Ery Arifullah
Syamsidar Sutan

IKNOLOGI & PALEOEKOLOGI CEKUNGAN KUTAI

Studi Iknofosil untuk Rekonstruksi Model Sistem Pengendapan Sedimen

Teknik Geologi Laboratorium Sedimentologi

Sanksi Pelanggaran Pasal 113
Undang-undang No. 28 Tahun 2014 Tentang Hak Cipta

1. **Setiap Orang** yang dengan tanpa hak melakukan pelanggaran hak ekonomi sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf i untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 1 (satu) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp100.000.000 (seratus juta rupiah).
2. Setiap Orang yang dengan tanpa hak dan/atau tanpa izin Pencipta atau pemegang Hak Cipta melakukan pelanggaran hak ekonomi Pencipta sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf c, huruf d, huruf f, dan/atau huruf h untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 3 (tiga) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp500.000.000,00 (lima ratus juta rupiah).
3. Setiap Orang yang dengan tanpa hak dan/atau tanpa izin Pencipta atau pemegang Hak Cipta melakukan pelanggaran hak ekonomi Pencipta sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf a, huruf b, huruf e, dan/atau huruf g untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 4 (empat) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp1.000.000.000,00 (satu miliar rupiah).
4. Setiap Orang yang memenuhi unsur sebagaimana dimaksud pada ayat (3) yang dilakukan dalam bentuk pembajakan, dipidana dengan pidana penjara paling lama 10 (sepuluh) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp4.000.000.000,00 (empat miliar rupiah).

IKNOLOGI & PALEOEKOLOGI CEKUNGAN KUTAI

Ery Arifullah
Syamsidar Sutan

AMERTA
MEDIA

IKNOLOGI & PALEOEKOLOGI CEKUNGAN KUTAI

Diterbitkan pertama kali oleh CV Amerta Media
Hak cipta dilindungi oleh undang-undang *All Rights Reserved*
Hak penerbitan pada Penerbit Amerta Media
Dilarang mengutip atau memperbanyak sebagian atau seluruh isi buku ini tanpa seizin tertulis dari Penerbit

Anggota IKAPI
Cetakan Pertama: Desember 2022
15,5 cm x 23 cm
ISBN: 978-623-419-233-9

Penulis:
Ery Arifullah
Syamsidar Sutan

Editor:
Dimas Rahman Rizqian

Desain Cover:
Adji Azizurrachman

Tata Letak:
Ladifa Nanda

Diterbitkan Oleh:
CV. Amerta Media

NIB. 0220002381476

Jl. Raya Sidakangen, RT 001 RW 003, Kel, Kebanggan, Kec. Sumbang, Purwokerto, Banyumas 53183, Jawa Tengah. Telp. 081-356-3333-24
Email: mediaamerta@gmail.com
Website: amertamedia.co.id
Whatsapp : 081-356-3333-24

Isi di luar tanggung jawab penerbit Amerta Media

Kata Pengantar

Hanya karena Allah subhanahuwata'ala, penyelesaian buku untuk dunia pendidikan ini dapat diselesaikan dengan baik. penyusunan buku 'Iknofosil & Signifikasi Paleoekologi' ini tidak lepas dari semangat pengembangan iknologi sebagai bagian dari ilmu geologi. Munculnya semangat itu tidak bisa lepas dari peran Ibu tercinta karena Ibu adalah guru pertama kita ketika pertama kali berada di dunia ini.

Akademik adalah tempat pembuktian ilmu pengetahuan, dengan adanya mahasiswa peran pengajar dalam memberikan transfer ilmu pengetahuan memerlukan teknik khusus yang sesuai akan zamannya. Bersama prodi Teknik Geologi – Universitas Muhammadiyah Kalimantan Timur mempunyai posisi yang sangat strategis akan pengembangan ilmu Iknologi sedimentologi di Bumi Etam, sehingga diharapkan melalui buku ini memberi pendekatan konfrehensif yang sederhana dan mudah dimengerti untuk semua kalangan. Semoga berkembang dan bermanfaat!

