen berasal dari aktivitas daratan (antropogenik).

Kata kunci : distribusi, pengayaan, partisi geokimia, logam berat, sedimen

ABSTRACT

DISTRIBUTION AND PARTITION GEOCHEMISTRY IN SEDIMENT, JAKARTA BAY

Metals (Cd, Cr, Cu, Ni, Pb and Zn) distribution, enrichment and partition in sediment from Jakarta Bay have been done to assess with sediment contamination. Sediment samples taken on surface (0-10 cm) from 14 station in Jakarta Bay on Agustus 2007. Sediment samples were analysed distribution, grain size, organic matter, total metals (near total) Al,Fe,Mn Cd,Cr,Cu,Ni,Pb and Zn with methods USEPA 3050B. Metals partition (Cd, Cr, Cu, Ni, Pb and Zn) use sequencing extraction methods. Result from this study showed that some metals compared with sediment quality guide indicated metals concentration under the line threshold value, but in some location have concentration higher than under the line threshold. Geoaccumulation index and enrichment factor indicated that some sediment sample had been moderate pollution with Zn but some sediment sample cannot showed polluted with others metals. Based on metals concentration in non residual fraction in sediment, metals Pb, Cd, Cr, Cu, Zn and Ni, which sum of each metals higher than residual fraction. It can be represented metals proportion can be easy to remobilized by changes in environment condition and most of sediment come from upland activity (antropogenic).

Key words: distribution, enrichment, partition geochemistry, heavy metals, sediment

JUDUL : DISTRIBUSI DAN PARTISI GEOKIMIA LOGAM BERAT
DALAM SEDIMEN DI TELUK JAKARTA

Nama : LESTARI

NPM : 630508203X

MENYETUJUI:

1. Pembimbing

Dr.rer.nat Budiawan
Pembimbing I

Dr. Zainal Arifin
Pembimbing II

2. Penguji

Dr. Ridla Bakri
Penguji I

Dr.rer.nat. Abdul Harris
Penguji II

3. Ketua Program Studi Ilmu Kelautan

Dr. Harsono Soepardjo.M.Eng

Tanggal Lulus : 8 Juli 2008

KATA PENGANTAR

Teluk Jakarta merupakan daerah pesisir semi tertutup, di Bagian Utara Provinsi Daerah Khusus Ibukota (DKI) Jakarta, Indonesia. DKI Jakarta merupakan kota dengan jumlah penduduk dan berbagai macam aktivitas yang padat. Logam berat dapat masuk kedalam sistem ini dari aktivitas didarat maupun di laut. Kualitas lingkungan Teluk Jakarta merupakan hal yang utama untuk keberlangsungan pembangunan yang sangat cepat di daerah pesisir Jakarta.

Logam merupakan kontaminan yang sangat umum ditemukan didasar (sedimen) perairan. Konsentrasi logam yang melebihi konsentrasi alami akibat aktivitas manusia dapat memberikan dampak yang minimum dan tidak berakibat buruk pada komunitas bentik atau biota karena ketersediaan logam secara biologis jauh lebih rendah.

Penelitian mengenai distribusi kandungan logam berat berat dalam sedimen telah banyak dilakukan, namun penelitian mengenai indikasi pengayaan kontaminan dan geokimia logam berat dalam sedimen untuk melihat kualitas sedimen belum banyak dilakukan di Indonesia.

Berdasarkan alasan diatas kami memilih judul thesis yaitu "Distribusi dan partisi geokimia logam berat dalam sedimen di Teluk Jakarta.

Penelitian ini masih jauh dari kesempurnaan, untuk itu saran perbaikan dan kritik dengan senang hati kami terima dan nantikan, terimakasih.

Jakarta, Juni 2008

DAFTAR ISI

	Halaman
ABSTRAK	i
HALAMAN PENGESAHAN	iii
KATA PENGANTAR.....	iv
DAFTAR ISI.....	v
DAFTAR GAMBAR.....	vii
DAFTAR TABEL.....	viii
DAFTAR LAMPIRAN.....	ix
BAB I PENDAHULUAN	
1.1. Latar Belakang Permasalahan.....	1
1.2. Pendekatan Masalah.....	2
1.3. Perumusan Masalah.....	5
1.4. Tujuan dan Manfaat Penelitian.....	5
1.5. Signifikansi Penelitian.....	7
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
2.1. Sedimen.....	8
2.2. Sifat fisik kimia sedimen laut.....	9
2.2.1. Komponen Fisik Kimia.....	9
2.2.2. Materi organik dalam sedimen.....	11
2.2.3. Sedimen sebagai indikator pencemar.....	11
2.3. Pencemaran Logam Berat.....	15
2.3.1. Logam Berat.....	11
2.3.2. Perilaku dan nasib logam di lingkungan	18
2.3.3. Kadmium.....	20
2.3.4. Kromium (Cr).....	21
2.3.5. Timah Hitam (Pb).....	21
2.3.6. Nikel (Ni).....	22
2.3.7. Tembaga (Cu).....	23

2.3.8. Seng (Zn).....	24
2.4. Geokimia logam berat dalam sedimen.....	25
BAB III METODE PENELITIAN	
3.1. Waktu dan Lokasi Penelitian.....	30
3.2. Bahan dan Peralatan.....	31
3.3. Metode.....	31
3.3.1. Penentuan stasiun pengambilan sampel.....	31
3.3.2. Pengumpulan dan penanganan sampel.....	32
3.3.3. Pengumpulan Data.....	33
3.3.4. Teknis Analisis.....	34
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	
4.1. Karakteristik sedimen.....	39
4.1.1. Ukuran Partikel Sedimen.....	39
4.1.2. Bahan Organik Total.....	41
4.2. Distribusi Logam berat.....	41
4.3. Perbandingan dengan pedoman kualitas sedimen.....	48
4.4. Indikasi Pengayaan.....	49
4.5. Distribusi logam sebagai hubungan dengan sifat alami sedimen	53
4.6. Fraksi geokimia logam berat.....	43
BAB V. KESIMPULAN DAN SARAN	
Kesimpulan.....	69
Saran.....	70
Ucapan Terima Kasih.....	71
Daftar Acuan.....	73

DAFTAR GAMBAR

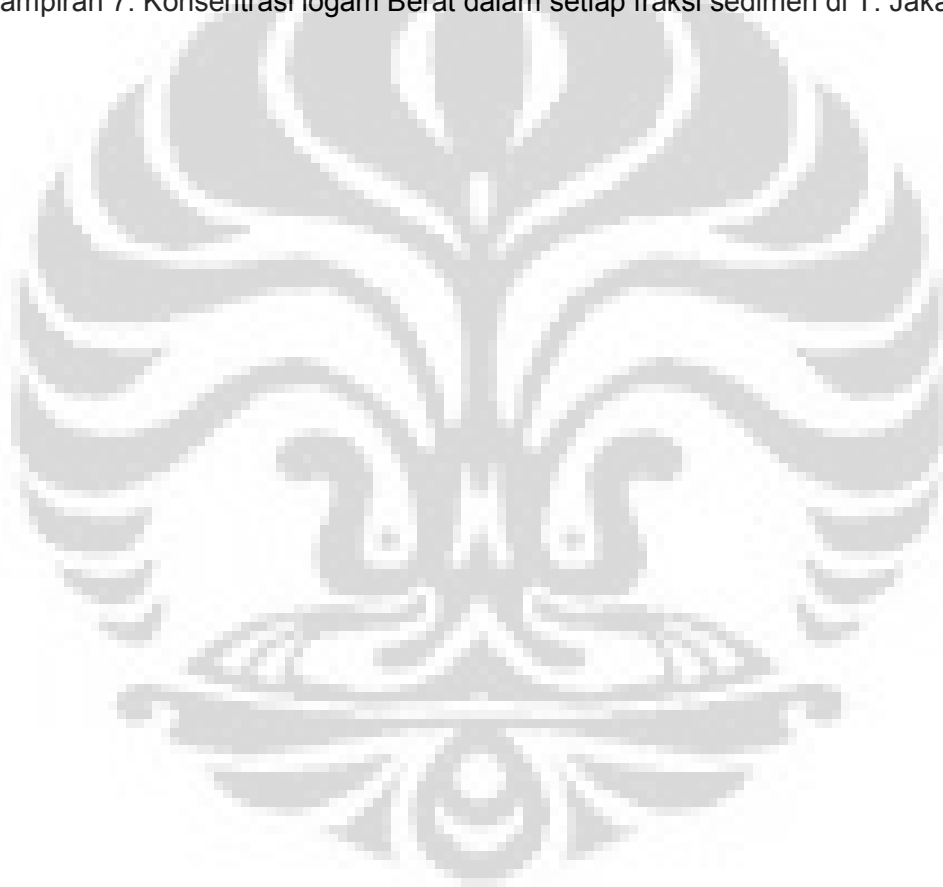
	Halaman
Gambar 1. Perumusan Masalah.....	6
Gambar 2. Hubungan antara manusia, logam dan lingkungan.....	13
Gambar 3. Interaksi dan perilaku zat pencemar di lingkungan sedimen.....	15
Gambar 4. Bentuk kimia dari logam pada fase padat.....	28
Gambar 5. Lokasi studi dan pengambilan sampel.....	32
Gambar 6. Skema analisis sedimen.....	35
Gambar 7. Prosentase ukuran partikel dalam sedimen.....	40
Gambar 8. Distribusi ukuran partikel <63 um (%) dalam sedimen.....	40
Gambar 9. Distribusi bahan organik (%) dalam sedimen	42
Gambar 10. Distribusi logam Pb dalam sedimen.....	44
Gambar 11. Distribusi logam Cu dalam sedimen.....	44
Gambar 12. Distribusi logam Zn dalam sedimen.....	45
Gambar 13. Distribusi logam Cd dalam sedimen	46
Gambar 14. Distribusi logam Cr dalam sedimen	46
Gambar 15. Distribusi logam Ni dalam sedimen	47
Gambar 16. Indeks geoakumulasi logam dalam sedimen.....	51
Gambar 17. Hubungan antara kelimpahan partikel < 0,63 um dan Al.....	55
Gambar 18. Hubungan Al dengan logam lain.....	58
Gambar 19. Faktor pengayaan logam dalam sedimen	59
Gambar 20. Prosentasi logam dengan fraksi geokimia dalam sedimen.....	45
Gambar 21. Konsentrasi logam (mg/kg) dalam fraksi geokimia dalam sedimen	50

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 1. Faktor yang mempengaruhi akumulasi logam berat dalam sedimen.....	19
Tabel 2. Mobilitas dan bioavailabilitas relatif logam.....	29
Tabel 3. Alat dan bahan penelitian.....	33
Tabel 4. Recovery CRM BCSS-1.....	36
Tabel 5. Prosedur ekstraksi bertahap untuk fraksinasi logam dalam sedimen	38
Tabel 6. Konsentrasi total logam berat (mg/kg) di sedimen.....	43
Tabel 7. Perbandingan kualitas sedimen dengan panduan mutu.....	49
Tabel 8. Indeks Geoakumulasi.....	51
Tabel 9. Perbandingan konsentrasi logam berat di Teluk Jakarta dan Background Value.....	52

DAFTAR LAMPIRAN

	Halaman
Lampiran 1. Skema analisis logam berat dalam fraksi geokimia.....	77
Lampiran 2. Persamaan linier regresi total dan fraksi logam berat.....	78
Lampiran 3. Tabel prosentase ukuran partikel dalam sedimen	81
Lampiran 4. Tabel prosentase LOI dan lumpur dalam sedimen.....	82
Lampiran 5. Tabel hasil perhitungan Indeks geoakumulasi.....	83
Lampiran 6. Tabel hasil perhitungan Enrichment Factor.....	84
Lampiran 7. Konsentrasi logam Berat dalam setiap fraksi sedimen di T. Jakarta...	85



BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang Permasalahan

Ekosistem perairan pesisir di Indonesia merupakan kawasan yang akhir-akhir ini mendapat perhatian cukup besar dalam berbagai kebijaksanaan dan perencanaan pembangunan di Indonesia. Wilayah ini kaya dan memiliki beragam sumber daya alam yang telah dimanfaatkan sebagai sumber bahan makanan utama, khususnya protein hewani. Dahuri (2002), menyatakan bahwa secara empiris wilayah pesisir merupakan tempat aktivitas ekonomi yang mencakup perikanan laut dan pesisir, transportasi dan pelabuhan, pertambangan, kawasan industri, agribisnis dan agroindustri, rekreasi dan pariwisata serta kawasan pemukiman dan tempat pembuangan limbah.

Selain memiliki potensi yang besar, beragamnya aktifitas manusia di wilayah pesisir menyebabkan daerah ini merupakan wilayah yang paling mudah terkena dampak kegiatan manusia. Akibat lebih jauh adalah terjadinya penurunan kualitas perairan pesisir, karena adanya masukan limbah yang terus bertambah.

Teluk Jakarta merupakan daerah pesisir semi tertutup, di Bagian Utara Provinsi Daerah Khusus Ibukota (DKI) Jakarta, Indonesia. DKI Jakarta merupakan kota yang padat dengan berbagai macam aktivitas dengan jumlah penduduk yang sangat padat. Logam berat dapat masuk kedalam

sistem ini dari sumber yang berhubungan dengan urbanisasi (seperti buangan dari jalan raya, perumahan dan area komersial dan lokasi lokasi konstruksi), aktivitas pelayaran (pelabuhan dan pelayaran), buangan limbah dan pabrik. Kualitas lingkungan Teluk Jakarta merupakan hal utama untuk keberlangsungan pembangunan yang sangat cepat di daerah pesisir Jakarta.

Logam merupakan kontaminan yang sangat umum ditemukan di dasar (sedimen) perairan. Konsentrasi beberapa jenis logam bahkan mengalami peningkatan diatas ambang batas alami akibat kegiatan manusia. Namun demikian, total konsentrasi kontaminan logam yang menyebabkan resiko ekologis tidak diindikasikan dengan konsentrasi logam dalam sedimen yang melebihi ambang batas konsentrasi alami, karena total konsentrasi logam dalam sedimen belum merefleksikan konsentrasi ketersediaan secara biologis bagi biota.

Penelitian mengenai distribusi kandungan logam berat berat dalam sedimen telah banyak dilakukan, namun penelitian mengenai indikasi pengayaan kontaminan untuk melihat kualitas sedimen dan fraksi geokimia logam berat dalam sedimen belum banyak dilakukan di Indonesia, sehingga mendorong untuk melakukan penelitian ini.

1.2. Pendekatan Masalah

Kualitas lingkungan ekosistem perairan pesisir merupakan permasalahan yang berkembang dari perhatian internasional. Daerah pesisir merupakan bagian yang mendukung populasi terbesar dari masyarakat

dengan adanya berbagai macam aktivitas di sekitar Teluk Jakarta dimana kondisi ini terlihat di Provinsi DKI Jakarta.

Pembangunan industri dan kegiatan di pusat kota di sekitar pesisir sering menyebabkan perubahan yang substansial pada kualitas air sebagai akibat dari masuknya logam berat yang berpotensi toksik dari limbah hasil kegiatan manusia (antropogenik) (Forstner & Wittman, 1979 dalam Burton *et al.*, 2004). Pada sistem estuari, logam berat cepat berubah dalam kolom air sebagai akibat dari penyerapan oleh partikel tersuspensi, yang diikuti proses sedimentasi (Comber *et al.*, 1996).

Selain akibat antropogenik, logam berat di sedimen juga terjadi akibat dari proses pelapukan secara alami (Aloupi & Angelis, 2001). Antropogenik mempengaruhi kualitas sedimen, umumnya sering menumpuk pada bentuk yang heterogen pada distribusi dan kelimpahan sedimentasi logam berat yang berhubungan dengan variabel fisika dan kimia alami (Danielsson, 2000).

Kontaminan memiliki pengaruh yang kuat berhubungan dengan partikel zat yang tersuspensi dalam kolom air di sistem akuatik. Berdasarkan kondisi hidrologi, partikel ini dapat terakumulasi di dasar perairan pesisir, sehingga terjadi endapan kontaminan. Dalam sistem tersebut sedimen yang mengandung kontaminan pada konsentrasi tinggi sering keluar ke kolom air yang ada di atasnya (Bryan & Langston, 1992). Dengan konsentrasi yang tinggi, potensi mobilitas dan avabilitas dari kontaminan sedimen diasumsikan

penting untuk dipertimbangkan bagi kualitas lingkungan ekosistem air (De Pinto *et al.*, 1994; Forstner & Wittmann, 1979 *dalam* Burton *et al.*, 2005).

Kontaminasi sedimen oleh logam berat merupakan hal yang penting dikarenakan penggunaannya yang luas dan sifatnya yang sukar untuk terdegradasi (Calmano *et al.*, 1988). Logam berat yang mendapat perhatian besar bagi lingkungan juga penting bagi industri dan toksikologi, seperti Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Sn dan Zn (Salbu & Steinnes, 1995 *dalam* Burton *et al.*, 2005).

Sedimen tidak hanya sebagai tempat untuk kontaminan tetapi juga sebagai sumber kontaminan untuk air di atasnya dan organisme akuatik (Blasco *et al.*, 2000; Chapman *et al.*, 1998 *dalam* Burton *et al.* 2005). Sedimen yang terkontaminasi dapat menyebabkan efek kronik pada kesehatan organisme dan merupakan sumber kontaminan bagi rantai makanan di perairan (Ingersol *et al.*, 1994). Bioakumulasi kontaminan organisme air merupakan hal yang penting bagi kesehatan manusia dan makhluk hidup karena manusia dan makhluk hidup mengkonsumsi ikan dan kerang (Henny *et al.*, 1994).

Distribusi logam berat di daerah perkotaan juga dikarakteristikan sebagai tempat beresiko akumulasi yang terjadi di sekitar sumber utama polutan di lingkungan deposisional, dimana partikel halus sedimen dan bahan organik terakumulasi (Rubio *et al.*, 2000). Identifikasi tempat beresiko sering dilakukan sebagai langkah awal untuk mengkaji resiko lingkungan yang berhubungan dengan kualitas sedimen.

Untuk melihat kualitas sedimen di ekosistem bentik berdasarkan kandungan logam berat maka dilakukan penelitian pemantauan untuk mengetahui distribusi, tingkat kontaminasi serta fraksi geokimia logam berat untuk mengetahui konsentrasi ketersediaan logam secara biologis dalam sedimen.

1.3. Perumusan Masalah

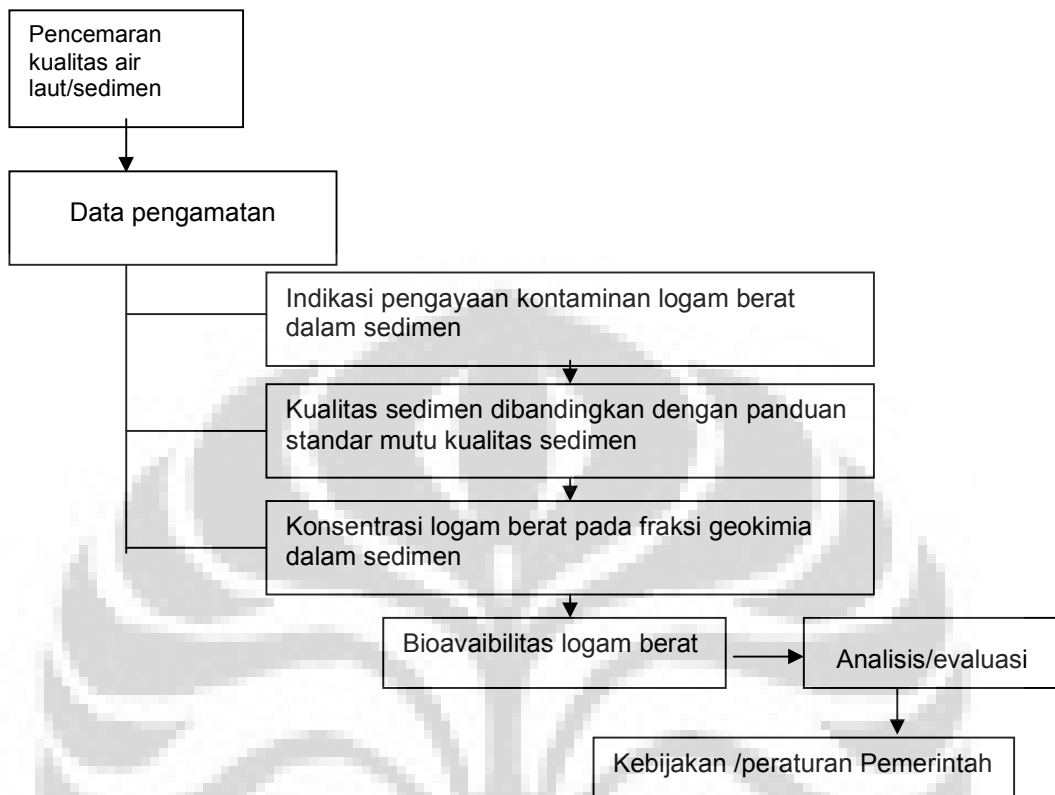
Dari pendekatan masalah yang telah dijabarkan diatas, maka perumusan masalah penelitiannya adalah sebagai berikut :

1. Bagaimana distribusi logam berat dalam sedimen di Teluk Jakarta ?
2. Berapa konsentrasi dan tingkat kontaminasi total logam berat dalam sedimen di Teluk Jakarta ?
3. Berapa konsentrasi logam berat dalam fraksi geokimia dalam sedimen di Teluk Jakarta ?

Perumusan masalah secara singkat disajikan pada Gambar 1.

1.4. Tujuan dan Manfaat Penelitian

1. Untuk mengetahui distribusi logam berat dalam sedimen di Teluk Jakarta
2. Untuk mengetahui konsentrasi dan tingkat kontaminasi logam berat dalam sedimen di Teluk Jakarta
3. Untuk mengetahui fraksi geokimia dalam sedimen Teluk Jakarta



Gambar 1. Perumusan masalah

Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan informasi mengenai distribusi dan tingkat kontaminasi serta fraksi geokimia logam berat dalam sedimen di Teluk Jakarta, sehingga bermanfaat bagi ilmu pengetahuan dan bagi pemerintah daerah setempat dalam hal pengelolaan dan pengembangan sumberdaya pesisir lebih lanjut.

1.5. Signifikansi Penelitian

Sesuai dengan tujuan yang hendak dicapai, maka diharapkan penelitian ini dapat memberikan manfaat yang signifikan kepada pihak-pihak berikut ini :

- 1) Bagi pihak akademisi, penelitian ini diharapkan dapat menjadi bahan masukan dan perbandingan bagi peneliti lain yang akan melakukan penelitian sejenis, ataupun yang lebih luas terutama penelitian yang berkaitan dengan kontaminasi logam berat.
- 2) Bagi pihak praktisi yaitu
 - a. Dapat memberi informasi sejauh mana tingkat kontaminasi logam berat di sedimen Teluk Jakarta
 - b. Strategi dan usulan model pemantauan logam berat di sedimen Teluk Jakarta
 - c. Sebagai bahan perbandingan kriteria kualitas sedimen di Teluk Jakarta
- 3) Bagi penulis, penelitian dan tulisan ini dapat memperkaya wawasan baru serta meningkatkan pengetahuan peneliti mengenai pencemaran logam berat:

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Sedimen

Sedimen merupakan suatu bahan baik berupa fragmen material padatan anorganik atau bahan organik yang terbawa atau terendapkan secara alamiah (angin, air ataupun proses pembekuan/pelapukan) di dalam dasar perairan/laut (Budiawan 2007).