Samarinda, 24 Oktober 2022
Tim Penulis

Daftar Isi

HALAMAN JUDUL ..... **i**
TENTANG BUKU ..... **iv**
KATA PENGANTAR ..... **v**
DAFTAR ISI ..... **vi**
DAFTAR GAMBAR ..... **vii**
DAFTAR TABEL ..... **xi**
DAFTAR SINGKATAN ..... **xiii**
GLOSARIUM ..... **xv**

Rancangan Pembelajaran Semester Matakuliah Iknologi ..... **xx**

BAB 1 Pendahuluan 1
BAB 2 Metode Studi Iknofosil 11
BAB 3 Iknotaksa & Asosiasi-Asosiasi Iknofosil 26
BAB 4 Nilai Variabel Iknfosil 61
BAB 5 Rekonstruksi Sistem Pengendapan 91
BAB 6 Strategi Paleokomunitas 99
BAB 7 Model Sekuen Vertikal Elemen Pengendapan 112
BAB 8 Penutup 131

DAFTAR PUSTAKA **133**
PROFIL PENULIS **148**

Daftar Gambar

Gambar 1.1 Peta Geologi daerah Samarinda dan sekitarnya....2
Gambar 1.2 Kesebandingan penamaan formasi-formasi di daerah Samarinda dan sekitarnya....3
Gambar 1.3 Tektonostratigrafi Cekungan Kutai....5
Gambar 1.4 Stratigrafi umum daerah Samarinda....6
Gambar 2.1 Contoh peta sampel diambil dari *Garmin Basecamp*..12
Gambar 2.2 Contoh percabangan pada Thalassinoides....14
Gambar 2.3 Diagram skematis IB untuk menentukan IB di lapangan....15
Gambar 2.4 Alur pemrosesan data di studio....20
Gambar 3.1 *Alcyonidiopsis*....27
Gambar 3.2 *Arenicolites*....27
Gambar 3.3 *Asterosoma*....28
Gambar 3.4 *Bergaueria*....29
Gambar 3.5 *Chondrites*....30
Gambar 3.6 *Conichnus*....31
Gambar 3.7 *Cylindrichnus*....31
Gambar 3.8 *Diplocraterion*....*32*
Gambar 3.9 *Fugichnia*....33
Gambar 3.10 *Helminthoidichnites*....34
Gambar 3.11 *Macaronichnus*....35
Gambar 3.12 *Mocraterion*....*35*
Gambar 3.13 *Ophiomorpha*....36
Gambar 3.14 *Paleophycus*....37
Gambar 3.15 *Phycosiphon*....38
Gambar 3.16 *Planolites*....38
Gambar 3.17 *Psilonichnus*....39

Gambar 3.18 *Rhizocorallium*.....40
Gambar 3.19 *Schaubcylindrichnus*.....41
Gambar 3.20 *Scolicia*.....42
Gambar 3.21 *Siphonichnus*.....42
Gambar 3.22 Skolithos.....43
Gambar 3.23 *Taenadium*.....44
Gambar 3.24 *Teichichnus*.....45
Gambar 3.25 *Thalassinoides*.....46
Gambar 3.26 *Zoophycos*.....47
Gambar 3.27 Histogram Pareto asosiasi-asosiasi iknofosil.....49
Gambar 3.28 Rata-rata dan standar deviasi Dm iknofosil.....49
Gambar 3.29 Rata-rata dan standar deviasi KP iknofosil.....50
Gambar 3.30 Histogram Pareto varian *Ophiomorpha*.....52
Gambar 3.31 Histogram Pareto varian *Skolithos*.....53
Gambar 3.32 Histogram Pareto varian asosiasi *Paleophycus*.....55
Gambar 3.33 Histogram Pareto varian asosiasi *Planolites*.....57
Gambar 3.34 Histogram Pareto varian asosiasi *Thalassinoides*.....58
Gambar 3.35 Histogram Pareto varian asosiasi *Chondrites*.....59
Gambar 3.36 Histogram persentase varian monospesifik dan polispesifik.....60
Gambar 4.1 Diagram probabilitas indeks bioturbasi (IB).....62
Gambar 4.2 Diagram probabilitas keragaman iknofosil (KI).....63
Gambar 4.3 Diagram probabilitas jumlah behavior (JB).....63
Gambar 4.4 Diagram Probabilitas kelas kedalaman penetrasi (KP).....65
Gambar 4.5 Diagram Probabilitas kelas diameter iknofosil (Dm).....66
Gambar 4.6 Histogram Pareto *eigenvalue* dan persentase frekuensi komulati variansi.....67
Gambar 4.7 Histogram KU-1 dan hubungannya terhadap variabel IB, KI, JB, KP dan Dm.....67
Gambar 4.8 Histogram KU-2 dan hubungannya variabel IB, KI, JB, KP dan Dm.....68
Gambar 4.9 Diagram sebaran skor enam ratus unit iknofabrik.....69
Gambar 4.10 Peta proses sedimentasi dan arah umum arus purba pada interval Serravallian.....74
Gambar 4.11 Peta yang proses sedimentasi dan arah umum arus purba pada interval Tortonian.....75