Sifat dan fungsi sedimen antara lain berdasarkan, fisik (ukuran partikel, kapasitas absorpsi), kimiawi (Komposisi/sifat kimia anorganik dan organik) dan biota (berfungsi sebagai habitat mikro/makro bentos)

Tanah dan sedimen berperan utama dalam pengangkutan dan penghilangan pencemar lingkungan dengan: menyediakan permukaan penyerapan, bertindak sebagai sistim penyangga dan sebagai pencuci pencemar. Dimana proses yang paling utama yang berhubungan dengan tanah /sedimen adalah proses penyerapan dan pencucian, sedangkan faktor faktor yang mempengaruhi proses penyerapannya adalah: ciri-ciri struktur zat kimia, kandungan organik tanah, pH media, ukuran partikel, kapasitas pertukaran elektron (ion) dan suhu.

Berdasarkan sumbernya sedimen dapat berasal secara alamiah yaitu sumber partikel padatan dari daerah pegunungan, aliran sungai, erosi daerah pertanian dan perkebunan, dan transformasi/ biotransformasi alamiah (seperti : pelapukan, dll) dan akibat dari aktivitas manusia (antropogenik)

yaitu sumber sedimen sebagai akibat aktivitas manusia seperti pertambangan, penebangan hutan dan perpindahan penduduk/domestik (urbanisasi).

Sedangkan berdasarkan proses pembentukannya dapat secara : secara mekanik (erosi, angin, gletser dan lain sebagainya), secara kimiawi (reaksi kimia) dan secara proses mikrobiologi/organik (pembusukan tanaman /hewan dan lain-lain) (Budiawan, 2007).

2.2. Sifat fisik kimia sedimen laut

Sedimen yang penyebarannya mulai dari garis pantai sampai laut dalam dibagi menjadi dua kelompok, masing masing adalah sedimen laut dangkal dan sedimen laut dalam dengan karakteristik fisik, kimia dan biologi yang berbeda. Dinamika interaksi dengan lingkungan yang terjadi pada pembentukan sedimen laut dangkal lebih dinamis dibandingkan dengan sedimen laut dalam.

Sedimen laut dangkal khususnya di perairan pesisir dan estuari di ketahui merupakan "storage system" berbagai unsur dan senyawa kimia. Proses fisik kimia dan biologi yang terjadi di kolom air akan mempengaruhi komposisi dan kualitas sedimen.

2.2.1. Komponen Fisik Kimia

Ukuran partikel sedimen laut dangkal sangat beragam, mulai dari batuan kerikil(>1 mm), pasir ($1/16$ -1 mm), lumpur ($1/256$ - $1/32$ mm) dan lempung

atau liat ($>1/4069-1/640$ mm). Sedimen non pelagis termasuk laut dangkal pada umumnya terdiri atas campuran komponen *lithogenous* (mengandung mineral hasil pelapukan di darat), *hydrogenous* (sedimen yang terbentuk karena adanya proses pengendapan atau mineralisasi elemen-elemen kimia terlarut dalam laut) dan *biogenous* (terdiri atas cangkang (shell) atau hancuran kulit organisme laut) dan mengandung C-organik yang tinggi, terutama karena pengaruh interaksi dengan daratan (Chester, 1990).

Menurut energi lingkungan pembentuknya, sedimen yang berukuran halus yaitu lempung dan liat umumnya terdapat di lingkungan perairan yang relatif tenang seperti di perairan teluk dan estuari. Sedimen yang berukuran kasar yaitu kelompok kerikil dan pasir terbentuk di lingkungan perairan yang dinamis. Dalam aspek ekologi perairan dengan lingkungan, lingkungan perairan yang relatif tenang merupakan daerah pengendapan dan memiliki gerak atau pergantian dengan massa air yang lambat, kondisi reduksi dan rentan terhadap pencemaran akibat masukan limbah buangan dari darat. Keadaan ini sebaliknya terjadi pada perairan dengan lingkungan dinamis.

Sedimen selain merupakan habitat organisme hidup, juga sebagai tempat penampungan (*sink*) berbagai elemen dan senyawa kimia. Karakteristik kimia sedimen laut dangkal (khususnya di perairan pesisir dan estuari) dipengaruhi oleh masukan masukan elemen elemen kimia yang di transpor oleh sungai (*river borne detrital*)

Terbentuknya senyawa kimia dalam sedimen disebabkan oleh reaksi oksidasi – reduksi dan akan mempengaruhi habitat serta kehidupan

organisme benthik. Selain oksidasi-reduksi, proses-proses fisik kimia lainnya yang terjadi dalam sedimen seperti :adsorpsi-desorpsi, solidifikasi-disolusi akan mempengaruhi komposisi spesiasi kimia sedimen dan lapisan air di permukaan sedimen (*sediment-water interface*) melalui interaksi air-sedimen.

2.2.2. Materi organik dalam sedimen

Materi organik yang terdapat dalam sedimen laut sangat beragam, meliputi hidrokarbon, asam lemak; steroids; di,tri dan tetra terpenoid, pigmen; asam-asam amino dan peptida; purine dan pirimidine; karbohidrat; aromatik hidrokarbon; polimer alami (chitin, cellulose, lignin, cutin), kerogen dan materi humus (Simoniet, 1978 dalam Chester, 1990). Sumber materi organik berasal dari aktivitas manusia yang terbawa masuk ke lingkungan laut terutama melalui sistem sungai dan udara. Selain itu sedimen dan air jebakannya juga mengandung materi organik terlarut (DOM).

Menurut Parsons & Takahashi 1977 (*dalam* Sanusi 2006), sedimen laut dangkal mengandung komponen organik >30% dari berat total sedimen, dimana 50%nya merupakan karbon organik. Dikatakan lebih lanjut bahwa dari jumlah komponen organik yang terdapat dalam sedimen, sebesar 30-50% merupakan substansi humus.

2.2.3. Sedimen sebagai indikator Pencemar

Kualitas fisik kimia sedimen laut dapat menjadi indikator apakah kualitas perairan di sekitarnya telah tercemar atau belum, baik oleh unsur

organik maupun inorganik. Tekstur atau ukuran partikel sedimen terbentuk terutama disebabkan oleh adanya kekuatan arus. Dengan kata lain, faktor arus (hidrodinamika) merupakan energi sortasi sedimen. Perairan yang memiliki kondisi arus yang dinamis sedimennya memiliki tekstur kasar (kerikil, pasir). Sementara perairan dimana kondisi arusnya tenang atau tidak dinamis, sedimennya memiliki tekstur yang lebih halus (lumpur, liat). Perairan dimana terjadi deposisi material tersuspensi (organik dan inorganik) umumnya memiliki tekstur sedimen yang halus.

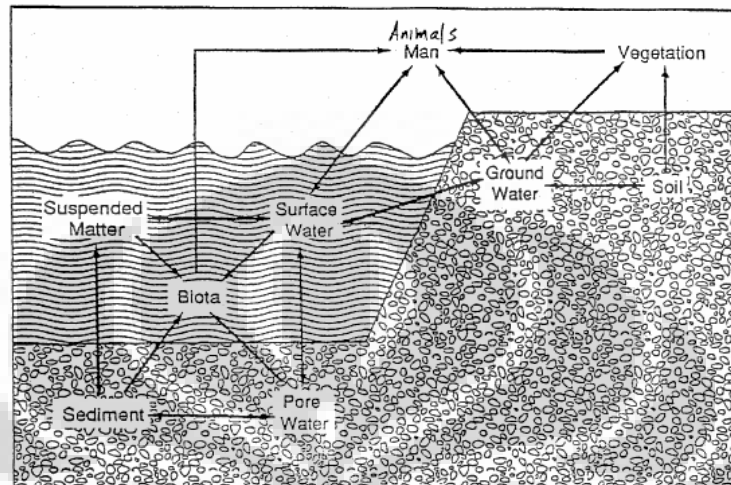
Karena sifat fisik kimia material padatan tersuspensi yang memiliki kemampuan mengadsorpsi logam berat terlarut dalam kolom air, maka deposisi padatan tersuspensi dalam suatu perairan akan menyebabkan akumulasi logam berat tersebut selain material organik dan inorganik dalam sedimen. Makin tinggi kandungan polutan organik dan inorganik dalam kolom air, makin tinggi pula akumulasi polutan tersebut dalam sedimen dan dapat mempengaruhi organisme yang ada di dalam ekosistem tersebut (Gambar 2)

Oleh karena itu kualitas fisik kimia sedimen suatu perairan dapat dijadikan indikator baik buruknya kualitas suatu perairan.

2.3. Pencemaran Logam Berat

Menurut Hutagalung 1991, definisi GESAMP (*Group of Expert on Scientific Aspect on Marine Pollution*) mengenai pencemaran laut diartikan sebagai: masuknya zat-zat (substansi) atau energi kedalam lingkungan laut dan estuari baik langsung maupun tidak langsung akibat adanya kegiatan manusia yang menimbulkan kerusakan pada lingkungan laut (usaha

penangkapan, budidaya, alur pelayaran) serta secara visual mereduksi keindahan (estetika).



Gambar 2. Hubungan antara manusia, logam dan lingkungan

Karakteristik fisik dan kimia yang dimiliki oleh suatu jenis polutan atau limbah menentukan sifat fisik dan persistensinya (mudah atau sulit terurai) dalam perairan laut. Lingkungan atau ekosistem laut yang mengalami gangguan kesetimbangan akibat polutan, dapat bersifat tetap (*irreversible*) atau sementara (*reversible*) bergantung pada faktor-faktor terkait yang meliputi: kemantapan, persistensi, kelembaman, elastisitas, dan amplitudo ekosistem. Kelima faktor tersebut merupakan kriteria yang digunakan untuk menilai apakah gangguan eksternal berakibat terhadap menurunnya fungsi dan peran ekosistem tersebut.

Sedimen yang terkontaminasi adalah sedimen perairan yang mengandung bahan kimia yang telah melebihi aspek kesesuaian geokimia,

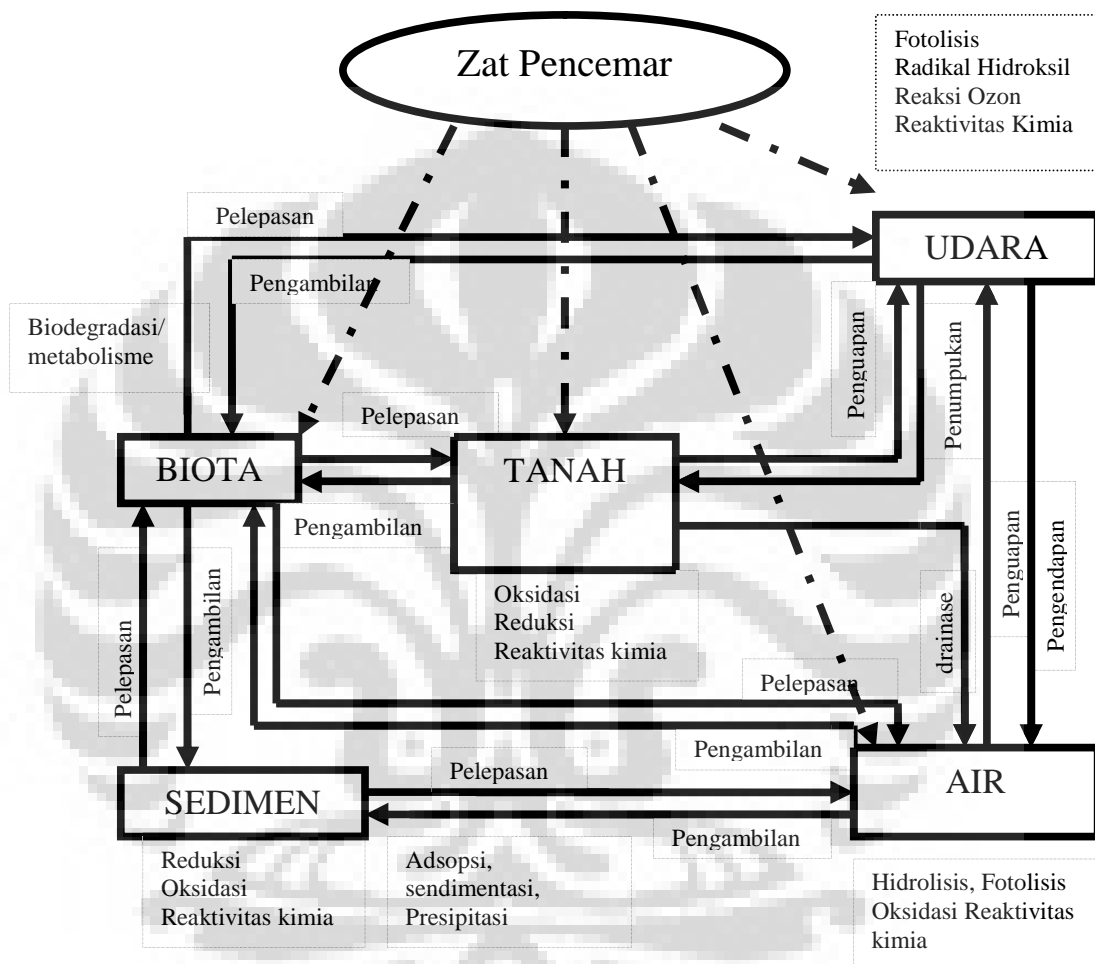
toksikologi, kriteria kualitas sedimen dan kesesuaian pengukuran, atau dipertimbangkan sebaliknya memiliki ancaman bahaya bagi kesehatan dan lingkungan (Budiawan 2007).

Perilaku zat pencemar dalam sistem perairan (sedimen) ditentukan oleh derajat kelarutan suatu senyawa dalam air dimana besarnya senyawa yang terlarut sangat dipengaruhi oleh regim aliran yang berkontak dengan sedimen tersebut dimana kelarutan dalam air merupakan salah satu penentu transportasi zat dalam lingkungan perairan serta kemampuan pencemar mengalami perubahan bentuk (transformasi). Skema interaksi dan perilaku zat pencemar di lingkungan sedimen (Budiawan 2007). dapat dilihat pada Gambar 3.

Bahan pencemar mengalami dua mekanisme dalam proses pelepasan (*leaching*) meliputi difusi zat pencemar dan proses pengangkutan massa dimana melibatkan media pembawa dan pergerakannya yang disebabkan oleh adanya gaya luar seperti arus/gaya tarik bumi. Proses *leaching* dapat mengurangi kepekatan pencemar dalam sedimen dan tanah, namun dapat meningkatkan pencemaran di badan air.

Dalam proses *leaching*, pencemar sedimen dapat bersifat polar (mudah bercampur dengan air) sehingga lebih mudah bergerak dalam tanah /sedimen, non polar (tidak mudah bercampur dengan air seperti minyak/zat hidrokarbon) sehingga sifat mobilitasnya rendah atau teradsorpsi kuat pada sedimen dan tanah dan pencemar dari logam (terionisasi/kompleks) sehingga sifat mobilitas relatif mudah di badan air, dan dapat terendapkan pada

permukaan sedimen/tanah serta dapat pula terbebaskan (*leaching*) kembali ke lingkungan.



Gambar 3. Interaksi dan Perilaku Zat pencemar di Lingkungan Sedimen (Budiawan 2007)

2.3.1. Logam berat

Elemen kimia yang memiliki berat massa atom sebesar 5 g/cm^3 atau lebih di kelompokkan ke dalam logam berat. Kelompok inorganik metal di perairan alami sangat rendah. Kelompok ini termasuk logam berat yang

bersifat esensial (Cr, Ni, Cu Zn) dan yang bersifat non esensial (As, Cd, Pb, Hg). Elemen yang bersifat esensial dibutuhkan dalam proses kehidupan biotik akuatik. Kelompok elemen esensial maupun non esensial dapat bersifat toksik atau racun bagi kehidupan biota akuatik, terutama apabila terjadi peningkatan kadarnya dalam perairan.

Logam berat umumnya termasuk kelompok inorganik non esensial, memiliki karakteristik fisik, kimia dan biologi tertentu. Dari kelompok logam berat, yang berpotensi memiliki daya racun tinggi terhadap kehidupan biota laut dan kerusakan lingkungan perairan adalah: Hg, Cd, Pb, Cu, Cr, Ni, Zn dan As seperti yang direkomendasikan USEPA untuk diteliti lebih lanjut (Sanusi 2006). Secara umum logam berat toksik memiliki sifat sifat sebagai berikut :

- persisten, sulit didegradasi
- Akumulasi dan magnifikasi dalam jaringan tubuh biota laut
- Memiliki EC_{10} dan LC_{50-96} jam yang rendah
- Memiliki waktu paruh yang tinggi dalam tubuh biota laut
- Memiliki nilai faktor konsentrasi yang besar dalam tubuh biota laut.

Faktor konsentrasi atau disebut pula koefisien bioakumulasi adalah merupakan rasio antara kadar polutan dalam tubuh biota akuatik dan kadar polutan yang bersangkutan dalam kolom air.

Beberapa faktor lingkungan seperti temperatur, salinitas, pH, Jenis dan stadia biota akuatik serta jenis atau spesiasi dan kadar logam berat itu sendiri dan interaksinya akan menentukan sifat toksisitas logam berat.

Selain faktor lingkungan, toksisitas logam berat dalam perairan laut ditentukan pula oleh sifat interaksinya, yaitu aditif, sinergistik dan antagonistik. Toksisitas meningkat apabila interaksinya bersifat sinergistik dan aditif. Sebaliknya toksisitas mengalami reduksi apabila interaksinya bersifat antagonistik.

Masukan kedalam lingkungan laut secara alami dapat digolongkan menurut Bryan 1976a (*dalam* Sanusi 2006) sebagai : pasokan dari daerah pantai, yang meliputi masukan dari sungai sungai dan erosi yang disebabkan oleh gerakan gelombang dan gletser, pasokan dari laut yang meliputi logam logam yang di lepaskan gunung berapi di laut dalam dan partikel atau endapan oleh adanya proses kimiawi dan pasokan yang melampaui lingkungan dekat pantai dan meliputi logam yang diangkut ke dalam atmosfer sebagai partikel partikel debu atau sebagai aerosol dan juga bahan yang dihasilkan oleh erosi gletser di daerah kutub dan diangkut oleh es-es yang mengambang.

Kegiatan manusia juga merupakan suatu sumber utama pemasukan logam ke dalam lingkungan perairan. Menurut Wittman, 1979 (*dalam* Connel *et al.*, 1995) berasal dari kegiatan pertambangan, cairan limbah rumah tangga dan aliran air perkotaan, limbah dan buangan industri, aliran pertanian.

2.3.2. Perilaku dan nasib logam di lingkungan

Air alamiah dan bahan –bahan partikulat yang berhubungan merupakan sistem elektrolit heterogen yang rumit dan mengandung sejumlah besar spesies organik dan organik tersebar di antara fase cair dan fase padat. Logam yang memasuki perairan alami menjadi bagian dari sistim ini dan proses penyebarannya diatur oleh susunan interaksi dan keseimbangan fisika kimia yang dinamis (Stumm & Morgan, 1970 *dalam* Connel *et al.*, 1995).

Kelarutan logam pada air alami pada prinsipnya diatur oleh pH, jenis dan kepekatan ligan dan zat-zat pengkelat, keadaan oksidasi komponen mineral dan lingkungan redoks sistem tersebut

Spesiasi logam pada air tawar dan air laut terutama berbeda dalam hal perbedaan kekuatan ionik, kandungan permukaan penyerapan yang lebih rendah pada air laut, perbedaan kepekatan logam runutan, perbedaan kepekatan kation dan anion utama dan kepekatan ligan organik dalam sistem air tawar lebih tinggi (Sibley & Morgan, 1977, Forstner, 1979 *dalam* Connel *et al.*, 1995).

Perilaku logam di dalam perairan alamiah sangat dipengaruhi oleh interaksi antar fase-fase cair dan padat, khususnya air dan sedimen. Ion–ion dan senyawa logam yang terurai secara cepat hilang dari larutan pada saat berhubungan dengan permukaan yang berbeda.

Faktor - faktor lingkungan yang mempengaruhi penambahan logam dalam sedimen perairan dan fungsinya sebagai penyerap logam (Forstner

1979b *dalam* Connel *et al.*, 1995) (Tabel 1) antara lain mineral detrital, penyerapan, kopresipitasi dengan Fe hidrat/oksida mangan dan karbonat, pembentukan kompleks dan flokulasi dengan bahan organik serta endapan logam.

Dalam keadaan yang sesuai, beberapa logam yang berikatan dengan sedimen dan partikel yang mengendap, kembali ke dalam air yang diikuti remobilisasi dan difusi ke atas (Bryan, 1976a *dalam* Connel *et al.*, 1995). Proses ini dapat bertindak sebagai sumber nyata dari perancuan logam proses utama yang mengatur pelepasan logam (Forstner 1979b *dalam* Connel *et al.*, 1995) yaitu, kepekatan garam yang tinggi, perubahan keadaan redoks, perubahan pH, kehadiran zat-zat pembentuk kompleks dan transformasi biokimiawi

Tabel 1. Faktor yang mempengaruhi akumulasi logam berat dalam sedimen (Connel *et al.*, 1995)

	Mineral detrital, organik	Organik, reaktif (bitumen, asam humat)	Hidroksida, Karbonat, Sulfida, logam runutan	Besi Hidrat dan Oksidasi mangan	Kalsium karbonat
Penggabungan dalam posisi lembam	XX	(X)			
Penyerapan = penyerapan secara fisik	X	X	(X)	(X)	(X)
Pertukaran kation=penyerapan secara kimiawi	X	X	(X)	X	(X)
Presipitasi			XX		
kopresipitasi				XXX	X
Pembentukan senyawa+ flokulasi		XXX			

2.3.2. Kadmium (Cd)

Kadmium bervalensi dua (Cd^{2+}) adalah bentuk terlarut yang stabil dalam lingkungan perairan laut pada pH dibawah 8. Kadar Cd di perairan alami berkisar antara 0,29-0,55 ppb dengan rata-rata 0,42 ppb. Kadmium tergolong logam berat dan memiliki afinitas yang tinggi terhadap grup sulfhidril daripada enzim dan meningkat kelarutannya dalam lemak. Afinitas Cd terhadap anion klorida dibandingkan dengan logam berat lainnya sesuai urutan adalah $Hg > Cd > Pb > Zn$, dimana Cd menempati urutan kedua setelah Hg (Sanusi, 2006). Bahan organik terlarut dalam perairan (gugus asam amino, sistein, polisakarida dan asam karbonsiklik) memiliki kapasitas membentuk ikatan kompleks dengan Cd dan logam berat lainnya. Demikian pula keberadaan asam humus dalam perairan seperti asam fulvik, asam humic akan membentuk ikatan kompleks dengan Cd.

Diperairan tawar kemampuan pembentukan kompleks Cd oleh asam humus sekitar 2,7% daripada total Cd terlarut, sementara di perairan estuari lebih rendah dari 1% daripada total Cd terlarut. Dengan kata lain, selain ditentukan oleh kadar asam humus dan Cd terlarut, parameter pH dan salinitas berperan dalam membentuk ikatan kompleks logam berat - asam humus.

Logam berat Cd terlarut dalam air akan mengalami proses adsorpsi oleh partikel tersuspensi dan mengendap di sedimen. Proses adsorpsi akan diikuti oleh proses desorpsi yang mengembalikan Cd dalam bentuk terlarut dalam badan air.

2.3.3. Kromium (Cr)

Dalam kondisi teroksidasi, unsur Cr hadir sebagai kromium hexavalen (Cr^{6+}), bersifat stabil dan toksik dengan spesies oksidanya CrO_3 , CrO_4^{2-} dan $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$.

Dalam perairan yang tercemar oleh bahan organik, proses reduksi atau degradasi menghasilkan S^{2-} yang dapat mereduksi Cr^{6+} sebesar 34-87%. Kromium yang masuk ke dalam perairan estuari melalui transpor sistem sungai, sebesar 36-51% dalam bentuk fase solid atau padatan tersuspensi dan lainnya dalam bentuk terlarut (Sanusi, 2006).

2.3.4. Timah Hitam (Pb)

Keberadaan ligan baik organik maupun inorganik dalam badan air akan membentuk ikatan kompleks dengan Pb. Dengan ligan anorganik fosfat (PO_4^{3-}) dan sulfida (S^{2-}), Pb akan membentuk senyawa $\text{Pb}_3(\text{PO}_4)_2$ dan PbS yang bersifat tidak larut. Di perairan dengan $\text{pH} > 6$ senyawa tersebut akan mengalami proses hidrolisis membentuk $\text{Pb}(\text{OH})^+$ terlarut. Senyawa solid $\text{Pb}(\text{OH})_2$ hanya terbentuk pada $\text{pH} \geq 10$. Karena itu, pada suasana pH laut ($\text{pH} 7.5-8.5$) senyawa $\text{Pb}(\text{OH})^+$ terlarut adalah dominan dibandingkan dengan PbCl_2 dan PbCO_3 .

Ikatan kompleks yang bersifat stabil dengan ligan organik, terutama terjadi terhadap ligan organik yang mengandung gugus S, N, dan O. Selain itu padatan tersuspensi dalam kolom air akan mengadsorpsi Pb terlarut dalam

air membentuk ikatan partikulat Pb. Dalam lingkungan air tawar atau sungai, besarnya adsorpsi mencapai 15-83% dari total pb terlarut (Sanusi, 2006).

2.3.5 Nikel (Ni)

Logam inorganik (anin halida, sulfat, fosfat, karbonat, karbonil) dalam badan air akan membentuk ikatan kompleks stabil dengan Ni^{2+} . Demikian pula ligan organik yang memiliki gugus oksigen, nitrogen dan terutama sulfur akan membentuk kompleks yang stabil dengan Ni^{2+} . Sementara kompleks asam humus- Ni^{2+} bersifat moderat bergantung pada pH dan rasio kadar humus fulvic: Ni^{2+} bersifat tidak larut dan cenderung mengendap. Apabila kadar rasio humus fulvik- $Ni^{2+}>2$, maka kompleks yang terbentuk bersifat larut.

Transpor Ni^{2+} dalam kolom air terutama terjadi melalui adsorpsi logam berat tersebut oleh partikel-partikel padatan tersuspensi. Banyak sedikitnya Ni yang teradsorpsi bergantung pada kadar padatan tersuspensi, ukuran partikelnya dan kadar Ni itu sendiri. Partikel tersuspensi yang berukuran kecil (0,2-30 μm) mampu mengadsorpsi dan mentranspor Ni sebesar $\pm 80\%$ dari total Ni terlarut ($<0,2 \mu m$), sehingga hanya sebagian kecil saja yang diserap dan masuk dalam jaringan tubuh biota air ($\pm 8\%$) (Sanusi, 2006). Dalam perairan dimana kandungan tersuspensi, kadar Ni dalam bentuk terlarut relatif tinggi. Cara transpor Ni juga terjadi melalui ikatan dengan Fe-Mn oksida dan hidroksida (koloid), terutama dalam lingkungan perairan tawar dan estuari. Di perairan laut makro elemen Ca diketahui berperan dalam mentranspor Ni ($\pm 15\%$) dalam bentuk ikatan koloid.

2.3.6. Tembaga (Cu)

Di perairan alami tembaga (Cu) terdapat dalam bentuk partikulat, koloid dan terlarut. Fase terlarut merupakan Cu^{2+} bebas dan ikatan kompleks, baik dengan ligan inorganik (CuOH^+ , $\text{Cu}_2(\text{OH})_2^{2+}$) maupun organik. Selain dengan ligan OH^- , Cu membentuk ikatan kompleks dengan ligan inorganik lainnya yaitu karbonat (CO_3^{2-}), nitrat (NO_3^-), fosfat (HPO_4^{2-}), sulfat (SO_4^{2-}), sulfida (SH^-), klorida (Cl^-) dan ammonia (NH_3) yang bersifat basa dengan stabilitas berbeda-beda. Ikatan Cu- kompleks dengan ammonia dan sulfida tergolong stabil.

Ikatan Cu-kompleks dengan ligan organik, terutama adalah oleh material humus., Mantoura *et al.*, 1978 (Sanusi 2006) mengatakan bahwa sebesar 90% dari total Cu dalam air tawar merupakan Cu kompleks dengan ligan humus, sementara yang terjadi dalam air laut hanyasebesar 10%. Karena dalam lingkungan laut elemen Ca^{2+} dan Mg^{2+} mensubstitusi Cu dan membentuk kompleks dengan ligan organik humus.

Dalam sistem akuatik, stabilitas kompleks asam humus-Cu yang berada dalam air tawar, air laut dan sedimen adalah berbeda. Berdasarkan stabilitasnya, kompleks asam – humus Cu yang terjadi di lingkungan yang berbeda secara berurutan dikemukakan sebagai berikut : air laut<danau/sungai<sedimen laut. Ikatan kompleks Cu yang terjadi dalam sedimen laut adalah yang paling stabil, sementara yang terbentuk dalam kolom air laut stabilitasnya paling rendah. Hasil studi menunjukkan sekitar 34% Cu dalam perairan sungai teradsorbsi oleh padatan tersuspensi dan

fraksi sisanya terikat oleh ligan organik bentuk koloid maupun terlarut. Didalam perairan estuari 40-60% terikat oleh koloid, baik organik maupun inorganik (Sanusi, 2006).

Menurut Bewer dan Yeast, 1978 (Sanusi 2006) melaporkan bahwa 24% Cu yang terbawa oleh aliran sungai akan teradsorpsi oleh padatan tersuspensi dan mengendap di perairan estuari. Efektivitas adsorpsi oleh sedimen bergantung pada ukuran partikel, pH, salinitas dan kehadiran ligan organik maupun unsur Fe dan Mn-oksida. Proses adsorpsi akan diikuti oleh desorpsi, dimana Cu akan kembali larut dalam badan air.

2.3.7. Seng (Zn)

Pada pH perairan 6-7 unsur Zn terdapat dalam bentuk Zn^{2+} dan akan teradsorpsi oleh padatan tersuspensi dalam badan air atau membentuk kompleks dengan ligan anorganik maupun organik. Makin basa suatu perairan (pH 7-7.5), Zn mulai mengalami proses hidrolisis dan membentuk $Zn(OH)_2$ pada pH > 8 yang bersifat stabil dan tidak larut.

Dalam lingkungan perairan laut dengan salinitas 35% (dimana kadar anion Cl^- sebesar 19500 mg/l), Zn terlarut tidak membentuk kompleks $ZnCl_2$, hingga kadar anion Cl^- mencapai ≥ 0.4 mol. Demikian pula dalam kolom air Zn akan teradsorpsi oleh padatan tersuspensi. Secara umum efektivitas pembentukan ikatan kompleks dan adsorpsi Zn oleh padatan tersuspensi sangat bergantung pada karakteristik fisik kimia suatu perairan. Menurut laporan Hart dan Davies, 1981 *dalam* Sanusi 2006, diperairan sungai Zn

yang teradsorpsi oleh padatan tersuspensi mencapai 75% dari total Zn, dan setelah mencapai estuari besarnya adsorpsi hanya mencapai 36%.

Perairan alami air tawar yang belum tercemar mengandung 0.5-15 mg/l, sementara dalam air laut antara 0.4-5 mg Zn/l, sedangkan yang terkandung dalam sedimennya baik dilingkungan tawar maupun estuari adalah sekitar 50 mg Zn/kg (Sanusi 2006).

2.4. Geokimia logam berat dalam sedimen

Bentuk atau kondisi biologi sedimen merupakan habitat penting bagi berbagai variasi organisme air tawar, estuari, dan air laut, yang menyediakan sumber makanan bagi manusia. Sedimen juga merupakan tempat pengendapan sementara logam di lingkungan perairan. Bahan organik dan bahan anorganik mengendap dari kolom air ke dalam sedimen, membawa logam-logam, flokulasi dan kemudian presipitasi juga mengambil logam yang terlarut dan yang berbentuk koloid. Didalam sedimen logam dibagi menjadi beberapa tempat pengendapan, pembagian ini akan bergantung pada variabel fisika kimia secara alami dan konsentrasi ligan pada *water ambien*, keadaan alami dan konsentrasi substrat padat, pH dan potensial redox. Partisi ini mempengaruhi keberadaan logam pada organisme.

Melalui kejadian alami maupun antropogenik, logam-logam terakumulasi ke tingkat yang lebih tinggi di sedimen dan berhubungan dengan biota juga menaikkan perubahan logam yang terus menerus ke dalam rantai makanan. Bagaimanapun hal ini menjadi kenaikan yang tampak bahwa

biokumulasi dan perpindahan rantai makanan merupakan proses yang kompleks, yang dipengaruhi oleh keadaan alami geokimia di lingkungan dan fisiologi dan biokimiawi alami organisme.

Logam-logam dan metaloid seperti As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Se, Ag, dan Zn merupakan logam yang diyakini sebagai "*very toxic and relatively accessible*" dalam konteks di lingkungan, yang secara signifikan dalam daur geokimia secara global dipengaruhi oleh aktivitas antropogenik (Galloway *et al.*, 1982 dalam Campbell *et al.*, 1988). Mn dan Fe juga penting karena interaksinya dengan unsur lain, melalui berbagai proses seperti adsorpsi dan kopresipitasi.

Organisme perairan, baik yang berada di kolom air maupun yang di sedimen, membutuhkan logam untuk menjaga metabolisme agar tetap normal. Pada saat keberadaannya dalam keadaan berlebih, logam yang esensial ini (Co, Cu dan Zn) berubah menjadi toksik. Namun tidak demikian dengan logam lain (Cd, Pb, dan Hg) yang tidak dibutuhkan dan dapat merusak meskipun saat keberadaannya biologinya sangat rendah. Pentingnya logam berat tergantung dari kemampuannya berinteraksi dengan molekul organik yang ada pada organisme. Pada tingkat yang berlebih, logam dapat juga mengganti logam yang ada dalam senyawaan organometalik atau berkombinasi dengan senyawa organik. Kasus yang lain perubahan bentuk senyawa mempengaruhi metabolisme organisme, namun bagaimanapun hal ini hanya dapat terjadi setelah mengambil logam, baik secara langsung dari lingkungan maupun melalui makanan. Pada kenyataannya, suatu organisme

logam kemungkinan mengalami tiga keberadaan/nasib yaitu berpartisipasi dalam beberapa proses metabolisme, kembali ke lingkungan, membentuk asosiasi yang menyimpan atau menghentikan, kemudian mereduksi efeknya ke organisme

Hal ini umumnya diterima bahwa bentuk ion dari sebagian besar logam merupakan keberadaan secara biologi (Campbell *et al.*, 1988).

Bentuk partikulat atau spesies logam di sedimen

Sedimen terdiri dari berbagai tingkatan, tergantung pada sumbernya, sejarah transportasinya dan cara deposisi dari hasil pelapukan dan aktivitas biologik, bersama-sama dengan pelarut hasil pelapukan yang berasosiasi dengan fase padat melalui reaksi-reaksi diatas. Hasil pelapukan yang tidak larut relatif stabil, mineral primer yang tidak terdekomposisi dan mineral baru yang terbentuk pada lingkungan pelapukan, pada dasarnya lempung dan oksida besi, dan aluminium. Aktivitas biologi memberikan kontribusi material humus dan organik tak larut, seperti spesies inorganik seperti karbonat, silikat, dan pospat yang dimanfaatkan untuk struktur rangka.

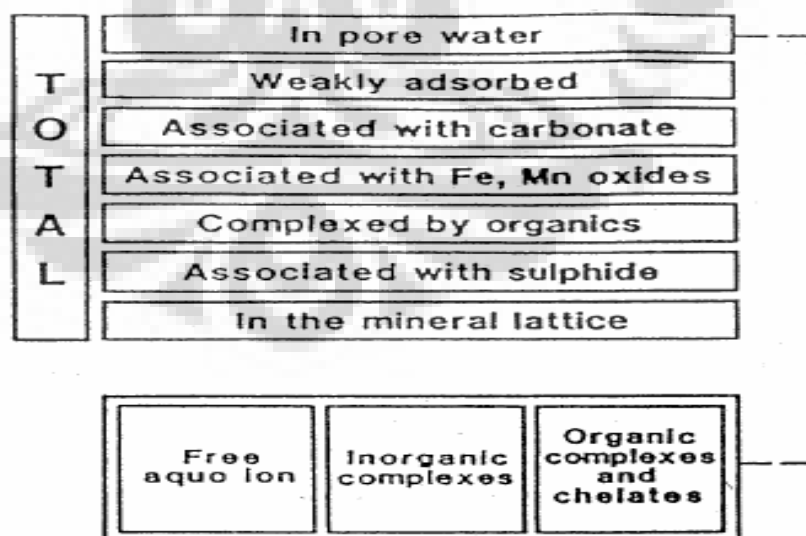
Sedimen memberi kemungkinan untuk berhubungan dengan logam. Pada tipe sedimen terigenous, yang paling penting adalah (Fletcher, 1981 *dalam* Campbell *et al.*, 1988) :

- i) Adsorpsi pada permukaan a) Fe amorphous atau crystallin dan Mn oksida dan b) mineral lempung

- ii) Dengan bahan organik juga sebagai hasil asupan organisme hidup atau *complexation* dan *chelation*.
- iii) Pada *lattice* mineral sekunder atau okluded pada senyawa amorphous contoh oleh lempung atau Fe/Mn oksida dan
- iv) Pada *lattice* mineral primer yang tidak terdekomposisi

Pada Gambar 4 memberikan gambaran mengenai bentuk logam dari fase padat (sedimen).

Sejauh ini, pengaruh antropogenik dapat, mendahului variasi yang luas substansi hasil dari manusia dan hasil dekomposisi, perubahan kelimpahan spesies alami oleh aktivitas seperti pengerukan dan pertambangan atau mempengaruhi perubahan logam-logam antara fase fase baik oleh fisik maupun modifikasi kimia pada sedimen.



Gambar 4. Bentuk kimia dari logam pada fase padat

Mobilitas relatif dan bioavailabilitas logam berat yang berhubungan fraksi yang berbeda di tunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Mobilitas dan bioavailabilitas relatif logam

Spesies logam dan asosiasi	Mobilitas
Exchangeable (dissolved) kation	Tinggi, perubahan komposisi kation mayor mungkin disebabkan karena lepas ke perubahan ion (contoh di lingkungan estuari)
Logam berasosiasi dengan Fe-Mn oksida	Sedang, perubahan kondisi redoks mungkin disebabkan karena lepas tapi beberapa logam bila ada mineral sulfida tidak larut
Logam berasosiasi dengan bahan organik	Sedang/tinggi, seiring waktu terjadi dekomposisi/oksidasi bahan organik
Logam berasosiasi dengan mineral sulfida	Bergantung sangat kuat dengan kondisi lingkungan, mineral oksida dan sulfida yang memulai melepas logam
Logam yang berada dalam fase kristal	Rendah, hanya tersedia setelah pelapukan atau dekomposisi.

BAB III

METODE PENELITIAN

3.1. Waktu dan Lokasi Penelitian

Penelitian ini merupakan kerjasama antara *Japan Society for the Promotion of Science* (JSPS) dengan Pusat Penelitian Oseanografi LIPI (P2O-LIPI).

Penelitian dilaksanakan di Perairan Teluk Jakarta (Gambar 5) pada tanggal 7-8 Agustus 2007 pada musim kemarau pada waktu pagi hari hingga siang hari. Cuaca pada saat penelitian cerah, agak bergelombang dan berangin kencang. Lokasi penelitian di Teluk Jakarta yang merupakan perairan semi tertutup dan berhubungan dengan Laut Jawa. Teluk ini di batasi oleh dua tanjung yaitu Tanjung Pasir di sebelah barat dan Tanjung Karawang di sebelah timur dan secara administrasi masuk kedalam tiga propinsi yaitu Banten, DKI Jakarta dan Jawa Barat. Air yang masuk ke teluk berasal dari 13 sungai yang berasal dari tiga propinsi tersebut. Teluk ini menyediakan berbagai pelayanan secara ekologis dan ekonomis dari industri pelabuhan, pelayaran, pariwisata dan perikanan.

Teluk Jakarta merupakan teluk yang relatif dangkal dengan kedalaman rata-rata 8,5 m dengan garis pantai sekitar 149 km dan lokasi tutupan sekitar 595 km² (Arifin *et al.*, 2006). Suhu air laut berkisar antara 28-31°C dan salinitas dengan kisaran 31-34 g/L, pada puncak musim hujan nilainya turun menjadi sekitar 16 g/L (Delft, 1985 *dalam* Williams *et al.*, 1997). Regim

pasang surut dengan tipe diurnal dengan kisaran variasi sekitar 0,5-1,0 m (DPMA, 1983 *dalam Williams et. al.*, 1997).

Analisis contoh sedimen di lakukan di Laboratorium Kimia Oseanografi Pusat Penelitian Oseanografi LIPI, Jakarta.

3.2. Bahan dan Peralatan

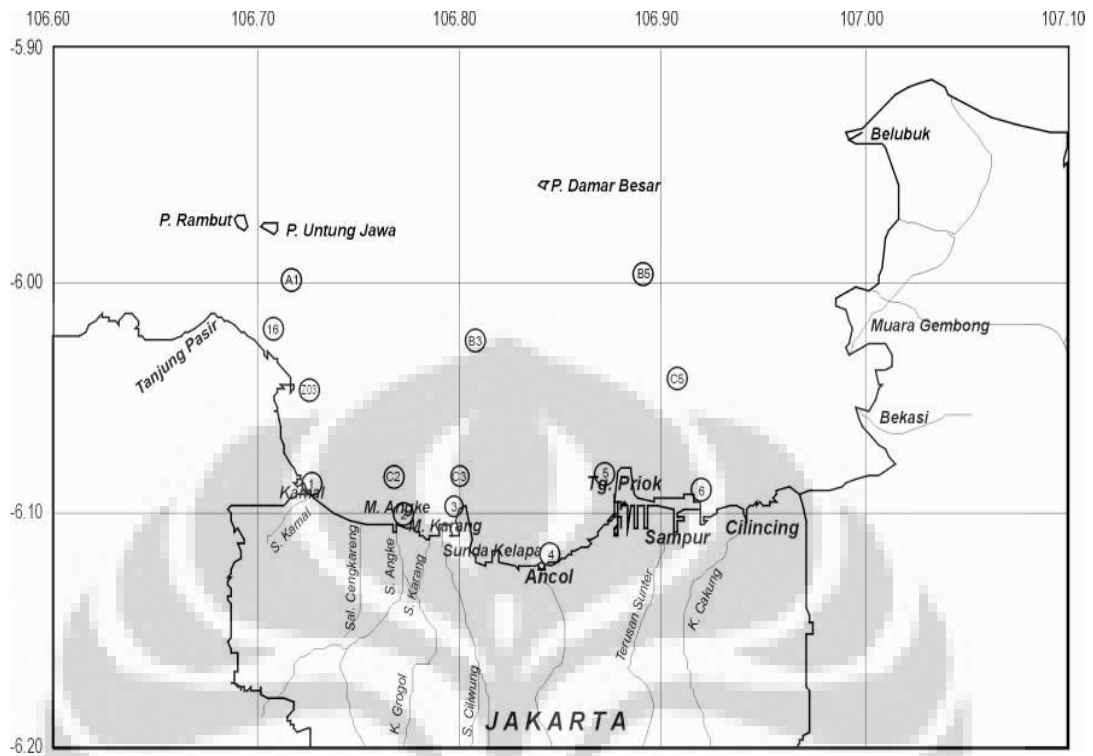
Bahan penelitian yang akan di teliti adalah sedimen permukaan yang diambil dari perairan Teluk Jakarta.

Peralatan yang digunakan untuk mengukur kadar logam berat menggunakan alat AAS merk Varian SpectraAA 20 plus Flame AAS. Adapun alat dan bahan disajikan dalam Tabel 3.

3.3. Metode

3.3.1. Penentuan stasiun pengambilan sampel

Pengambilan sampel dilakukan di 14 stasiun, lokasi di Teluk Jakarta di daerah muara sungai di sepanjang pesisir teluk yang terdapat berbagai aktivitas, sebanyak 7 stasiun (St 16, 1,2,3,4,5,6), stasiun dengan jarak \pm 5 km sebanyak 5 stasiun (St. A1, Z03, C2, C3, C5) dan stasiun dengan jarak \pm 10 km sebanyak 2 stasiun (St B3, B5) dimana lokasinya di dalam teluk (diperkirakan lokasi agak jauh dari sumber polutan).



Gambar 5. Lokasi studi dan pengambilan sampel

3.3.2. Pengumpulan dan penanganan sampel

Sedimen permukaan diambil dengan menggunakan " *Smith McIntyre Grab sampler* " yang terbuat dari stainless stel sebanyak 14 stasiun. Sampel sedimen diambil 0-10 cm (di perkirakan sebagai daerah yang masih terdapat aktivitas biologis dari biota laut) dari permukaan sedimen dengan 1-3 kali pengambilan kemudian dihomogenkan. Sampel yang telah di ambil dengan sendok plastik kemudian dimasukkan kedalam wadah plastik polypropilen (dimana semua peralatan plastik telah dicuci dengan HNO_3 6N dan di bilas dengan aquades) dan disimpan di *ice box* dengan suhu 4°C hingga di laboratorium.

Tabel 3. Alat dan Bahan Penelitian

No	kegiatan	satuan	Alat/bahan	keterangan
1	Pengambilan sampel sedimen	14 sampel	<ul style="list-style-type: none"> • Smith McIntyre Grab • kantong plastik polypropilen ziplock • Sendok plastik • Sarung tangan plastik • <i>ice box</i> 	Lapangan
2	Pengukuran logam berat dalam sedimen	mg/kg	<ul style="list-style-type: none"> • AAS • Bahan kimia 	laboratorium
3	Ukuran partikel	%	<ul style="list-style-type: none"> • Oven • Ayakan • Timbangan 	Laboratorium
4	Bahan organik total	%	<ul style="list-style-type: none"> • Tanur • Timbangan 	laboratorium

3.3.3. Pengumpulan Data

Sampel sedimen yang didapat, dianalisis di laboratorium untuk mengetahui ukuran partikel, bahan organik, dan konsentrasi total maupun pada definisi operasional fraksi geokimia logam berat dalam sedimen (skema analisis sedimen dapat dilihat pada Gambar 6)

Sebagai penunjang dikumpulkan data-data antara lain : data panduan mutu sedimen yang di keluarkan oleh *Australia and New Zealand guidelines for fresh and marine water quality* dari *Australian and New Zealand Environment and Conservation Council/Agricultural and Resource Management Council of Australia and New Zealand (ANZECC/ARMCANZ)* dalam Burton *et al* 2004 dan oleh *Canadian environmental quality guidelines* dari *Canadian council of minister environment (CCME, 2001)*, data *background value* logam berat menurut Turekian & Wedepohl, 1961 dalam Rubio *et al.*, 2000 untuk menghitung indeks geoakumulasi dan faktor

pengayaan serta data mengenai konsentrasi logam berat dalam sedimen di Teluk Jakarta dari beberapa penelitian terdahulu.