Gambar 4.12 Diagram nilai rata-rata dan standar deviasi skor KU-1 dan KU-2 76
Gambar 4.13 Klasterisasi unit-unit iknofabrik 78
Gambar 4.14 Klasterisasi unit-unit iknofabrik: zona D (elips merah) dan E (elips hijau) interval Tortonian 79
Gambar 4.15 Histogram Pareto probabilitas asosiasi iknofosil di zona A interval Serravallian 79
Gambar 4.16 Histogram Pareto probabilitas asosiasi iknofosil di zona B interval Serravallian 80
Gambar 4.18 Histogram Pareto probabilitas kehadiran asosiasi iknofosil di zona D interval Tortonian 80
Gambar 4.19 Histogram Pareto probabilitas kehadiran asosiasi iknofosil di zona E interval Tortonian 81
Gambar 4.20 Peta pola distribusi rata-rata skor KU-1 dan zonasi asosiasi iknofosil tertentu 81
Gambar 4.21 Peta pola distribusi rata-rata skor KU-2 dan zonasi asosiasi iknofosil tertentu interval Serravallian 85
Gambar 4.22 Peta pola distribusi rata-rata skor KU-1 dan zonasi asosiasi iknofosil tertentu Tortonian 86
Gambar 4.23 Peta pola distribusi rata-rata skor KU-2 dan zonasi asosiasi iknofosil tertentu 87
Gambar 4.24 Peta distribusi asosiasi *Skolithos* pada interval Serravallian 89
Gambar 4.25 Peta distribusi asosiasi *Skolithos* pada interval Tortonian 90
Gambar 6.1 Peta Paleogeografi interval Serravallian 105
Gambar 6.2 Peta Paleogeografi interval Tortonian 106
Gambar 6.3 Model Paleoekologi interval Serravallian yang didominasi oleh faktor influks fluvial 107
Gambar 6.4 Model Paleoekologi interval Tortonian yang dipengaruhi oleh fluktuasi paleosalinitas dan paleotemperatur 108
Gambar 7.1 Model pantai dominasi gelombang yang berasal dari singkapan BER-2 113
Gambar 7.2 Model delta dominasi fluvial yang berasal dari singkapan CTR 116
Gambar 7.3 Model delta dominasi fluvial yang berasal dari singkapan SSG interval Tortonian 117

Gambar 7.4 Model pantai kombinasi gelombang-pasang surut yang berasal dari singkapan TAM-2 120
Gambar 7.5 Model estuaria yang berasal dari singkapan ARD 122
Gambar 7.6 Model estuaria yang berasal dari singkapan ANG-1 .. 123
Gambar 7.7 Model *distributary channel* yang berasal dari singkapan LNG..... 124
Gambar 7.8 Model *tidal inlet* yang berasal dari singkapan PAL 126
Gambar 7.9 Model tidal inlet yang berasal dari singkapan MAN .. 127