3.3.4. Teknis Analisis

Ukuran Partikel

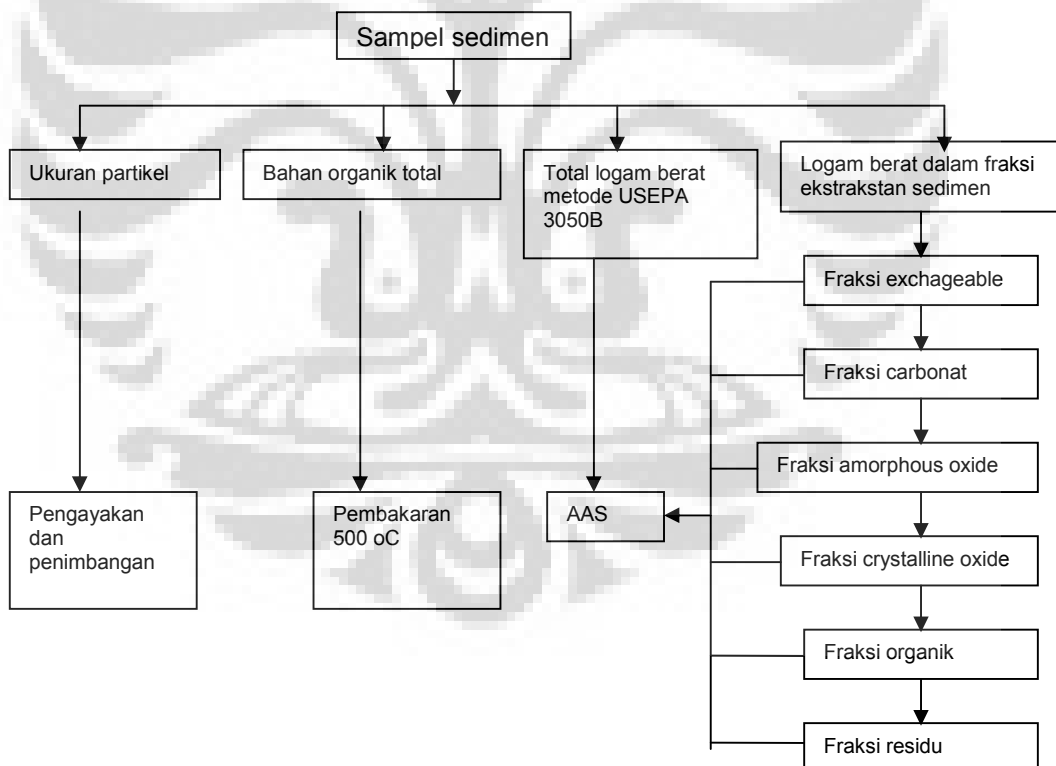
Sebagian sampel digunakan untuk mengukur ukuran partikel (*Grainsize*) dengan metode pengayakan basah dengan skala *Wentworth* (1922) dalam Ongkosongo *et al.*, 1980. Penimbangan sampel sedimen dilakukan untuk mendapatkan berat sedimen awal pada sampel sedimen yang sudah dikeringkan. Kemudian dilakukan pengayakan sedimen dengan metode basah (*wet sieving*) menggunakan ayakan dengan bukaan mesh 0.5, 0.250, 0.125, 0.063, 0.004 mm dan yang lebih kecil dari 0.004 mm ditadah dengan gelas. Selanjutnya, sedimen yang sudah diayak dikeringkan dan setelah kering dilakukan penimbangan kembali. Tujuan dari penimbangan adalah untuk mengetahui prosentase berat tiap-tiap fraksi ukuran butir dan penamaan jenis dari sedimen serta ukuran partikel dari massa sedimen dengan mengikuti metode segitiga Shepard (1954) dalam Ongkosongo *et al.*, 1980.

Bahan Organik Total

Sebagian sampel digunakan untuk mengetahui bahan organik dengan menghitung % *LOI* (*Loss on Ignation*) dengan di bakar di tanur dengan suhu 500°C selama 4 jam kemudian ditimbang secara gravimetri (Mucha *et al.*, 2004 dalam Ismail 2007).

Total Logam Berat

Sampel sedimen dikeringkan dalam oven 105 °C selama 24 jam kemudian sekitar 1 g dihancurkan dengan metode *acid digestion* HNO₃-HCL-H₂O₂ metode USEPA 3050B (USEPA, 1986, Burton *et al.*, 2004) selanjutnya diukur dengan *Flame Atomic Absorbtion Spectrofotometer*. Metode ini merupakan "a very strong acid digestion" yang dapat menghancurkan hampir semua unsur yang ada di lingkungan. Walaupun metode ini tidak dapat menghancurkan mineral kristal silikat, namun dapat dianggap mendekati dari jumlah total unsur logam berat (USEPA, 1986, Burton *et al.*, 2004).



Gambar 6. Skema analisis sedimen

Untuk menjamin mutu pengukuran, pengukuran terhadap bahan yang bersertifikat (*Certified Reference Material*) (Tabel 4) dilakukan dengan menggunakan CRM BCSS-1 dari *Institute for National Measurement Standards, National Research Council of Canada*. Metode USEPA 3050B merupakan metode dan teknik standar yang sering digunakan untuk menentukan “*near total*” kandungan logam di sedimen.

Analisis logam Al, Fe, Mn, Pb, Cd, Cr, Cu, Ni dan Zn menggunakan AAS merk Varian SpectraAA 20-plus spektrofotometeri serapan atom nyala dengan menggunakan nyala udara/asetilen kecuali Al dengan nyala nitrous oksida/asetilen. Kemudian dibuat standar kurva kalibrasi untuk mendapatkan nilai konsentrasi dari sampel sedimen yang dianalisis. Pada pengukuran CRM didapatkan hasil recovery lebih dari 95% untuk logam Zn, Cu, Pb, Ni dan Cd, sedangkan logam Cr kurang dari 50% hal ini kemungkinan disebabkan karena pada pengukuran Cr di alat AAS menggunakan nyala udara/asetilen sedangkan pada rekomendasi alat harus menggunakan nyala nitrous oksida/asetilen, sehingga pembakaran logam Cr menjadi tidak sempurna.

Tabel 4. Recovery CRM BCSS-1

	Pengukuran	Certified	Recovery (%)
Zn (mg/kg)	102.21+0.51	119±12	96
Cu (mg/kg)	18.07+0.21	18.5±2.7	98.8
Pb (mg/kg)	19.31+3.4	22.7±3.4	100
Ni (mg/kg)	55.49+0.84	55.3±3.6	100
Cd (mg/kg)	0.20+0.009	0.25±0.04	95.3
Cr (mg/kg)	41.03+0.93	123±14	38.5

Fraksi geokimia logam berat

Metode analisis untuk mengetahui konsentrasi logam berat dalam fraksi geokimia menggunakan teknik yang dikembangkan oleh Tessier *et al* (1979), yang merupakan salah satu teknik yang sering dipakai dalam ekstraksi bertahap dan bentuk dasar dari skema fraksi logam yang dilakukan dalam penelitian ini (Tabel 5). Untuk lebih memahami potensial mobilitas logam berat, ekstraksi tunggal untuk mengetahui Fe/Mn oksida seperti yang digambarkan oleh Tessier *et al* (1979) digantikan dengan membagi menjadi dua bagian (Amacher, 1996 dalam Burton *et. al.*, 2005). Oksida Fe/Mn amorf di ekstraksi dengan larutan asam (pH 2) hidrosilamin hidroklorida, kemudian dilarutkan kembali oksida Fe/Mn kristal dengan ekstraksi menggunakan amonium oksalat yang lebih agresif.

Semua tahap ekstraksi kecuali digesti yang terakhir menggunakan wadah sentrifuse polipropilen ukuran 50 mL untuk mengurangi hilangnya material padat. Antara tiap ekstraksi, pemisahan dilakukan dengan sentrifugasi pada 3000 g selama 5 menit. Supernatan dipindahkan dengan menggunakan pipet dan disimpan untuk analisa. Residu dicuci dengan 10 mL 1 M MgCl₂, di sentrifugasi kembali dan supernatannya dibuang (lihat skema analisis pada Lampiran 1).

Analisis Pb, Cd, Cr, Cu, Ni dan Zn menggunakan AAS merk Varian SpectraAA 20-plus spektrofotometri serapan atom nyala dengan menggunakan nyala udara/asetilen.

Baik untuk analisis total logam berat maupun pada definisi operasional fraksi geokimia logam berat dalam sedimen dengan ekstraksi bertahap, standar analisis disiapkan dengan menggunakan ekstrak yang sama untuk meminimalkan efek dari matrik. Kemudian dibuat standar kurva kalibrasi sehingga mendapatkan persamaan garis dari regresi linier untuk mendapatkan nilai konsentrasi dari sampel tiap fraksi dari sedimen yang dianalisis (lihat Lampiran 2).

Tabel 5. Prosedur ekstraksi bertahap yang dilakukan untuk definisi operasional fraksigeokimia logam berat di sedimen. Prosedur ini menggunakan sedimen sekitar 1 g (berat kering)

Step	Operationally defined fraction	Reagents	Vol (ml)	Temp (°C)	Extraction Time
1	"Exchangeable"	Unbuffered 1 M MgCl ₂	20	22±5	Shaking for 30 min
2	"Carbonates"	1 M NaOAc, adjusted to pH 5 with HOAc	20	22±5	Shaking for 6 hr
3	"Amorphous oxides"	0.25 M NH ₂ OH.HCl, in 0.25 M HCl	40	50±5	Extract for 30 min (occasional manual shaking)
4	"Crystalline oxides"	0.2 M (NH ₄) ₂ C ₂ O ₄ .H ₂ O, 0.25 M H ₂ C ₂ O ₄ .H ₂ O, 0.1 M ascorbic acid	40	100 (boiling water bath)	Extract for 30 min (occasional manual shaking)
5	"Organic"	0.02 M HNO ₃	6	85±5	2 hr (occasional manual shaking)
		pH 2 (adjust with HNO ₃), 30% H ₂ O ₂ (v/v)	10		
		pH 2 (adjust with HNO ₃), 30% H ₂ O ₂ (v/v)	6		
		3.2 M NH ₄ OAC in 20% HNO ₃ (v/v)	10	22±5	3 hr (occasional manual shaking) Shaking for 30 min
6	"Residual"	HNO ₃ , H ₂ O ₂ , HCl (USEPA method 3050B:USEPA, 1986)			

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

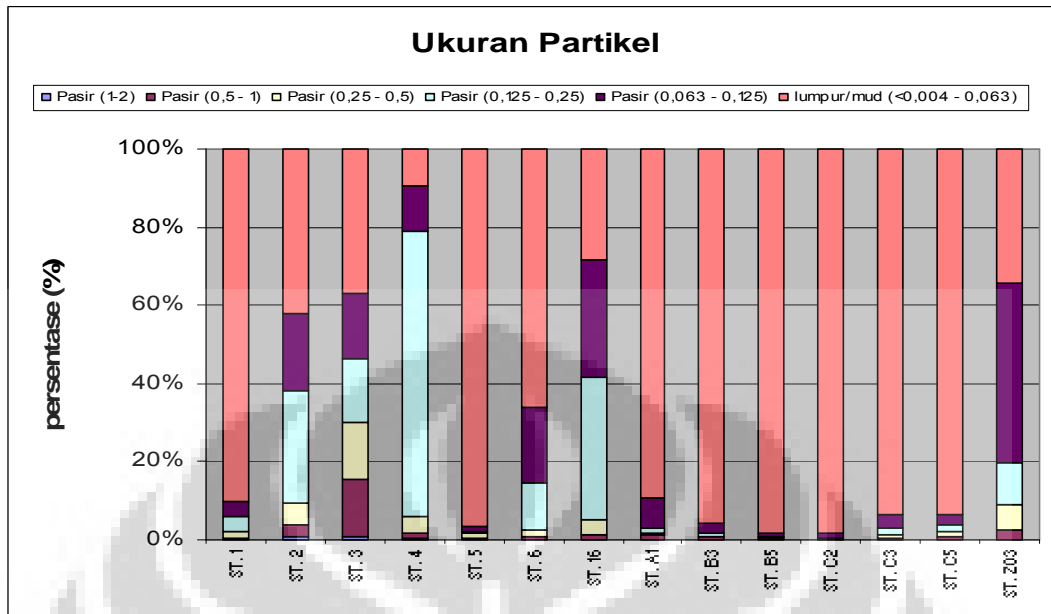
4.1. Karakteristik sedimen

4.1.1. Ukuran Partikel Sedimen

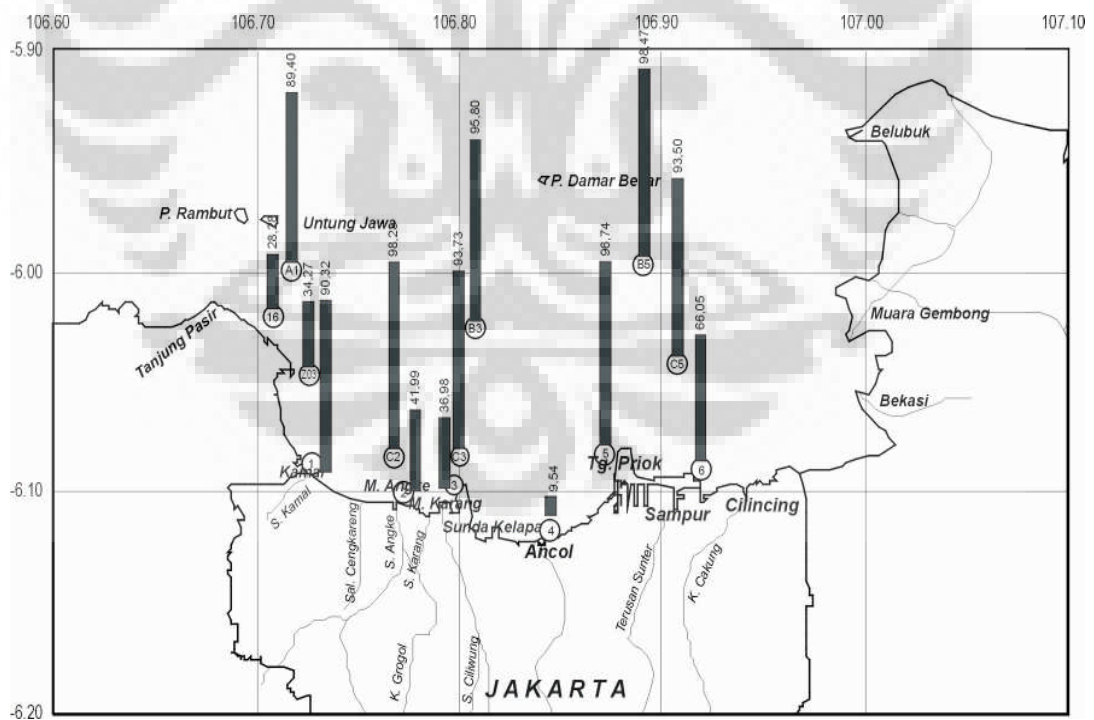
Pada penelitian ini didapatkan hasil pengukuran partikel (tabel hasil pada Lampiran 3) serta jenis dari sedimen Teluk Jakarta. Sedimen yang telah diidentifikasi di Teluk Jakarta adalah jenis lumpur dan lumpur pasiran.

Jenis lumpur berada di hampir lebih dari sebagian sampel sedimen di lokasi penelitian. Lumpur umumnya mengandung kurang dari 10% pasir. Jenis lumpur pasiran mengandung antara 50%-90% pasir (Ongkosongo 1984 dalam Williams *et al.*, 1997). Pada penelitian ini didapat nilai % lumpur (Gambar 7) dengan kisaran 9,54-98,47%. Pada daerah muara sungai nilai % lumpur tertinggi di St.1 dan St.5 sedangkan di daerah dengan jarak \pm 5 dan 10 km hampir semua sedimen berjenis lumpur kecuali pada St Z03 (Gambar 8). Hal ini mengindikasikan lokasi deposisional dimana partikel halus, dibawa dari sumber dan limpasan lokal kemudian terakumulasi.

Pada pengukuran partikel ini dapat memberikan gambaran mengenai distribusi ukuran partikel dimana semakin halus ukuran partikel maka semakin jauh terdeposisi dari sumbernya. Semakin halus ukuran partikel semakin besar kapasitas absorpsi untuk logam-logam yang berada di ekosistem tersebut. Hal ini dapat mengindikasikan proses distribusi logam-logam berat dalam sedimen.



Gambar 7. Prosentase ukuran partikel dalam sedimen



Gambar 8. Distribusi ukuran partikel < 63 μm (%) dalam sedimen

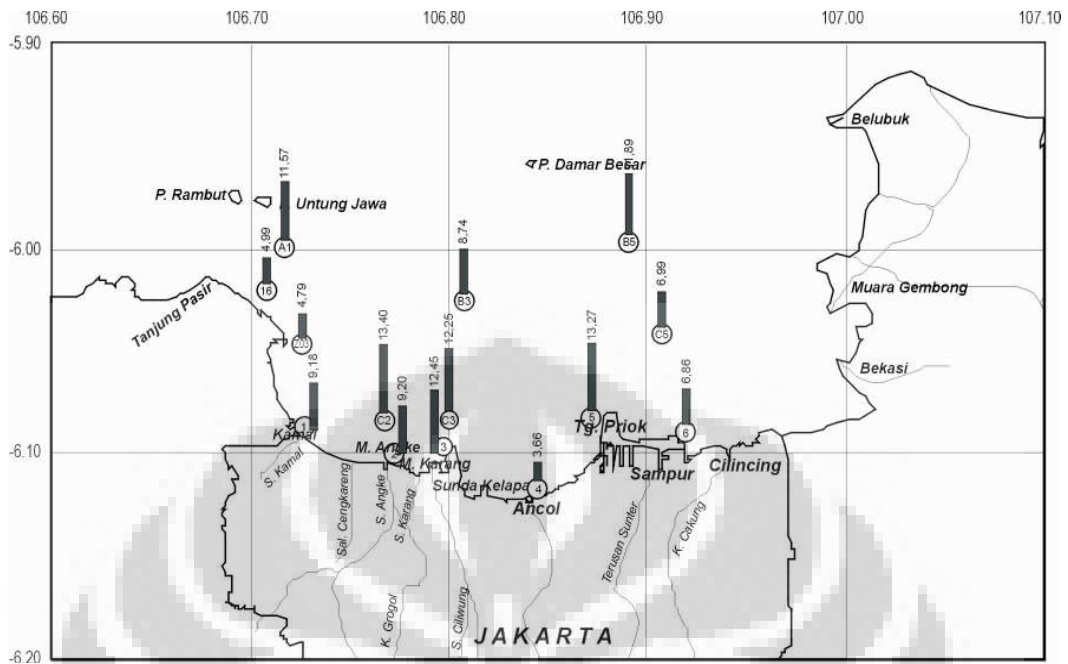
4.1.2. Bahan Organik Total

Kandungan bahan organik total yang terdapat di permukaan sedimen di Teluk Jakarta sangat bervariasi, dengan nilai kisaran *LOI* 3,66-13,40% (Gambar 9). Nilai *LOI* tertinggi di St. C2 (13,40%) dan terendah di St.4 (3,66%). Pada St.C2 dimana nilai % lumpurnya tinggi, tinggi juga nilai% *LOI* nya demikian pula dengan St.4 dimana nilai % lumpurnya rendah, rendah pula nilai % *LOI* nya (tabel hasil pada Lampiran 4). Hal ini menunjukkan adanya pengaruh kandungan partikel halus yang berhubungan dengan total bahan organik, dimana pada ukuran butir lumpur (< 63 μm), luas permukaannya yang besar sehingga menyerap bahan organik tersebut lebih banyak.

Pengukuran bahan organik dapat memberikan gambaran mengenai kontaminan yang dapat berasal dari aktivitas daratan. Bahan organik secara kimia dapat berikatan dengan ion-ion logam dengan membentuk senyawa kompleks. Dengan adanya pengaruh antara ukuran partikel dengan bahan organik sehingga dapat dilihat pola distribusi dari logam-logam berat.

4.2. Distribusi Logam berat

Pada Tabel 6 disajikan data konsentrasi total logam berat dalam sedimen permukaan di Teluk Jakarta. Kelimpahan logam-logam di sedimen permukaan menggambarkan interaksi yang kompleks dari litologi dan antropogenik.



Gambar 9. Distribusi bahan organik (%) dalam sedimen

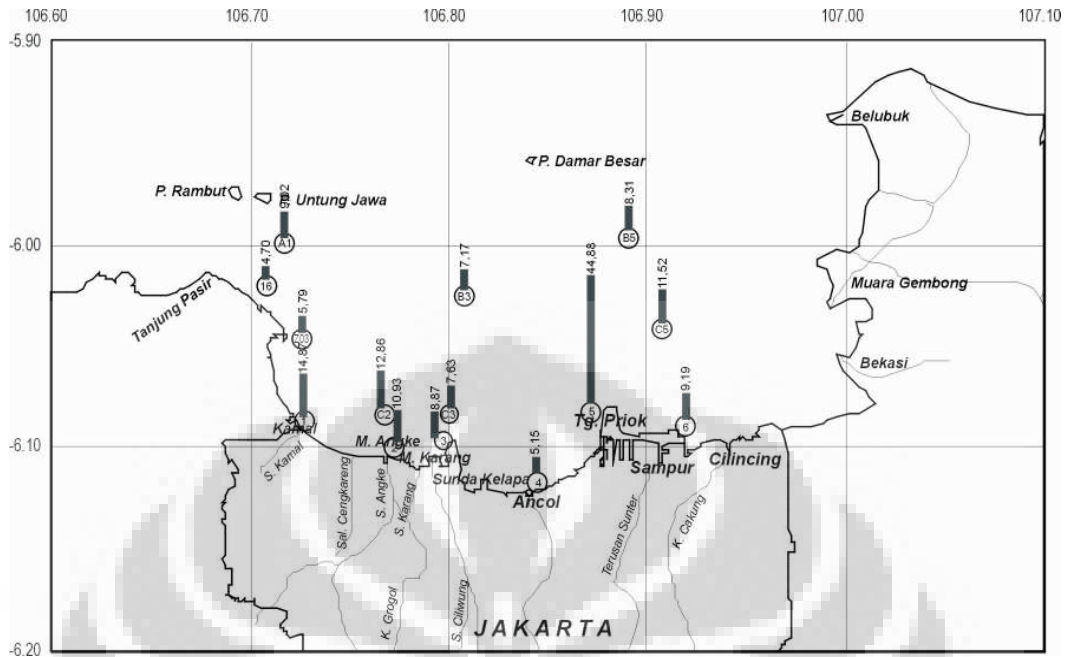
Pada Gambar 10 disajikan distribusi Pb di Teluk Jakarta dimana konsentrasi Pb berkisar antara 4,7-44,9 mg/kg, terlihat konsentrasi tertinggi di St. 5 dimana lokasi tersebut di dekat pelabuhan Tanjung Priuk (sumber Pb kemungkinan berasal dari aktivitas pelabuhan dan pelayaran dimana bahan bakar yang digunakan kemungkinan mengandung Pb) dan dekat juga dengan muara dari kali Sunter yang dapat juga berasal dari aktivitas daratan dan pesisir.

Tabel 6. Konsentrasi total logam berat (mg/kg) dalam sedimen

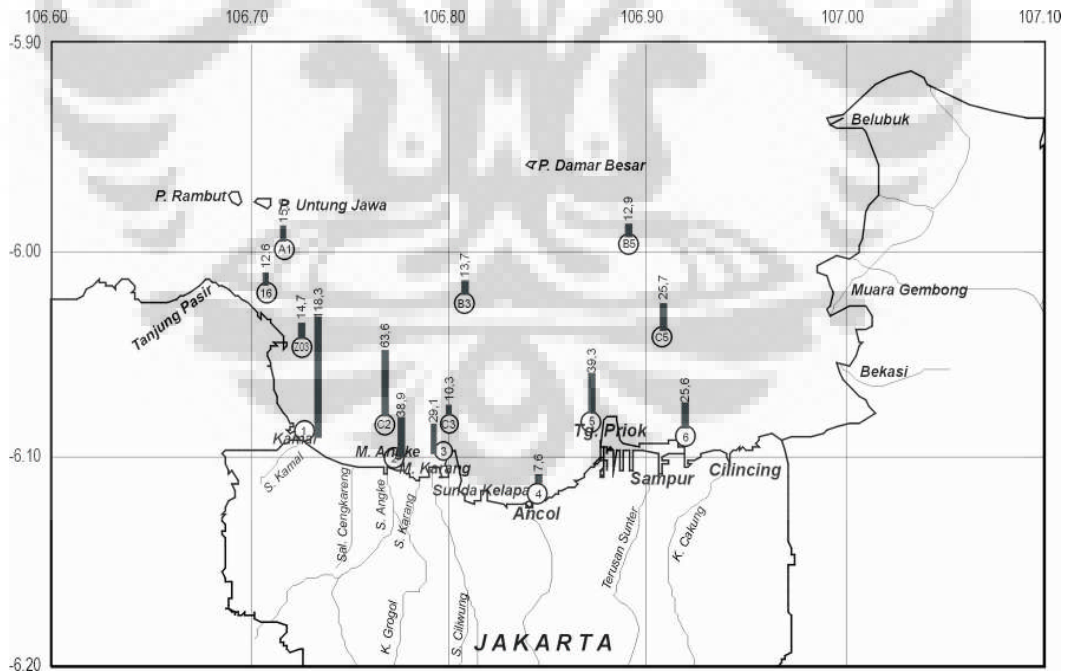
No,Sta,	Pb	Cd	Fe	Mn	Al	Cr	Cu	Ni	Zn
St.1	14.9	0.157	57137	1495	57674	138.1	118.3	38.2	880
St.2	10.9	0.059	67963	711	48481	17.5	38.9	5.8	183
St.3	8.9	0.072	57532	670	39582	14.5	29.1	3.3	116
St.4	5.2	0.012	62561	1632	33150	18.4	7.6	12.0	97
St.5	44.9	0.112	43302	1553	48751	24.7	39.3	10.7	175
St.6	9.2	0.072	52091	1418	36925	21.2	25.6	12.0	127
St.16	4.7	0.072	43401	698	36724	8.7	12.6	1.5	55
St.A1	9.0	0.033	45989	969	47483	16.3	15.0	8.2	77
St.B3	7.2	0.038	44091	865	47665	23.5	13.7	13.6	81
St.B5	8.3	0.050	41555	845	43595	22.8	12.9	13.5	78
St.C2	12.9	0.155	59937	532	69623	13.6	63.6	7.8	261
St.C3	7.6	0.056	40429	698	35832	21.7	10.3	13.0	69
St.C5	11.5	0.147	47412	1110	48406	21.0	25.7	13.1	123
St.Z03	5.8	0.101	47902	1209	40831	11.7	14.7	2.4	71
mean	11.5	0.081	50807	1029	45337	26.7	30.5	11.1	171
median	8.9	0.072	47657	917	45539	19.7	20.3	11.4	107
Minimum	4.7	0.012	40429	532	33150	8.7	7.6	1.5	55
Maksimum	44.9	0.157	67963	1632	69623	138.1	118.3	38.2	880
Standar deviasi	10.0	0.047	8751	373	9700	32.4	29.5	8.9	212

Pada Gambar 11 disajikan distribusi Cu di Teluk Jakarta dimana konsentrasi Cu berkisar antara 7,6-118,3 mg/kg, terlihat konsentrasi tertinggi di St. 1 dimana lokasi tersebut di dekat muara Kamal yang mungkin masukan Cu tersebut dari kontribusi dari limpasan sungai Kamal yang membawa Cu dari aktivitas daratan dan pesisir.

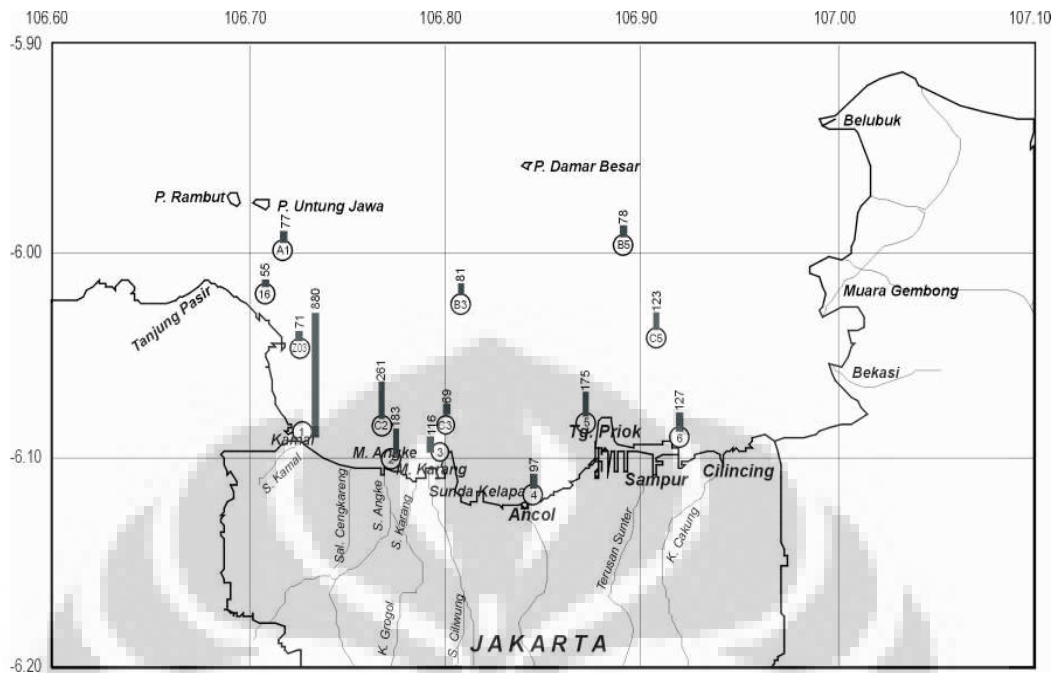
Pada Gambar 12. disajikan distribusi Zn di Teluk Jakarta dimana konsentrasi Zn berkisar antara 55-880 mg/kg, terlihat konsentrasi tertinggi juga di St. 1 dimana lokasi tersebut di dekat muara Kamal yang mungkin masukan Zn tersebut dari kontribusi dari limpasan sungai Kamal yang membawa Zn dari aktivitas daratan dan pesisir.



Gambar 10. Distribusi Pb (mg/kg) dalam sedimen permukaan



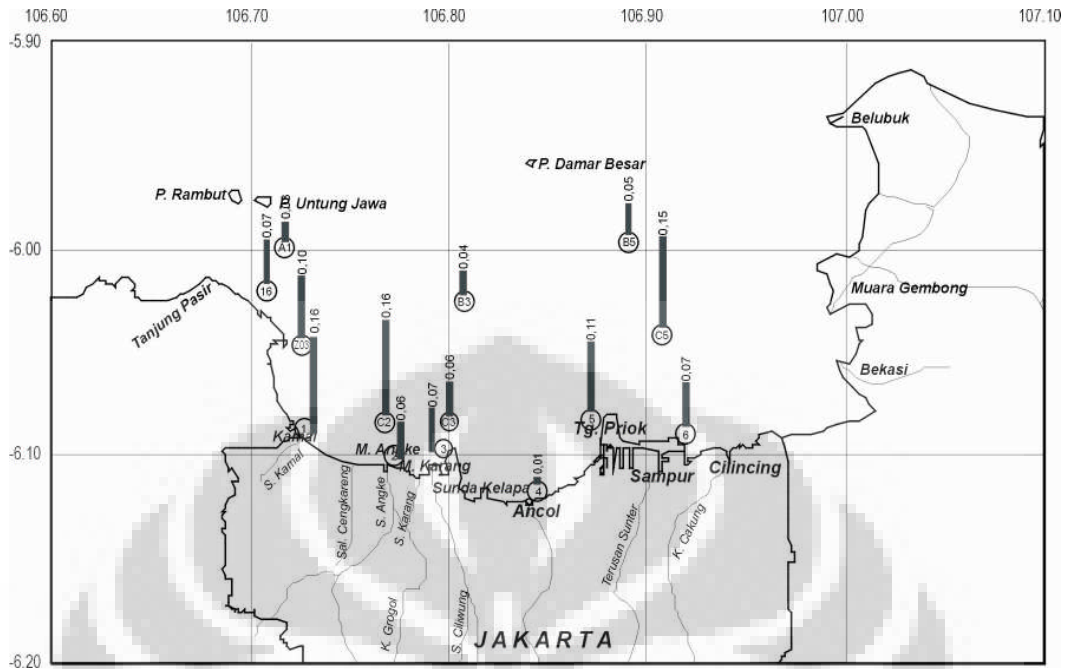
Gambar 11. Distribusi Cu (mg/kg) dalam sedimen



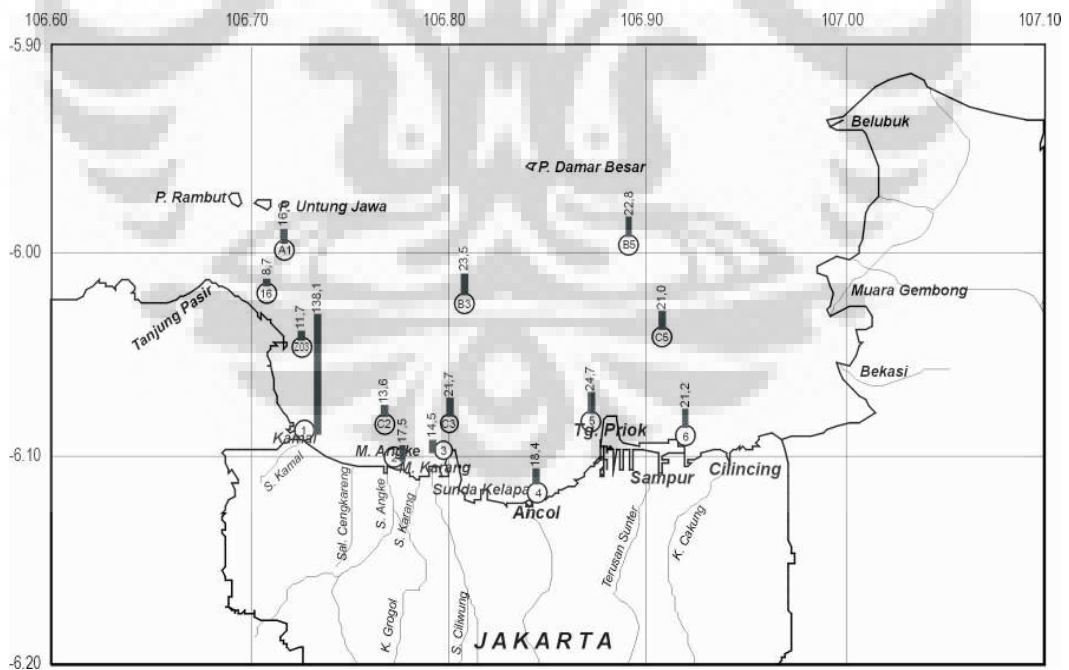
Gambar 12. Distribusi Zn (mg/kg) dalam sedimen

Pada Gambar 13. disajikan distribusi Cd di Teluk Jakarta dimana konsentrasi Cd berkisar antara 0,012-0,157 mg/kg, terlihat konsentrasi tertinggi di St. 1 (Muara Kamal), St.C2 (Muara Angke) dan St. C5 (diatas pelabuhan Tanjung Priuk) dimana pada lokasi ini mendapat kontribusi logam ini dari limpasan sungai yang membawa Cd dari aktivitas daratan dan juga dari aktivitas pelabuhan.

Pada Gambar 14. disajikan distribusi Cr di Teluk Jakarta dimana konsentrasi Cr berkisar antara 8,7-138,1 mg/kg, terlihat konsentrasi tertinggi di St. 1 (Muara Kamal) dimana lokasi mendapat kontribusi logam ini dari limpasan sungai yang membawa Cd dari aktivitas daratan dan juga dari aktivitas yang berasal di pesisir.

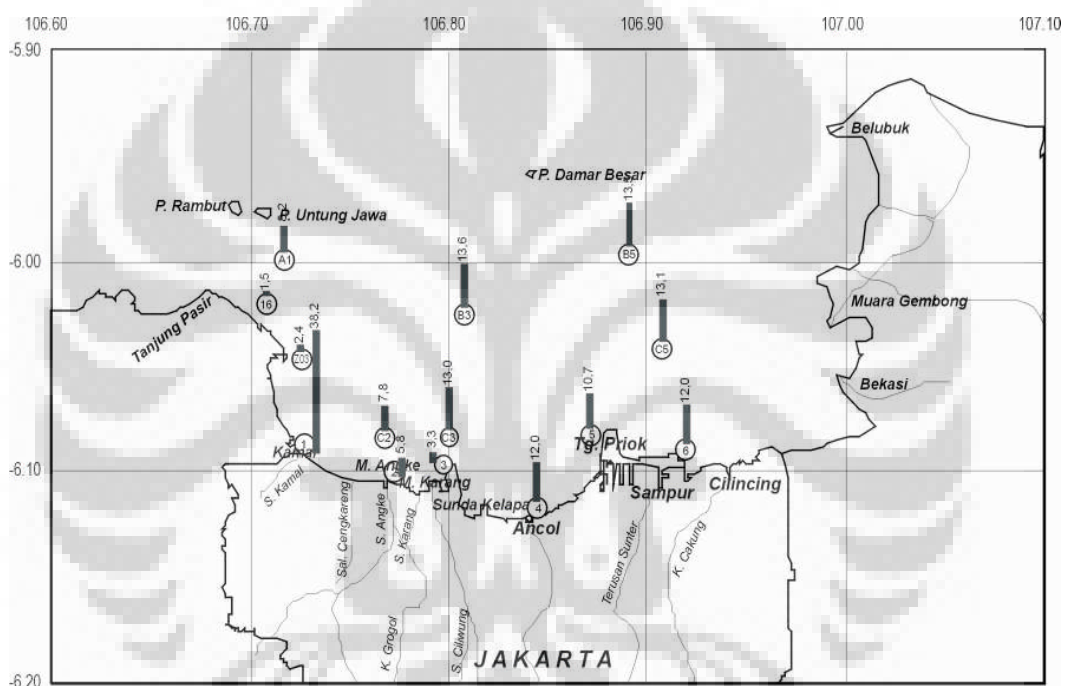


Gambar 13. Distribusi Cd (mg/kg) dalam sedimen



Gambar 14. Distribusi Cr (mg/kg) dalam sedimen

Pada Gambar 15. disajikan distribusi Ni di Teluk Jakarta dimana konsentrasi Ni berkisar antara 0,012-0,157 mg/kg, terlihat konsentrasi tertinggi di St. 1 (Muara Kamal) dimana lokasi mendapat kontribusi logam ini dari limpasan sungai yang membawa Ni dari aktivitas daratan dan juga dari aktivitas pelabuhan.



Gambar 15. Distribusi Ni (mg/kg) dalam sedimen

Umumnya limpasan limbah perkotaan dianggap sebagai sumber yang dapat menyebar sehingga memberi kontribusi yang signifikan luasnya kisaran logam pada daerah perkotaan yang padat. Menurut Makepeace *et al.*, 1995 (dalam Burton *et al.*, 2004) logam berat yang harus diperhatikan dari limpasan limbah perkotaan adalah Pb, Cu, Zn, Cr, dan Cd. Masukan logam-

logam ini ke badan air dapat berasal dari korosi produk logam, serta emisi kendaraan.

Masukan logam pada limpasan limbah kota, hubungan sumber dari perkotaan dan pengayaan logam di sedimen telah di dokumentasikan dengan baik (USEPA, 1997; Burton *et al.*, 2005). Sebagai contoh, Liebens, 2001 (*dalam* Burton *et al.*, 2005), melaporkan bahwa daerah perkotaan berhubungan erat dengan pengayaan logam ke sedimen.

Sebagai tambahan masukan logam secara antropogenik juga dipengaruhi oleh pengaruh dispersi partikel halus sedimen yang terdispersi, hal ini juga harus diperhatikan. Bentuk distribusi logam dipengaruhi sangat kuat oleh sedimen pada distribusi ukuran butir (Campbell *et al.*, 1988).

4.3. Perbandingan dengan Pedoman Kualitas Sedimen

Kualitas sedimen Teluk Jakarta dibandingkan dengan pedoman kualitas sedimen: antara lain dengan ANZECC/ARMCANZ (2000) dari Australia dan Selandia Baru (*dalam* Burton *et al.* 2004) dan pedoman kualitas sedimen dari Canada (CCME 2001) karena Indonesia belum memiliki pedoman mutu untuk sedimen. Kedua pedoman mutu tersebut menyediakan rekomendasi kriteria kualitas sedimen untuk logam berat. Pada Tabel 7. dapat dilihat perbandingan kualitas sedimen Teluk Jakarta dibandingkan dengan rekomendasi dari ANZECC/ARMCANZ (2000) dan CCME (2001).

Perbandingan hasil dari penelitian ini dengan ANZECC/ARMCANZ (2000) mengindikasikan bahwa konsentrasi rata rata logam berat di sedimen

berada dibawah pedoman mutu namun pada beberapa lokasi tertentu terdapat konsentrasi logam (Cr, Cu dan Ni) yang lebih tinggi dari batas bawah, bahkan Zn melebihi batas atas, sedangkan Pb mendekati batas bawah.

Tabel 7. Perbandingan kualitas sedimen di Teluk Jakarta dengan beberapa panduan mutu

		Al	Cd	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	Zn
Teluk Jakarta	Mean	45337	0.081	26.7	30.5	50807	1029	11.1	11.5	171
	Median	45539	0.072	19.7	20.3	47657	917	11.4	8.9	107
	Maximum	69623	0.157	138.1	118.3	67963	1632	38.2	44.9	880
	Minimum	33150	0.012	8.7	7.6	40429	532	1.5	4.7	55
ANZECC /ARMCANZ Guidelines	Low	-	1,5	80	65	-	-	21	50	200
	High	-	10	370	270	-	-	52	220	410
CCME	ISQG*	-	0,7	52,3	18,7	-	-	-	30,2	124
	PEL**	-	4,2	160	108	-	-	-	112	271

(*)ISQG, interim sediment quality guidelines

(**)PEL, probable effect levels

Namun bila dibandingkan dengan CCME (2001), mengindikasikan bahwa konsentrasi Cu dan Zn telah melewati pedoman mutu ISQG (*interim sediment quality guidelines*), namun pada beberapa lokasi tertentu terdapat konsentrasi yang lebih tinggi dari ISQG yaitu Cr, Cu, Zn, Pb dan juga lebih tinggi dari PEL (*probable effect level*) yaitu logam Cu, Cr dan Zn.

Berdasarkan perbandingan dengan pedoman kualitas sedimen tersebut, Cu, Cr dan Zn dapat beresiko bagi kualitas lingkungan disekitar sistem akuatik.

4.4. Indikasi Pengayaan

Pada panduan kualitas sedimen disediakan nilai yang membolehkan jumlah yang mengkontaminasi sedimen, sejauh perbandingan merupakan

syarat untuk keseluruhan pengkajian tingkat kontaminasi logam di sedimen estuari. Ini merupakan konsekuensi yang besar dari keberadaan latar belakang konsentrasi logam yang tidak diketahui di dalam sedimen. Pernyataan konsentrasi logam sebagai indeks geoakumulasi (*I_{geo}*) relatif untuk mereferensi lokasi atau sedimen sebelum adanya industri dari lokasi studi yang direpresentasikan sebagai pendekatan yang dapat memecahkan masalah ini.

Indeks geoakumulasi

Indeks geoakumulasi didefinisikan oleh (Muller 1979 dalam Rubio 2000) untuk konsentrasi logam dalam fraksi ukuran partikel < 2 µm dan menggunakan nilai standar *global shale (average shale)* yang dinyatakan dalam persamaan

$$I_{geo} = \log_2 \frac{C_n}{1,5 \times B_n}$$

dimana C_n merupakan konsentrasi logam n yang diukur dalam sedimen, B_n merepresentasikan nilai latar belakang konsentrasi (*background values*) logam n dalam sedimen dan faktor 1,5 digunakan untuk menghitung kemungkinan variasi dari *background* data menurut variasi litologi. Contoh dan hasil perhitungan dapat dilihat pada Lampiran 5.

Indeks geoakumulasi pada Tabel 8 berisi tujuh tingkatan atau kelas, dengan *I_{geo}* 6 mengindikasikan hampir 100 kali lipat pengayaan di atas nilai

background. *Igeo* dinyatakan dalam ukuran butiran partikel < 63 µm (diasumsikan seluruh logam berasosiasi dengan ukuran butir yang halus).

Tabel 8. Indeks Geoakumulasi (Muller, 1979 dalam Rubio 2000)

<i>Igeo</i>	<i>Igeo Class</i>	<i>Pollution Intensity</i>
>5	6	<i>Very strong polluted</i>
4-5	5	<i>Strong to Very strong polluted</i>
3-4	4	<i>Strongly polluted</i>
2-3	3	<i>Moderately to strongly polluted</i>
1-2	2	<i>Moderately polluted</i>
0-1	1	<i>Unpolluted to moderately polluted</i>
0	0	<i>Unpolluted</i>

Pada penelitian ini *Igeo* dihitung menggunakan *background value* dari data *global average shale* dari Turekian & Wedepohl 1961 (Tabel 9) dan tidak menggunakan data dari beberapa penelitian sebelumnya karena dilihat dari hasil pengukuran nilai rata-rata yang didapat pada penelitian ini terlihat hampir sama dengan beberapa penelitian terdahulu, sehingga tidak digunakan sebagai *background value*.

Indeks geoakumulasi berisi tujuh tingkatan atau kelas, dengan *Igeo* kelas 6 mengindikasikan hampir 100 kali lipat pengayaannya dari *background value* (Muller, 1979 dalam Rubio 2000). Pada Gambar 16, diagram batang merepresentasikan prosentase dari tiap logam dalam kelas 0, 1, 2, dan 3 dari *background value* yang digunakan (Tabel 9).

Berdasarkan perhitungan Indeks geoakumulasi didapatkan untuk logam Cd, Cr dan Ni merefleksikan 100% sampel berada di kelas 0 (konsentrasi *background value*) hal ini mengindikasikan bahwa di sampel sedimen yang diambil dari Teluk Jakarta ini tidak terpolusi oleh logam ini. Hal

ini juga terjadi pada Cu dan Pb hampir 93% berada pada kelas 0 dan 7% pada kelas 1 yang mengindikasikan sebanyak 7% berada pada kelas yang mendekati terpolusi, sedangkan logam Mn dan Zn 71 % berada pada kelas 0 dan pada kelas 1 sebanyak 29% dan 21%, sedangkan 7% Zn berada pada kelas 2 yang mengindikasikan Zn sudah terpolusi sedang.

Tabel 9. Perbandingan antara *background values* untuk logam berat (mg/kg) dari beberapa penulis lain untuk Teluk Jakarta

Logam	Martin et al 1983 ^(a)	Hutagalung 1995 ^(b)	BGS 1997 ^(c)	Average shale ^(d)	Teluk Jakarta 2007 ^(e)
Al	-	-	-	80000	33150-69623 (45337) ^(f)
Cd	<0.5	2.8-3.9	0-4	0.3	0.01-0.16 (0.081)
Cr	-	4-32	1-95	90	9-138 (26,7)
Cu	11-82	20-93	3-128	45	8-118 (30,5)
Fe	-	-	-	47200	40429-67963 (50807)
Mn	-	-	-	850	532-1632 (924)
Ni	4-15	27-38	1-29	68	1-38 (11)
Pb	9-438	45-136	1-111	20	5-45 (11,5)
Zn	64-154	24-222	4-595	95	55-880 (171)

^(a) Martin et al 1983 dalam BGS (British Geological Survey 1997)

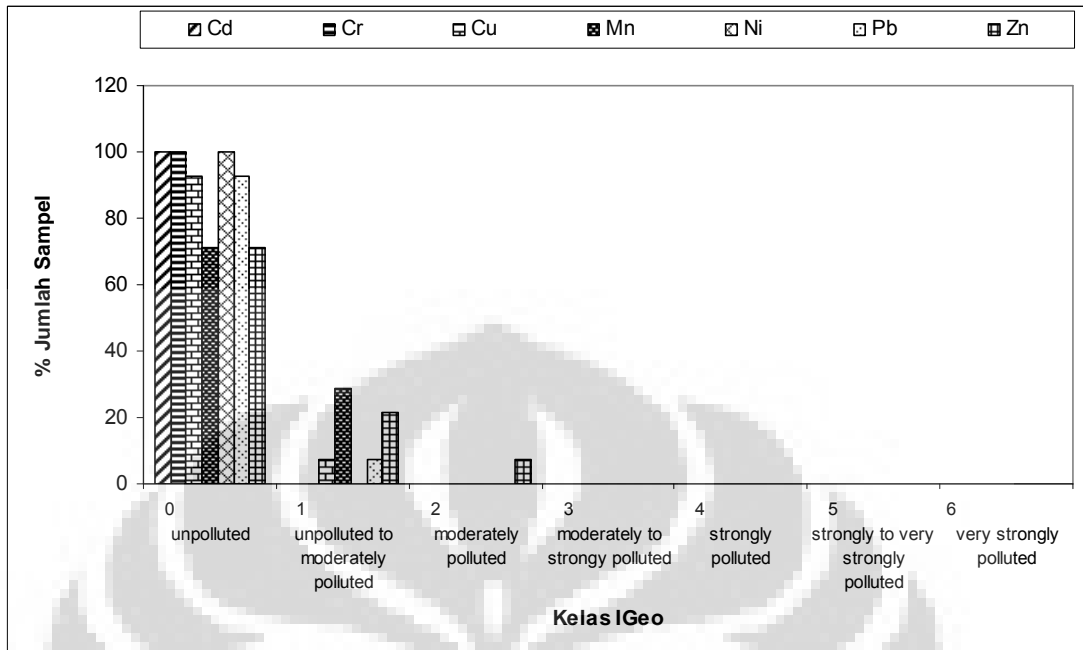
^(b) Hutagalung 1995 dalam BGS (British Geological Survey 1997))

^(c) BGS (British Geological Survey)

^(d) Turekian dan Wedepohl 1961 dalam Rubio et al. 2000

^(e) Teluk Jakarta 2007 (penelitian ini)

^(f) Nilai rata-rata



Gambar 16. Indeks geoakumulasi logam dalam sedimen

Hasil ini mengindikasikan bahwa sebagian sampel sedimen dari Teluk Jakarta telah terpolusi sedang beberapa logam. Namun hal ini harus dikaji lebih lanjut mengenai *Igeo* ini untuk dilakukan perhitungan dengan menggunakan *background value* dari daerah yang sama atau mendekati sama serta pengambilan sampel yang lebih banyak untuk merepresentasikan daerah tersebut berdasarkan bahwa Teluk Jakarta merupakan teluk tempat pembuangan limbah dari berbagai kegiatan.

4.5. Distribusi logam sebagai hubungan dengan sifat alami sedimen

Beberapa peneliti (Covelli & Fontolan, 1997 *dalam* Rubio 2000, Subramanian *et al.*, 1990) mengkritik penggunaan *Igeo* untuk evaluasi status polusi dan mereka menawarkan untuk menggunakan nilai normalisasi.

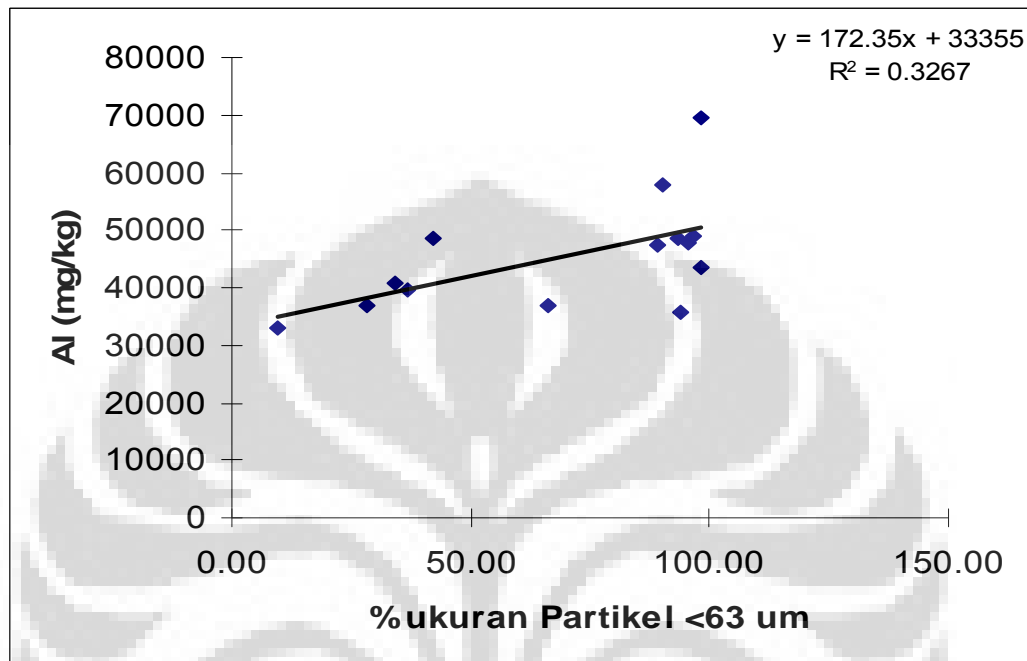
Distribusi konsentrasi logam berat dihubungkan dengan sifat sedimen alami seperti ukuran butir dan bahan organik. Hal ini telah diketahui bahwa ukuran partikel dan kandungan bahan organik merupakan faktor pengontrol yang penting dalam kelimpahan logam berat. Tekstur sedimen yang halus relatif mengandung logam berat yang tinggi, dimana area permukaan merupakan spesifikasi yang tinggi untuk partikel yang lebih kecil.

Selain faktor antropogenik sebagai sumber polutan, kejadian alami seperti pelapukan juga dipertimbangkan sebagai faktor penambahan logam berat ke lingkungan perairan. Untuk mengetahui kontaminasi logam berat beberapa peneliti menggunakan berbagai teknik untuk mengetahui variasi mineral alami dan mengetahui keadaan dasar. Ukuran partikel, total karbon organik dan unsur penunjuk seperti Al, Fe, Cs, Rb dan Li (Loring dan Rantala, 1992).

Aluminium merupakan unsur yang konservatif dan merupakan konstituen mayor dari mineral aluminosilikat dan telah digunakan sebagai unsur referensi untuk mengkaji pengayaan logam berat oleh beberapa peneliti (Rubio *et al.*, 2000, Subramanian *et al.*, 1990). Untuk alasan ini, maka pada penelitian ini dipilih Al untuk menormalisasi konsentrasi logam.

Pada Gambar 17 menunjukkan bahwa Al berhubungan positif walau $r^2=0,3267$ tetapi masih ada hubungan dengan kelimpahan partikel halus. Dimana Al berkorelasi dengan lumpur (butiran halus $<63 \mu\text{m}$) sebagai contoh bahwa setiap sampel sedimen yang mengandung 66,05% lumpur

mempunyai konsentrasi Al 36925 mg/kg. Hal ini yang mendorong untuk mencoba menggunakan Aluminium (Al) sebagai logam referensi.



Gambar 17. Hubungan antara kelimpahan ukuran partikel <63 um dan Al dalam sedimen

Pada Gambar 18 menggambarkan distribusi dan konsentrasi logam yang diteliti dalam hubungannya dengan konsentrasi logam aluminium. Dari data-data ini variasi yang dapat dilihat dimana logam Cd ($r^2=0,845$), Cu ($r^2=0,8322$), Cr ($r^2=0,896$), Fe ($r^2=0,945$), Mn ($r^2=0,811$), Ni ($r^2=0,784$), dan Zn ($r^2=0,901$), sedangkan Pb ($r^2=0,598$) dapat dilihat dengan logam Al. Ini mengindikasikan bahwa sampel sedimen yang diambil dari daerah ini masih terlihat alami. Hal ini harus dikaji lebih lanjut dengan mengetahui kondisi lokasi Teluk Jakarta yang kompleks yang merupakan daerah dengan berbagai aktivitas yang tinggi yang menampung berbagai limbah. Hal ini

mungkin karena jumlah stasiun pengambilan sampel yang sedikit dan penggunaan *background value* yang kurang sesuai sehingga tidak menggambarkan kondisi yang sebenarnya.

Faktor Pengayaan

Penggunaan faktor pengayaan untuk mengkaji kontaminasi logam di sedimen telah disarankan oleh Buat-Menard 1979 *dalam* Loska 2003. Versi ini kemudian diadaptasi untuk mengkaji kontaminasi bagi beberapa media lingkungan yang bervariasi.

$$EF \text{ (Enrichment Factor)} = (C_n/C_{ref})/(B_n/B_{ref})$$

dimana: C_n adalah konsentrasi logam yang diteliti

C_{ref} adalah konsentrasi logam dari lokasi referensi

B_n adalah konsentrasi logam referensi yang diteliti

B_{ref} adalah konsentrasi logam referensi dari lokasi referensi

Contoh perhitungan dan hasil perhitungan dapat dilihat pada Lampiran 6 Lima kategori kontaminan berdasarkan *enrichment factor* (Sutherland, 2000 *dalam* Loska, 2003) adalah:

EF < 2 - *depletion to minimal enrichment*

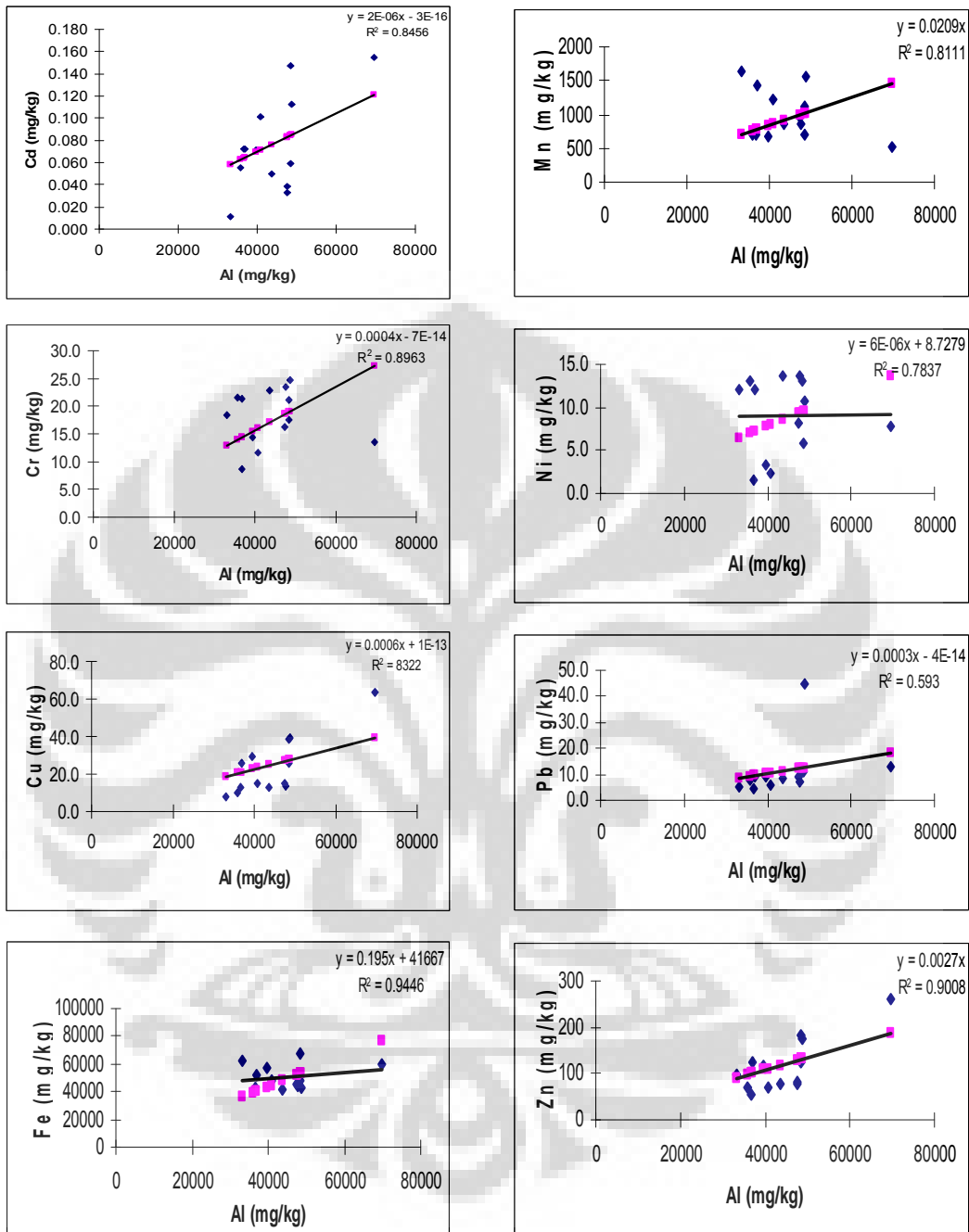
EF = 2-5 - *moderate enrichment*

EF = 5-20 - *significant enrichment*

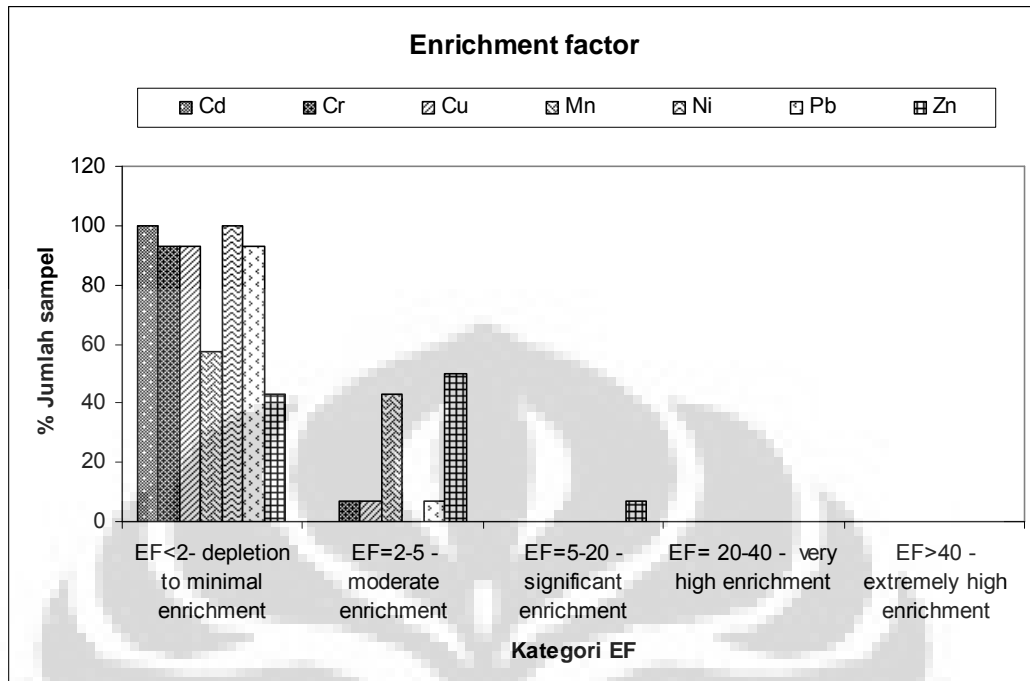
EF = 20-40 - *very high enrichment*

EF => 40 - *extremely high enrichment*

Pada Gambar 19 terlihat EF (*Enrichment Factor*) logam berat yang dihitung dengan menggunakan logam referensi Aluminium (*Average shale* dari Turekian & Wedepohl 1961 *dalam* Rubio *et al.*, 2000) didapatkan bahwa hampir sama seperti dengan Indeks geoakumulasi. Disini logam Ni dan Cd 100% sampel masuk ke kategori *depletion* hingga ke *minimal enrichment*, logam Cr, Cu dan Pb 93% masuk ke kategori *depletion* hingga ke *minimal enrichment* dan 7% *moderate enrichment*, logam Mn 57% sampel masuk ke kategori *depletion* hingga ke *minimal enrichment* dan 43% sampel *moderate enrichment* sedangkan logam Zn 43% sampel masuk ke kategori *depletion* hingga ke *minimal enrichment*, 50 % sampel *moderate enrichment* dan 7% sampel masuk ke kategori *significant enrichment*. Demikian juga sama seperti indeks geoakumulasi, indikasi ini mengindikasikan bahwa sampel sedimen yang diambil dari Teluk Jakarta telah terpolusi sedang beberapa logam. Namun hal ini harus dikaji lebih lanjut mengenai *Igeo* ini untuk dilakukan perhitungan dengan menggunakan *background value* dari daerah yang sama atau mendekati sama. Namun hal ini dapat digunakan di daerah lain yang tingkat polusinya tidak sekomplek Teluk Jakarta.



Gambar 18. Hubungan Al dengan logam lain dalam sedimen



Gambar 19. Faktor pengayaan logam dalam sedimen

4.6. Fraksi geokimia logam berat

Pada Gambar 20 dapat dilihat prosentase dari total konsentrasi logam berat Pb, Cd, Cu, Cr, Zn dan Ni dari definisi operasional fraksi geokimia yang mengindikasikan hasil yang berbeda tiap logam dalam bentuk partisi pada mineral (tabel perhitungan pada Lampiran 7).

Prosentasi Pb yang berikatan pada definisi operasional fraksi geokimia ikatan amorf oksida merupakan porsi yang mendominasi sekitar 81,79-97,52 % dari total konsentrasi, dan hanya sedikit porsi yang berikatan dengan fraksi lain, ikatan organik sekitar 0-11,05% dan exchangeable 0,74-10,16% sedangkan ikatan carbonates, residu dan crystalin dibawah 5%. Ini mungkin karena berhubungan dengan kandungan Fe-Mn oksida di sedimen, hal ini

diketahui bahwa Pb dapat berbentuk kompleks stabil dengan Fe-Mn oksida (Ramos *et al.*, 1994 dalam Jingchun 2006).

Prosentasi Cd yang telah diekstraksi pada tiap tahap dari exchangeable hingga residu : 10,12-28,88%, 12,86-38,97%, 0-10,78%, 32,10-61,77%, 0%, 0-11,29% dari total Cd.

Porsi terbesar Cu berasosiasi dengan ikatan amorf oksida sekitar 31,79-64,54%, ikatan Cu dengan organik yang juga penting dengan kisaran 17,8-49,78% dari total Cu. Kemudian diikuti oleh ikatan dengan crystal oksida-carbonates-residu dan exchangeable. Jumlah Cu yang berikatan dengan organik merupakan bentuk kompleks stabil yang tinggi (Li *et al.*, 2001 dalam Jingchun 2006).

Prosentasi Cr yang telah diekstraksi pada tiap tahap dari exchangeable hingga residu : 1,63-36,75%, 1,75-10,91%, 12,45-46,43%, 11,33-39,67%, 7,57-17,65%, 0,53-9,52% dari total Cr.

Distribusi Zn, dengan porsi yang besar pada ikatan amorf oksida kemudian dengan ikatan organik diikuti oleh ikatan carbonates-residu-crystalline-exchangeable dan distribusi Ni, dengan porsi yang besar pada ikatan organik kemudian ikatan amorf oksida -residu- crystalline-carbonates-exchangeable.

Pada penelitian ini sejumlah besar dari proporsi logam dalam sedimen berasosiasi dengan amorf dan kristalin oksida. Hal ini sama dengan penelitian dari Cina Selatan (Chen *et al.*, 2000; Li *et al.*, 2001 dalam Jingchun *et al.*, 2006) dimana proporsi logam terbesar terdapat dalam fraksi Fe-Mn

oksida. Fraksi amorf dan kristalin merupakan fraksi Fe-Mn oksida, kemungkinan sebagian logam berat diambil dengan sangat baik oleh Fe-Mn oksida.

Banyak penelitian yang menyatakan konsentrasi logam pada fraksi residu relatif lebih rendah dibandingkan dengan Fe-Mn oksida (Chen *et al.*, 2000; Li *et al.*, 2001 dalam Jingchun *et al.*, 2006).

Fraksi "exchangeable"

Pada beberapa penelitian, fraksi *exchangeable* menunjukkan bahwa sedimen memperlihatkan penyerapan logam-logam seperti pada perubahan pada komposisi ionik di air (misal perairan estuari) yang mempengaruhi proses sorpsi-desorpsi (Tessier *et al.*, 1979). Penggunaan reagent $MgCl_2$ berfungsi untuk melepaskan logam-logam pada fraksi *exchangeable*. Reagen 1 M $MgCl_2$ mengekstrak logam-logam yang terserap melalui bagian terluar partikel pada sedimen serta logam yang terserap lemah melalui adsorpsi spesifik dan reaksi pengendapan (Tessier *et al.*, 1979).

Pada Gambar 21 logam yang ditunjukkan dalam bentuk "exchangeable" dimana jumlah Pb (0.74-10.16%), Cd (10.12-28.88%), Cu (0.3-1.17%), Cr (1.63-36.75%), Zn (0.02-12.33%) dan Ni (0-5.57%). Hasil merefleksikan urutan logam yang berasosiasi dengan fase "exchangeable" adalah sebagai berikut ; Cd>Cr>Pb>Ni>Zn>Cu.

Dalam hubungannya dengan konsentrasi total logam, hasil yang bervariasi dari sedimen mengindikasikan bahwa fraksi ini merupakan fraksi yang keberadaan logam secara biologi yang paling banyak, dan ini umumnya

komponen minor dimana beberapa penelitian tidak dilaporkan dikarenakan konsentrasinya yang sangat kecil, namun porsi yang signifikan dari total cadmium (Tessier *et al.*, 1980 *dalam* Campbell *et al.*, 1988), dan Pb (Viel *et al.*, 1983 *dalam* Campbell *et al.*, 1988) juga dilaporkan dalam fraksi ini dan beberapa penelitian baru baru ini (Jingchun, 2006)

Fraksi "carbonate"

Pada beberapa penelitian menunjukkan signifikansi konsentrasi logam-logam dapat berasosiasi dengan karbonat pada sedimen dimana pada fraksi ini akan mudah mengubah pH. Penggunaan reagen NaOAc dengan asam asetat berfungsi untuk melepaskan logam-logam yang berikatan dengan fraksi karbonat (misal mineral karbonat) pada sedimen. Logam-logam yang diperoleh dari fraksi karbonat, baik berikatan dengan karbonat maupun tidak, bukan merupakan ikatan yang kuat dengan sedimen. Logam yang berhubungan fraksi ini mungkin akan lepas ke air poros sedimen jika lingkungan dalam kondisi asam ($\text{pH} < 5$).

Pada Gambar 21 logam ditunjukkan dalam bentuk "carbonat" dimana jumlah Pb (0-4.28%), Cd (12.86-38.97%), Cu (0.96-9.12%), Cr (1.75-10.91%), Zn (1.41-29.08%) dan Ni (0.91-17.63%). Hasil merefleksikan urutan logam yang berasosiasi dengan fase "carbonat" adalah sebagai berikut ;
 $\text{Cd} > \text{Zn} > \text{Cr} > \text{Ni} > \text{Cu} > \text{Pb}$

Hasil dari Filipek & Owen (1979) (*dalam* Campbell *et al.*, 1988) menyatakan bahwa karbonat kadang-kadang merupakan tempat pengendapan (*sink*) untuk Cd, Cu, Pb, dan Zn. Fakta dari beberapa analisa

sedimen yang kaya karbonat pada lingkungan sedimen laut (Forstner & Stoffner 1981 *dalam* Campbell *et al.*, 1988) menyatakan bahwa, meskipun karbonat mengandung konsentrasi logam yang berarti, ini umumnya lebih rendah dari fraksi noncarbonates.

Turner & Olsen (2000) *dalam* Burton *et al.*, 2005 mendefinisikan bioavailabilitas berdasarkan kemampuan mengekstrak pepsin, yang mengindikasikan ekstraksi oleh cairan pencernaan pada lambung biota.

Logam yang diekstraksi dengan 1 M NaOAc yang dipH kan hingga 5 dengan asam asetat mungkin tersedia keberadaannya secara biologi (bioavailable) bagi organisme bentik (Tessier, 1987 *dalam* Campbell *et al.*, 1988)

Fraksi "amorphous oxides dan crystalline oxide"

Mineral oksihidroksida (oksida), bersama-sama dengan bahan organik, telah diketahui sejak lama sebagai penyerap logam yang dominan pada sistem akuatik. Dibandingkan dengan mineral karbonat, mineral oksida amorf relatif mempunyai area permukaan yang luas (Forstner & Wittman, 1979 *dalam* Burton *et al.*, 2005).

Hasil dari fraksi geokimia dari penelitian ini konsisten dengan afinitas yang tinggi logam berat pada mineral oksida amorf. Asosiasi dengan mineral oksida amorf (didefinisikan oleh ekstraksi dengan 0.25 M $\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}$, in 0.25 M HCl [pH 2] selama 30 menit pada suhu 50°C).

Pada Gambar 21 ditunjukkan dalam bentuk "amorf oxide" jumlah Pb (0-81.79%), Cd (0-10.78%), Cu (31.79-64.54%), Cr (12.45-46.36%), Zn (37.72-

69.55%) dan Ni (13.94-45.97%). Hasil merefleksikan urutan logam yang berasosiasi dengan fase "amorf oxide" adalah sebagai berikut ;
Pb>Zn>Cu>Cr>Ni>Cd.

Berbeda dengan mineral amorf, pada Gambar 21. logam ditunjukkan dalam bentuk "Crystallin oxide" jumlah Pb (0%), Cd (32.10-61.77%), Cu (2.01-15.3%), Cr (11.33-39.67%), Zn (0.05-5.57%) dan Ni (1.99-28.03%).

Hasil merefleksikan urutan logam yang berasosiasi dengan fase "Crystallin oxide" adalah sebagai berikut ; Cd>Cr>Ni>Zn>Cu>Pb. Hal ini kemungkinan menggambarkan lebih banyak area permukaan mineral amorf dibandingkan material crystalline (Kampf *et al.*, 2000 *dalam* Burton *et al.*, 2005).

Fraksi "organic"

Logam-logam kemungkinan dapat berikatan dengan bahan organik dalam bermacam bentuk seperti pada organisme hidup, detritus, lapisan pada partikel mineral. Dibawah kondisi oksidasi pada perairan alami, bahan organik dapat terdegradasi sehingga melepaskan logam-logam yang berikatan dengan bahan organik. Fraksi yang dapat diekstraksi dengan H₂O₂ diasumsikan untuk merefleksikan ikatan yang kuat logam berat pada bahan organik dalam sedimen.

Pada Gambar 21 logam ditunjukkan dalam bentuk "organic" dimana jumlah Pb (0.-94.84%), Cd (0%), Cu (17.08-52.77%), Cr (7.57-17.65%), Zn (11.68-47.67%) dan Ni (17.39-50.62%). Hasil merefleksikan urutan logam

yang berasosiasi dengan fase "organic" adalah sebagai berikut ;

Ni>Cu>Zn>Cr>Pb>Cd.

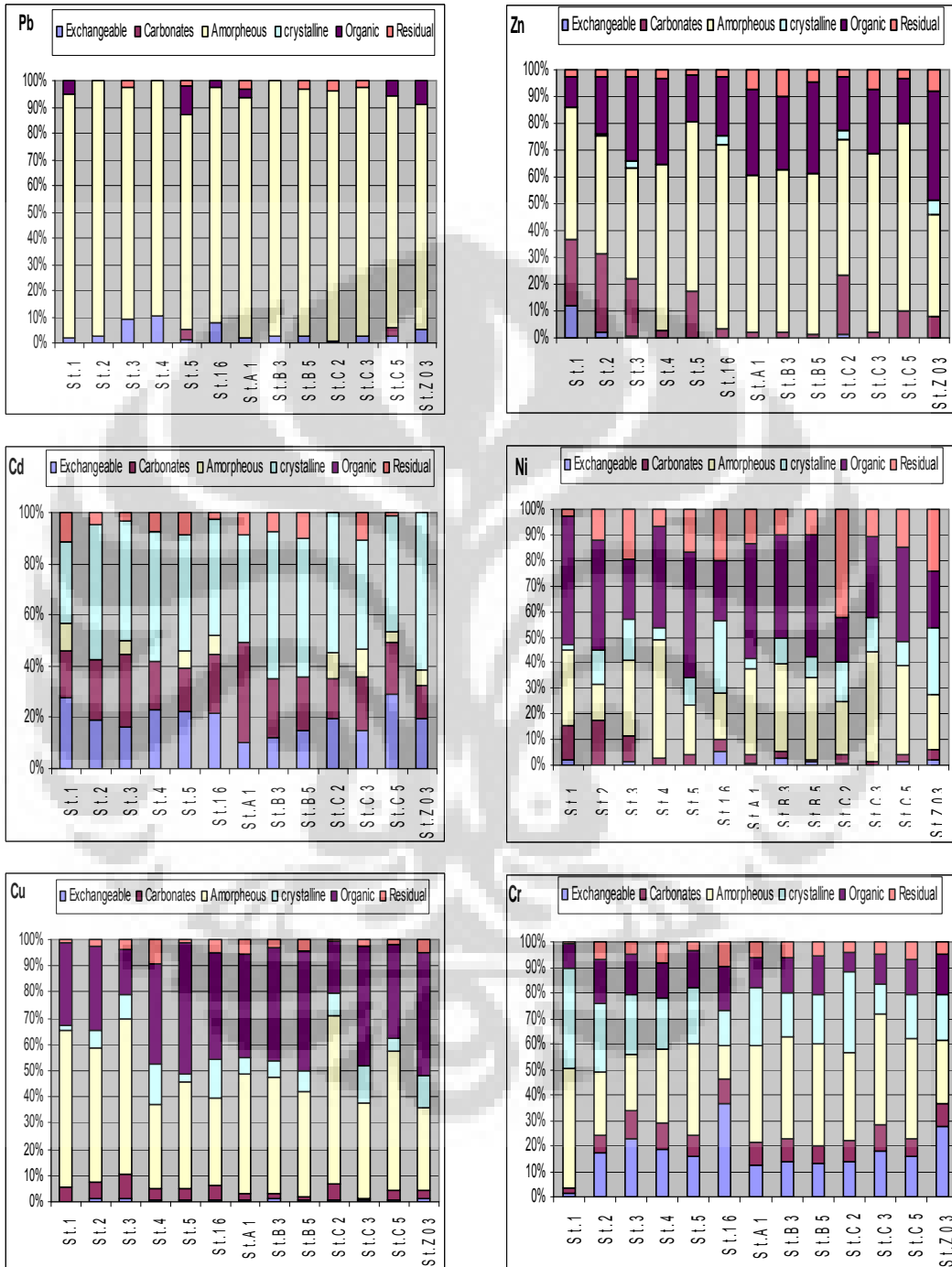
Hasil dari beberapa penelitian (Campbell *et al.*, 1988) mengindikasikan bahwa bahan organik merupakan tempat timbunan 5-20% atau lebih kandungan total logam dari sedimen terigenus. Bahan organik yang berasal dari antropogenik ke sedimen termasuk limbah lumpur. Ini dapat menyebabkan kandungan logam menjadi sangat tinggi.

Fraksi "residual"

Fraksi residual mencerminkan logam yang terikat dalam stuktur kristal dari *mineral recalcitrant*. Fraksi ini tidak tersedia untuk proses biologi maupun diagenesis kecuali lebih dari skala waktu yang sangat lama (Tessier *et al.*, 1979). Ini meyakinkan bahwa fraksi ini sangat penting untuk sedimen yang tidak terkontaminasi. Pada Gambar 21 logam ditunjukkan dalam bentuk "residu" dimana jumlah Pb (0.-3.79%), Cd (0-11.29%), Cu (0.7-9.05%), Cr (0.53-9.52%), Zn (1.74-10.01%) dan Ni (2.58-42.2%). Hasil merefleksikan urutan logam yang berasosiasi dengan fase "residual" adalah sebagai berikut ; Ni>Cr>Cd>Zn>Cu>Pb.

Pada keadaan tidak terkontaminasi fraksi residual umumnya fase geokimia yang sangat penting untuk retensi logam.

Asosiasi antara logam berat dan fraksi residu tanah yang tidak terkontaminasi sangat kuat dimana asosiasi logam dengan fraksi non residual telah digunakan sebagai indikator dari pengayaan antropogenik (Arakel & Hongjun, 1992 *dalam* Burton *et al.*, 2005).



Gambar 20. Prosentasi logam dengan definisi operasional fraksi geokimia dalam sedimen

Secara keseluruhan tahapan fraksi geokimia secara individual adalah sebagai berikut:

Pb: amorf oxide>organic>exchangeable>carbonat>residu>cryst oxide

Cd; cryst oxide>carbonat>exchangeable>residu>amorf oxide>organic

Cu: amorf oxide>organic>cryst oxide>carbonat>residu>exchangeable

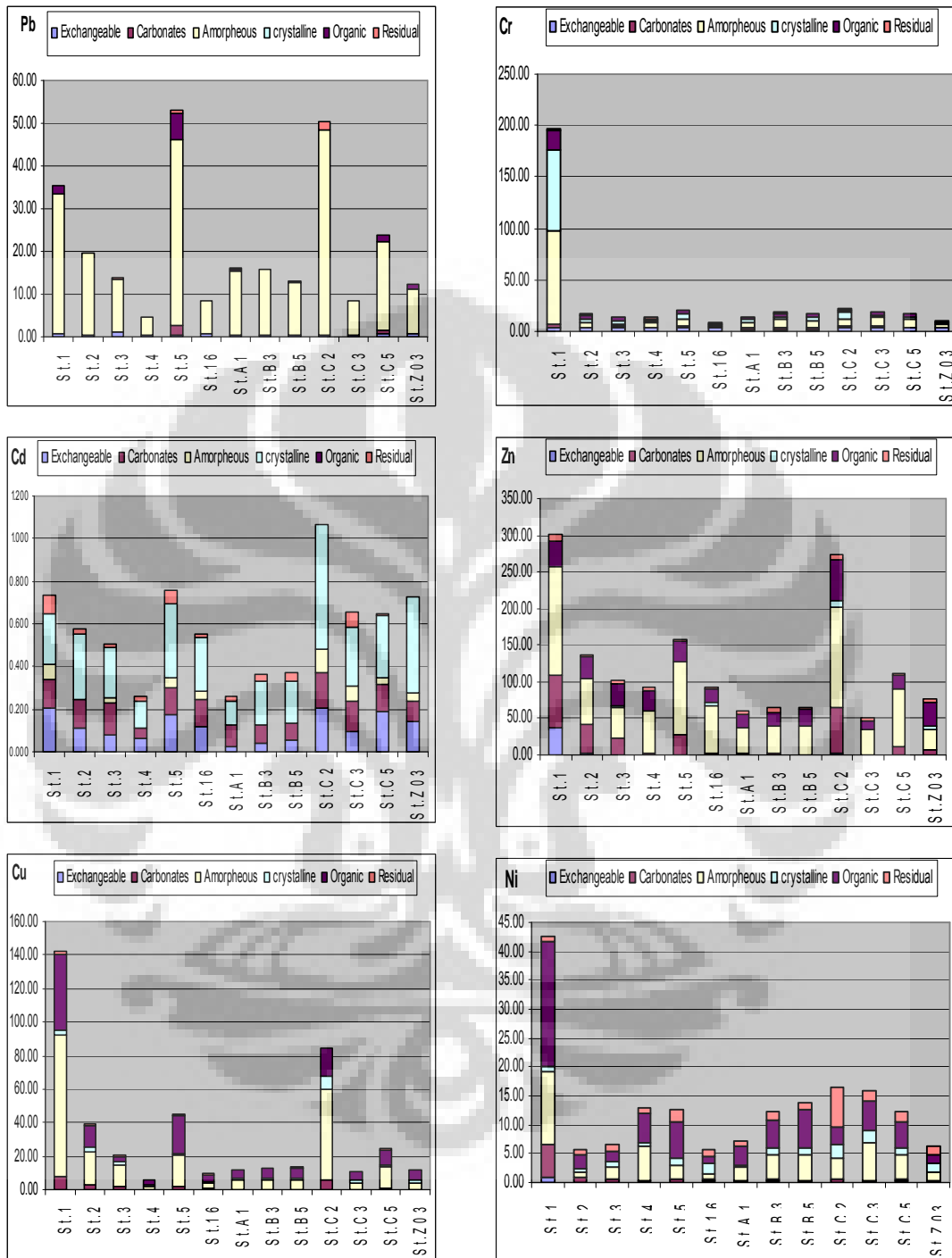
Cr: amorf oxide>cryst oxide>exchangeable>organic>carbonat>residu

Zn: amorf oxide>organic>carbonat>residu>cryst oxide>exchangeable

Ni: organic>amorf oxide>residu>cryst oxide>carbonat>exchangeable

Hubungan logam-logam ini dengan fraksi-fraksi yang didefinisi operasional sebagai fraksi, exchangeable, carbonat, amorf oksida, kristalin oksida, organic dan residu tergantung pada kelimpahan konsentrasi fase geokimia dalam sedimen.

Berdasarkan jumlah konsentrasi yang dapat dilihat dari fraksi non residual (Exchangeable, carbonates, amorf dan crystallin oksida, dan organic) logam Pb, Cd, Cr, Cu, Zn dan Ni, dimana jumlah tiap unsur logam berasosiasi tinggi dibandingkan dengan fraksi residual. Hal ini dapat merepresentasikan proporsi logam berat yang dapat dengan mudah teremobilisasi oleh perubahan dalam kondisi lingkungan serta sebagian besar sedimen berasal dari aktivitas daratan (antropogenik).



Gambar 21. Konsentrasi logam (mg/kg) dalam definisi operasional fraksi geokimia dalam sedimen

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Dari hasil analisis diketahui sebagian besar distribusi logam-logam yang diukur dipengaruhi oleh ukuran partikel < 63 μm sebagai pembawa. Deposisi sebagian besar logam-logam yang diukur berada pada daerah Muara Kamal dan di daerah pelabuhan.

Hasil analisis rata-rata konsentrasi beberapa logam berat di sampel sedimen yang diambil dari Teluk Jakarta bila dibandingkan dengan panduan mutu ANZECC/ARMCANZ (2000) berada dibawah panduan mutu namun pada beberapa lokasi tertentu terdapat konsentrasi yang lebih tinggi dari batas bawah Cr, Cu dan Ni, bahkan Zn melebihi batas atas, sedangkan Pb mendekati batas bawah. Namun bila dibandingkan dengan panduan mutu dari CCME (2001), konsentrasi Cu dan Zn telah melewati panduan mutu ISQG, namun pada beberapa lokasi tertentu terdapat konsentrasi yang lebih tinggi dari ISQG yaitu Cr, Cu, Zn, Pb dan juga lebih tinggi dari panduan mutu PEL yaitu logam Cu, Cr dan Zn. Berdasarkan perbandingan dengan pedoman kualitas sedimen tersebut, Cu, Cr dan Zn dapat beresiko bagi kualitas lingkungan disekitar sistem akuatik.

Indeks geoakumulasi mengindikasikan bahwa sampel sedimen yang diambil di Teluk Jakarta didapat ada beberapa stasiun yang telah terpolusi sedang logam Zn, namun pada beberapa sampel sedimen yang diambil tidak

menunjukkan terpolusi oleh logam-logam yang lain, demikian juga dengan faktor pengayaan.

Berdasarkan jumlah konsentrasi tiap unsur logam yang dapat dilihat dari fraksi non residual (Exchangeable, carbonates, amorf dan crystallin oksida, dan organic) logam Pb, Cd, Cr, Cu, Zn dan Ni, lebih tinggi dibandingkan dengan fraksi residual. Hal ini dapat merepresentasikan proporsi logam berat yang dapat dengan mudah teremobilisasi oleh perubahan kondisi di lingkungan serta sebagian besar sedimen berasal dari aktivitas daratan (antropogenik).

5.2. Saran

Harus dikaji lebih lanjut mengenai *Igeo* dan faktor pengayaan untuk dilakukan perhitungan dengan menggunakan *background value* dari daerah yang sama atau mendekati sama melihat hasil yang didapat kurang memberikan hasil yang memuaskan.

Penentuan konsentrasi logam berat sebaiknya berdasarkan ukuran partikel halus yang berukuran < 63 μm untuk keseragaman pengukuran sehingga dapat diamati secara lebih jelas.

Untuk penelitian geokimia selain mengetahui konsentrasi logam berat secara fraksi juga harus di ketahui parameter parameter lain yang dapat berpengaruh terhadap keberadaan logam berat dalam sedimen yang berpengaruh terhadap biota. Sehingga didapat data yang lebih mendukung penelitian geokimia sedimen.

UCAPAN TERIMA KASIH

Dengan memanjatkan puji syukur kehadiran Tuhan Yang Maha Esa, dengan telah diselesaikannya tesis ini. Tesis ini berjudul : **Distribusi dan partisi geokimia logam berat dalam sedimen di Teluk Jakarta.**

Penelitian ini sebagai salah satu syarat untuk mendapatkan gelar Magister Sains pada Program Pascasarjana Ilmu Kelautan, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Indonesia. Dengan selesainya tesis ini, penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada semua pihak, yang telah berpartisipasi dan membantu atas selesainya tesis ini, kepada :

1. Bapak Dr. rer. nat. Budiawan dan Bapak Dr. Zainal Arifin sebagai pembimbing atas bimbingan dan bantuannya selama penelitian dan penyusunan tesis ini.
2. Bapak Prof. Dr. Suharsono, APU, Kepala Pusat Penelitian Oseanografi LIPI, Ibu Ir. Endang Rochyatun, Kepala Kelompok Penelitian Kimia Anorganik Logam Berat, serta Bapak Abdul Rozak Amd dan Bapak Taufik Kaissupy staff teknisi yang senantiasa membantu.
3. Bapak Dr. A. Harsono Soepardjo, M.Eng. selaku ketua Program Studi Ilmu Kelautan, Drs. Sundowo Harminto, MSc serta para dosen dan seluruh staf dari Program Studi Magister Ilmu Kelautan FMIPA-UI atas segala perhatian dan bimbingannya kepada kami.

4. Bapak Dr Ridla Bakri dan Dr. rer.nat. Abdul Harris selaku penguji, yang bersedia untuk menguji tesis ini.
5. Suamiku Irfan Kampono S.T dan Anandaku tercinta Alisha Rafa Kampono serta calon bayi yang masih dalam kandunganku atas pengertian dan dorongan moril selama ini.
6. Ibunda Hj.Pairah, yu Cici, kakak-kakak, adik-adik, Dita dan Rizky atas doa, bantuan dan kasih sayangnya.
7. Seluruh teman-teman di P2O LIPI dan Program Studi Magister Ilmu Kelautan FMIPA-UI atas bantuan dan kerjasamanya selama ini.

Akhirnya, tesis ini yang masih jauh dari sempurna, untuk itu saran dan perbaikan dengan senang hati kami nantikan, terimakasih.

Depok, Juni 2008

Penulis

DAFTAR ACUAN

- Aloupi, M & Angelidis, M.O. 2001. *Geochemistry of natural and anthropogenic metals in the coastal sediments of the island of Levos, Aegean Sea*. Environmental. Pollution 113:211-219.
- Arifin.Z & Mufidah.F. 2006. *Trace metals Accumulation by Green Mussel (Perna Viridis, L) Cultured in a Highly Polluted Area on Jakarta Bay, Indonesia*. International Conference Hubs, Harbours and Deltas in Southeast Asia: Multidisciplinary and Intercultural perspectives Royal Academy of Overseas Sciences Phnom Penh 6-8 Feb, pp525-536
- Budiawan. 2007. *Laporan Studi Kajian Baku Mutu Sedimen Dasar Laut*, Pusat Kajian Risiko dan keselamatan Lingkungan FMIPA UI kerjasama dengan Kementrian Negara Lingkungan Hidup.
- Bryan, G. W. & Langston. W. J. 1992. *Bioavailability, accumulation and effect of heavy metals in sediments with special reference to United Kingdom estuaries: a review*. Environ. Pollut. 31: 89-131.
- Burton, E. D., Phillips, I. R & Hawker, D. W. 2004. *Trace metal distribution and enrichment in benthic, estuarine sediments: Southport Broadwater, Australia*. Mar.Pollut.Bull 48: 378-402.
- Burton, E.D., Phillips, I. R & Hawker, D.W. 2005. *Geochemical Partitioning of Copper, Lead and Zinc in Benthic, Estuarine Sediment Profiles*. Journal of Environmental Quality 34:263-274.

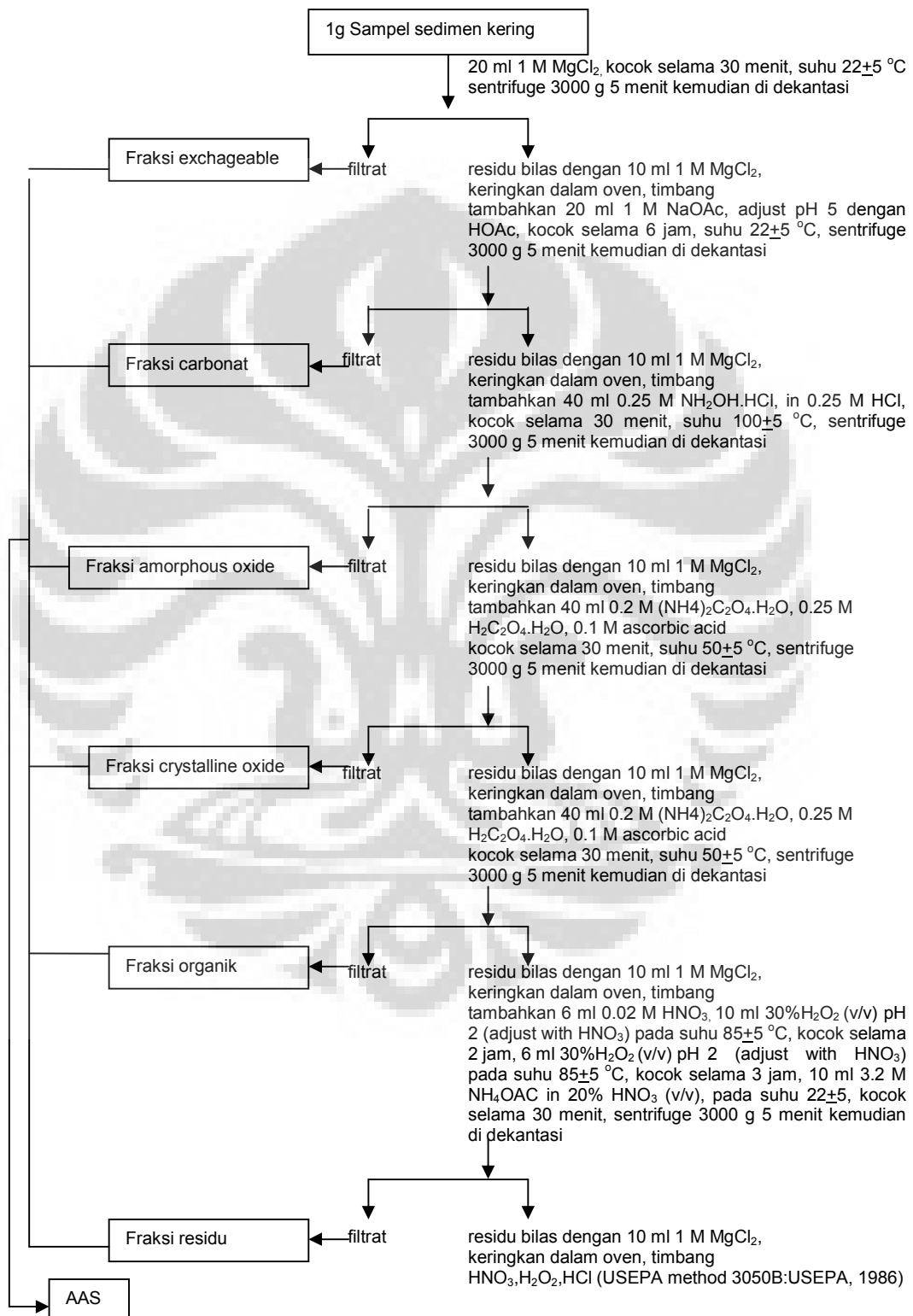
- Campbell P.G.C, Lewis A.G, Chapman P.M, Crowder A.A, Fletcher W.K.,
Imber B., Luoma S.N, Stokes P.M., and Winfrey M. 1988. *Biologically available metals in sediments*, National Research council of Canada, Publication No. NRCC 27694
- CCME (Canadian council of minister of the environment) 2001. *Canadian environmental quality guidelines*. Winnipeg. Mar. Canada
- Chester, R. 1990. *Marine Geochemistry*, London:Unwin Hyman Ltd
- Comber, S.D.W., Gardner, M.J., Gunn., A.M., & Whalley, C. 1996. *Kinetics of trace metals sorption to estuarine suspended particulate matter*. Chemosphere 33: 1027-1040.
- Connel D.W. & J.M. Miller. 1995. *Kimia dan Ekotoksikologi pencemaran*; penerjemah Yanti Koestoer, penerbit Universitas Indonesia
- Dahuri, R. 2002. *Membangun Kembali Perekonomian Indonesia melalui Sektor Perikanan dan Kelautan*. LISPI. Jakarta
- Danielsson, A. 2000. Spatial scales for metals and nutrient concentrations in sediments. *Environmetrics* 11: 523-539.
- Henny, C.J., Blus, L.J., Hoffman. D.J. & Grove. R.A. 1994. *Lead in hawks, falcons and owls downstream from mining site on the Coeur d'Alene River, Idaho*. *Environ. Monit. Assess.* 29:267-288.
- Hutagalung, H.P. 1991. Status Pencemaran Laut di Indonesia dan Teknik Pemantauannya. Pusat Penelitian dan Pengembangan Oseanologi Lembaga Ilmu pengetahuan Indonesia, Jakarta : 45 -59.

- Ingersoll, C. G., Brumbaugh, W. G., Dwyer, F.J. & Kemble, W.E. 1994.
Biaccumulation of metals from sediment by benthic invertebrates.
Environ. Toxicol. Chem. 13: 2013-2020.
- Jingchun L., Chongling Y., Macnair M.R., Jun H., & Yuhong L. 2006.
*Distribution and speciation of some metals in mangrove sediments
from Jiulong River Estuary, People's Republic of China.* Bull.
Environ. Contam. Toxicol 76: 815-822
- Loska K. Wiechula D., Barska B., Cebula E., & Chojnecka A. 2003
*Assessment of Arsenic Enrichment of Cultivated Soils in Southern
Poland* Polish Journal of Environmental Studies Vol. 12, No. 2 (2003),
187-192
- Loring, D.H. & Rantala, R.T.T. 1992 *Manual for the geochemical analyses of
marine sediments and suspended particulate matter.* Earth Science
Reviews 32:235-283.
- Ongkosongo, O.S.R, Subardi, Sumiati, Effendi, L. Subwardi, A. & Hamidjojo, P.
1980. *Sedimen dasar Teluk Jakarta.* hal 395-407 dalam Nontji, A. &
Djamali, A. *Teluk Jakarta ; pengkajian fisika, kimia, biologi dan geologi
tahun 1975-1979.* (LIPI : Jakarta).
- Rubio, B, Nombela, M.A. & Vilas, F. 2000. *Geochemistry of major and trace
elements in sediments of the Ria de Vigo (NW Spain): an assessment
of metal pollution.* Marine Pollution Bulletin 40:968-980.

- Sanusi H.S. 2006. *Kimia Laut : Proses Fisik Kimia dan Interaksinya dengan Lingkungan*. Departemen Ilmu dan Teknologi Kelautan Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, IPB, Bogor.
- Subramanian V. & Mohanachandran G. 1990. *Heavy metals distribution and enrichment in the sea sediments of southern east coast of India*. Mar.Pollut. Bull, Vol 21 No 7 pp 324-330.
- Tessier, A., Campbell, P.G.C. & Bisson, M. 1979. *Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals*. Anal.Chem.51:844-850.
- Tessier, A. & Campbell, P.G.C. 1987., *Partitioning of trace metals in sediments, relationship with bioavailability*. Hydrobiologia 149: 43-52.
- USEPA, 1986. *Acid digestion of sediment, sludge and soils In : Test methods for evaluating solid waste (SW-846)* US Government Printing Office.Washington DC.
- USEPA, 1997. *The incidence and severity of sediment contamination in surface waters of the United States. Volume 1: National sediment quality survey*. EPA 823-R-97-006. US Government Printing Office.Washington DC.
- William, T.M., Rees, J.G & Setiapermana, D. 1997. *Land derived contaminant influx to Jakarta Bay, Indonesia Vol 1: Geochemistry of marine water and sediment*, BGS Overseas Geology Series Technical Report W C/97/17. British Geological Survey. Nottingham. UK.

Lampiran 1.

Skema analisis logam berat dalam definisi operasional fraksi geokimia sedimen



Lampiran 2.

Persamaan regresi linier dari kurva kalibrasi analisis total logam berat untuk masing-masing logam

Pb	$Y = 0,039X - 0,0005$	$r^2 = 0,9998$
Cd	$Y = 0,314X + 0,002$	$r^2 = 0,9990$
Cu	$Y = 0,113X + 0,01$	$r^2 = 0,9992$
Cr	$Y = 0,05X + 0,013$	$r^2 = 0,9987$
Ni	$Y = 0,08X - 0,008$	$r^2 = 0,9988$
Zn	$Y = 0,387X + 0,02$	$r^2 = 0,9949$

Persamaan regresi linier dari kurva kalibrasi analisis logam berat dalam fraksi *exchangeable* untuk masing-masing logam

Pb	$Y = 0,046X + 0,002$	$r^2 = 0,9994$
Cd	$Y = 0,375X + 0,001$	$r^2 = 0,9986$
Cu	$Y = 0,11X + 0,001$	$r^2 = 0,9998$
Cr	$Y = 0,05X - 0,002$	$r^2 = 0,9998$
Ni	$Y = 0,07X - 0,003$	$r^2 = 0,9995$
Zn	$Y = 0,39X + 0,017$	$r^2 = 0,9967$

Persamaan regresi linier dari kurva kalibrasi analisis logam berat dalam fraksi *carbonat* untuk masing-masing logam

Pb	$Y = 0,03X - 0,001$	$r^2 = 0,9998$
Cd	$Y = 0,36X + 0,0004$	$r^2 = 0,9998$
Cu	$Y = 0,11X + 0,002$	$r^2 = 0,9998$
Cr	$Y = 0,06X + 0,004$	$r^2 = 0,9999$
Ni	$Y = 0,07X + 0,009$	$r^2 = 0,9976$
Zn	$Y = 0,379X + 0,017$	$r^2 = 0,9971$

Lanjutan lampiran 2

Persamaan regressi linier dari kurva kalibrasi analisis logam berat dalam fraksi *amorphous oxida* untuk masing-masing logam

Pb	$Y = 0,04X + 0,004$	$r^2 = 0,9982$
Cd	$Y = 0,379X + 0,0001$	$r^2 = 0,9999$
Cu	$Y = 0,11X + 0,011$	$r^2 = 0,9993$
Cr	$Y = 0,059X + 0,008$	$r^2 = 0,9989$
Ni	$Y = 0,07X + 0,009$	$r^2 = 0,9986$
Zn	$Y = 0,3787X + 0,02$	$r^2 = 0,9949$

Persamaan regressi linier dari kurva kalibrasi analisis logam berat dalam fraksi *crystallin oksida* untuk masing-masing logam

Pb	$Y = 0,039X - 0,002$	$r^2 = 0,9998$
Cd	$Y = 0,394X + 0,0001$	$r^2 = 0,9999$
Cu	$Y = 0,107X + 0,009$	$r^2 = 0,9996$
Cr	$Y = 0,058X + 0,01$	$r^2 = 0,9984$
Ni	$Y = 0,07X + 0,009$	$r^2 = 0,9988$
Zn	$Y = 0,371X + 0,018$	$r^2 = 0,9962$

Persamaan regressi linier dari kurva kalibrasi analisis logam berat dalam fraksi *organic* untuk masing-masing logam

Pb	$Y = 0,037X + 0,0017$	$r^2 = 0,9997$
Cd	$Y = 0,338X + 0,0002$	$r^2 = 0,9997$
Cu	$Y = 0,11X + 0,011$	$r^2 = 0,9994$
Cr	$Y = 0,056X + 0,009$	$r^2 = 0,9993$
Ni	$Y = 0,072X + 0,012$	$r^2 = 0,9979$
Zn	$Y = 0,391X + 0,02$	$r^2 = 0,9957$

Lanjutan lampiran 2

Persamaan regresi linier dari kurva kalibrasi analisis logam berat dalam fraksi *residu* untuk masing-masing logam

Pb	$Y = 0,039X + 0,0034$	$r^2 = 0,9992$
Cd	$Y = 0,342X + 0,0035$	$r^2 = 0,9987$
Cu	$Y = 0,104X + 0,01$	$r^2 = 0,9994$
Cr	$Y = 0,054X + 0,012$	$r^2 = 0,9986$
Ni	$Y = 0,076X + 0,007$	$r^2 = 0,9986$
Zn	$Y = 0,391X + 0,023$	$r^2 = 0,9946$

Lampiran 3.

Tabel prosentase ukuran partikel pada sedimen di Teluk Jakarta, Agustus 2007

Jenis Sedimen (Ukuran Butir (mm))	ST. 1	ST. 2	ST. 3	ST. 4	ST. 5	ST. 6	ST. 16
Pasir (1-2)	0	0.96	1.07	0.23	0	0	0.09
Pasir (0,5 - 1)	0.49	2.72	14.55	1.66	0.64	0.89	1.30
Pasir (0,25 - 0,5)	1.72	5.61	14.59	4.13	0.90	1.54	3.75
Pasir (0,125 - 0,25)	3.60	28.82	16.35	72.75	0.77	12.06	36.47
Pasir (0,063 - 0,125)	3.88	19.90	16.46	11.69	0.95	19.46	30.11
lumpur/mud (<0,004 - 0,063)	90.32	41.99	36.98	9.54	96.74	66.05	28.28
Jumlah	100	100	100	100	100	100	100

Jenis Sedimen (Ukuran Butir (mm))	ST. A1	ST. B3	ST. B5	ST. C2	ST. C3	ST. C5	ST. Z03
Pasir (1-2)		0	0	0	0		0
Pasir (0,5 - 1)	1.39	0.71	0.29	0.07	0.57	0.89	2.42
Pasir (0,25 - 0,5)	0.28	0.36	0.22	0.11	0.51	1.23	6.72
Pasir (0,125 - 0,25)	1.12	0.83	0.49	0.44	1.77	1.65	10.71
Pasir (0,063 - 0,125)	7.81	2.30	0.53	1.14	3.43	2.72	45.88
lumpur/mud (<0,004 - 0,063)	89.40	95.80	98.47	98.23	93.73	93.50	34.27
Jumlah	100	100	100	100	100	100	100

Lampiran 4.

Tabel prosentase *loss on ignition* (% LOI) dan prosentase lumpur (% lumpur) pada sedimen di Teluk Jakarta, Agustus 2007

No stasiun	% loss on Ignation	% Lumpur
St.1	9.18	90.32
St.2	9.20	41.99
St.3	12.45	36.98
St.4	3.66	9.54
St.5	13.27	96.74
St.6	6.86	66.05
St.16	4.99	28.28
St.A1	11.57	89.40
St.B3	8.74	95.80
St.B5	11.89	98.47
St.C2	13.40	98.23
St.C3	12.25	93.73
St.C5	6.99	93.50
St.Z03	4.79	34.27
Rata-rata	9.23	69.52
Median	9.19	89.86
Minimum	3.66	9.54
Maksimum	13.40	98.47
Standar deviasi	3.34	32.17

Lampiran 5

Tabel hasil perhitungan Indeks geoakumulasi

No.Sta,	Cd	Cr	Cu	Mn	Ni	Pb	Zn
St.1	-1.5	0.0	0.8	0.2	-1.4	-1.0	2.6
St.2	-2.9	-2.9	-0.8	-0.8	-4.1	-1.5	0.4
St.3	-2.6	-3.2	-1.2	-0.9	-5.0	-1.8	-0.3
St.4	-5.3	-2.9	-3.1	0.4	-3.1	-2.5	-0.5
St.5	-2.0	-2.5	-0.8	0.3	-3.3	0.6	0.3
St.6	-2.6	-2.7	-1.4	0.2	-3.1	-1.7	-0.2
St.16	-2.6	-4.0	-2.4	-0.9	-6.1	-2.7	-1.4
St.A1	-3.8	-3.0	-2.2	-0.4	-3.6	-1.7	-0.9
St.B3	-3.6	-2.5	-2.3	-0.6	-2.9	-2.1	-0.8
St.B5	-3.2	-2.6	-2.4	-0.6	-2.9	-1.9	-0.9
St.C2	-2.9	-2.9	-0.8	-0.8	-4.1	-1.5	0.4
St.C3	-3.0	-2.6	-2.7	-0.9	-3.0	-2.0	-1.0
St.C5	-1.6	-2.7	-1.4	-0.2	-3.0	-1.4	-0.2
St.Z03	-2.2	-3.5	-2.2	-0.1	-5.4	-2.4	-1.0

Kelas	Cd	Cr	Cu	Mn	Ni	Pb	Zn
0 unpolluted	14	14	13	10	14	13	10
1 unpolluted to moderately polluted			1	4		1	3
2 moderately polluted							1
3 moderately to strongly polluted							
4 strongly polluted							
5 strongly to very strongly polluted							
6 very strongly polluted							
Jumlah sampel	14	14	14	14	14	14	14

Kelas	Cd	Cr	Cu	Mn	Ni	Pb	Zn
0 unpolluted	100	100	93	71	100	93	71
1 unpolluted to moderately polluted	0	0	7	29	0	7	21
2 moderately polluted	0	0	0	0	0	0	7
3 moderately to strongly polluted	0	0	0	0	0	0	0
4 strongly polluted	0	0	0	0	0	0	0
5 strongly to very strongly polluted	0	0	0	0	0	0	0
6 very strongly polluted	0	0	0	0	0	0	0
Jumlah persen	100	100	100	100	100	100	100

Contoh perhitungan Indeks Geoakumulasi missal untuk logam Cd

Nilai konsentrasi Cd (n Cd) di Teluk Jakarta = 0,157

Nilai *Average Shale (Background Value)* Cd (Bn) = 0,3

$$I_{geo} = \log_2 (Cn)/(1.5 \times Bn)$$

$$= \log_2 (0,157)/(1.5 \times 0,3) = -1,52$$

Lampiran 6

Tabel hasil perhitungan faktor pengayaan

No.Sta,	EF Cd	EF Cr	EF Cu	EF Mn	EF Ni	EF Pb	EF Zn
St.1	0.7	2.1	3.6	2.4	0.8	1.0	12.8
St.2	0.3	0.3	1.4	1.4	0.1	0.9	3.2
St.3	0.5	0.3	1.3	1.6	0.1	0.9	2.5
St.4	0.1	0.5	0.4	4.6	0.4	0.6	2.5
St.5	0.6	0.4	1.4	3.0	0.3	3.7	3.0
St.6	0.5	0.5	1.2	3.6	0.4	1.0	2.9
St.16	0.5	0.2	0.6	1.8	0.0	0.5	1.3
St.A1	0.2	0.3	0.6	1.9	0.2	0.8	1.4
St.B3	0.2	0.4	0.5	1.7	0.3	0.6	1.4
St.B5	0.3	0.5	0.5	1.8	0.4	0.8	1.5
St.C2	0.6	0.2	1.6	0.7	0.1	0.7	3.2
St.C3	0.4	0.5	0.5	1.8	0.4	0.9	1.6
St.C5	0.8	0.4	0.9	2.2	0.3	1.0	2.1
St.Z03	0.7	0.3	0.6	2.8	0.1	0.6	1.5

Kelas	Cd	Cr	Cu	Mn	Ni	Pb	Zn
EF<2- depletion to minimal enrichment	14	13	13	8	14	13	6
EF=2-5 - moderate enrichment		1	1	6		1	7
EF=5-20 - significant enrichment							1
EF= 20-40 - very high enrichment							
EF>40 - extremely high enrichment							
Jumlah sampel	14	14	14	14	14	14	14

Kelas	Cd	Cr	Cu	Mn	Ni	Pb	Zn
EF<2- depletion to minimal enrichment	100	93	93	57	100	93	43
EF=2-5 - moderate enrichment	0	7	7	43	0	7	50
EF=5-20 - significant enrichment	0	0	0	0	0	0	7
EF= 20-40 - very high enrichment	0	0	0	0	0	0	0
EF>40 - extremely high enrichment	0	0	0	0	0	0	0
Jumlah persen	100	100	100	100	100	100	100

Contoh Perhitungan Faktor pengayaan misal untuk logam Cd

Nilai konsentrasi Cd (Cn) di Teluk Jakarta = 0,157

Nilai *Average Shale (Background Value)* Cd (Cref) = 0,3

Nilai konsentrasi Al (Bn) di Teluk Jakarta = 57674

Nilai *Average Shale (Background Value)* Al (Bref) = 8000

$$\begin{aligned}
 \text{EF} &= (\text{Cn}/\text{Cref})/(\text{Bn}/\text{Bref}) \\
 &= (0,157/0,3)/(57674/8000) \\
 &= 0,7
 \end{aligned}$$

Lampiran 7

Tabel hasil perhitungan fraksi dalam sedimen (mg/kg)

Pb mg/kg	Fraksi					
	Stasiun	Exchangeable	Carbonates	Amorpheous	crystalline	Organic
St.1	0.58	nd	32.93	nd	1.80	nd
St.2	0.49	nd	19.16	nd	nd	nd
St.3	1.22	nd	12.27	nd	nd	0.33
St.4	0.46	nd	4.10	nd	nd	nd
St.5	0.54	2.27	43.45	nd	5.87	0.99
St.16	0.64	nd	7.69	nd	0.23	0.01
St.A1	0.30	nd	14.90	nd	0.51	0.54
St.B3	0.42	nd	15.16	nd	nd	nd
St.B5	0.37	nd	12.24	nd	nd	0.45
St.C2	0.37	nd	47.94	nd	nd	1.90
St.C3	0.21	nd	8.15	nd	nd	0.22
St.C5	0.61	0.80	20.90	nd	1.35	nd
St.Z03	0.66	nd	10.33	nd	1.12	nd

Cd mg/kg	Fraksi					
	Stasiun	Exchangeable	Carbonates	Amorpheous	crystalline	Organic
St.1	0.202	0.134	0.077	0.235	nd	0.082
St.2	0.109	0.135	nd	0.305	nd	0.025
St.3	0.081	0.144	0.028	0.233	nd	0.016
St.4	0.059	0.050	nd	0.131	nd	0.019
St.5	0.171	0.129	0.047	0.347	nd	0.066
St.16	0.120	0.128	0.039	0.251	nd	0.014
St.A1	0.026	0.100	nd	0.108	nd	0.023
St.B3	0.043	0.084	nd	0.206	nd	0.026
St.B5	0.054	0.078	nd	0.200	nd	0.037
St.C2	0.209	0.164	0.105	0.584	nd	nd
St.C3	0.099	0.136	0.070	0.276	nd	0.070
St.C5	0.187	0.133	0.026	0.293	nd	0.008
St.Z03	0.144	0.094	0.041	0.450	nd	nd

nd = not deteksi

Ianjutan Lampiran 7

Cu mg/kg	Fraksi					
	Stasiun	Exchangeable	Carbonates	Amorpheous	crystalline	Organic
St.1	0.42	7.78	84.44	2.85	45.20	1.39
St.2	0.38	2.42	20.05	2.66	12.50	0.98
St.3	0.24	1.89	12.35	1.91	3.55	0.82
St.4	0.05	0.27	1.98	0.95	2.41	0.56
St.5	0.22	2.09	18.20	1.44	22.32	0.56
St.16	0.07	0.52	3.18	1.41	3.94	0.45
St.A1	0.10	0.28	5.48	0.78	4.76	0.66
St.B3	0.13	0.26	5.78	0.85	5.60	0.44
St.B5	0.12	0.15	5.36	1.03	6.08	0.59
St.C2	0.34	5.20	54.56	7.27	16.59	0.59
St.C3	0.06	0.10	3.85	1.47	4.91	0.23
St.C5	0.13	0.92	12.92	1.20	8.67	0.48
St.Z03	0.13	0.35	3.79	1.46	5.57	0.57

Cr mg/kg	Fraksi					
	Stasiun	Exchangeable	Carbonates	Amorpheous	crystalline	Organic
St.1	3.20	3.43	91.44	77.81	19.21	1.03
St.2	2.84	1.14	4.11	4.44	2.93	1.13
St.3	3.07	1.49	3.05	3.21	2.11	0.70
St.4	2.58	1.37	3.99	2.73	1.92	1.11
St.5	3.35	1.64	7.55	4.58	2.95	0.74
St.16	2.95	0.79	1.00	1.12	1.41	0.76
St.A1	1.78	1.26	5.41	3.24	1.66	0.91
St.B3	2.48	1.66	7.28	3.09	2.48	1.18
St.B5	2.37	1.25	7.12	3.56	2.62	1.05
St.C2	3.13	1.84	7.55	7.04	1.68	0.98
St.C3	3.45	1.89	8.32	2.15	2.23	0.95
St.C5	2.84	1.20	7.12	3.05	2.48	1.20
St.Z03	3.03	1.04	2.72	1.98	1.76	0.56

nd = not deteksi

lanjutan Lampiran 7

Zn mg/kg	Fraksi					
	Stasiun	Exchangeable	Carbonates	Amorpheous	crystalline	Organic
St.1	37.05	72.56	148.21	0.16	35.11	7.51
St.2	2.80	39.98	61.13	0.51	29.05	4.00
St.3	0.62	21.68	41.69	2.94	31.20	2.99
St.4	0.02	2.54	56.91	0.24	28.89	3.29
St.5	0.47	27.23	98.84	0.14	27.58	2.73
St.16	0.05	2.85	64.87	3.01	20.69	2.25
St.A1	0.06	1.15	35.84	0.13	19.38	4.43
St.B3	0.05	1.16	38.63	0.08	17.50	6.39
St.B5	0.05	0.92	39.12	0.08	21.92	3.10
St.C2	3.01	60.97	138.47	7.53	55.99	6.43
St.C3	0.02	1.09	33.63	0.07	12.01	3.82
St.C5	0.11	11.48	78.09	0.10	19.09	3.41
St.Z03	0.05	6.01	29.15	4.28	31.34	5.93

Ni mg/kg	Fraksi					
	Stasiun	Exchangeable	Carbonates	Amorpheous	crystalline	Organic
St.1	0.76	5.85	12.52	0.85	21.60	1.10
St.2	nd	0.98	0.78	0.75	2.40	0.66
St.3	0.08	0.67	1.97	1.02	1.58	1.27
St.4	nd	0.37	5.93	0.61	5.15	0.84
St.5	nd	0.47	2.48	1.39	6.15	2.11
St.16	0.31	0.26	1.03	1.58	1.33	1.14
St.A1	0.06	0.22	2.43	0.32	3.28	0.96
St.B3	0.32	0.29	4.21	1.18	4.91	1.24
St.B5	0.18	0.13	4.48	1.14	6.57	1.45
St.C2	0.07	0.61	3.39	2.60	2.87	6.96
St.C3	0.04	0.16	6.79	2.11	5.07	1.67
St.C5	0.18	0.28	4.37	1.09	4.61	1.81
St.Z03	0.12	0.28	1.35	1.60	1.42	1.50

nd = not deteksi