Daftar Tabel

Tabel 2.1 Daftar koordinat singkapan batuan yang dipelajari 13
Tabel 3.1 Probabilitas dan persentase frekuensi kumulatif asosiasi- asosiasi iknofosil 48
Tabel 3.2 Daftar varian asosiasi Ophiomorpha..... 50
Tabel 3.3 Daftar varian asosiasi Skolithos 52
Tabel 3.4 Daftar varian asosiasiPaleophycus..... 54
Tabel 3.5 Daftar varian asosiasi Planolites. 56
Tabel 3.6 Daftar varian asosiasi Thalassinoides. 57
Tabel 3.7 Daftar varian asosiasi Chondrites..... 58
Tabel 4.1 Daftar lebar kelas variabel KP..... 64
Tabel 4.2 Daftar lebar kelas variabel Dm 65
Tabel 4.3 Contoh tabulasi yang menunjukkan skor KU-1 dan KU-2 di setiap unit iknofabrik..... 68
Tabel 4.4 Klasifikasi litofasies 70
Tabel 4.5 Litofasies di setiap singkapan dan penafsiran dominasi prose Sedimentasinya 71
Tabel 4.6 Tabulasi nilai rata-rata skor KU-1 dan KU-2 setiap singkapan pada zona dan interval Serravallian dan Tortonian 76
Tabel 4.7 Tabulasi nilai rata-rata skor KU-1 dan KU-2 setiap singkapan pada zona dan interval Serravallian dan Tortonian 82
Tabel 5.1 Rangkuman paleoekologi asosiasi-asosiasi iknofosil..... 98
Tabel 6.1 Elemen-elemen pengendapan yang diidentifikasi di setiap singkapan batuan..... 111

Tabel 7.1 Rangkuman model sistem pengengendapan pantai dominasi gelombang, delta dominasi fluvial dan pantai campuran gelombang pasang surut 128
Tabel 7.2 Rangkuman model elemen pengendapan *distributary* channel dan estuaria 129
Tabel 7.3 Rangkuman model elemen pengendapan tidal inlet 129

Daftar Singkatan

Al	*Alcyonidiops*
ANG-1	Anggana-1
ANG-2	Anggana-2
ANG-3	Anggana-3
Ar	*Arenicolites*
ARD	Ardan
As	*Asterosoma*
BER-1	Berambai-1
BER-2	Berambai-2
IB	Indeks Bioturbasi
BTP	Batuputih
Ch	*Chondrites*
CMT	Camat
Co	*Conichnus*
CTR	Citraland
Dm	Diameter
E	*East*
FK	Frekuensi Komulatif
Frek.	Frekuensi
He	*Helmintoidinichnites*
ID	Iknodiversitas
KI	Keragaman Iknofosil
KES	Kesejahteraan
KP	Kedalaman Penetrasi
KU	Komponen Utama
LNG	Gunung Lingai
Ma	*Macaronichnus*

MAN	Mangkupalas
MEL-1	Melati-1
MEL-2	Melati-2
MTH	MT. Haryono
JB	Jumlah behavior
Op	Ophiomorpha
Pa	Paleophycus
PAL	Palaran
PCA	Principle component analysis
PR	Pemanfaatan Ruang
Pn	Phycosiphon
Prob.	Probabilitas
Ps	Psilonichnus
Rh	Rhizocorallium
S	South
Sb	Schaubcylindrichnus
Sc	Scolicia
Sk	Skolithos
SMP	SMPN-1
SSG	Sangasanga
SWI	Sediment water interface
TAM-1	Tamansari-1
TAM-2	Tamansari-2
Te	Teichichnus
Th	Thalassinoides
Tr	Trackway
Zo	Zoophycos

Glosarium

active filled	**:**	meterial yang disimpan di dalam*burrow* oleh binatang (sama dengan *backfilled*) (Ekdale dkk., 1984).
agrichnia	**:**	struktur sedimen biogenik yang digunakan untuk "pertanian" atau "perangkap" yang dibuat oleh organisme untuk mendapatkan makanan (Ekdale,dkk. 1984).
backfill	**:**	meterial yang secara aktif disimpan di dalam *burrow* oleh binatang (Ekdale dkk.,1984).
behavior	**:**	perilaku dan kebiasaan organisme terhadap lingkungannya, untuk mempertahankan kondisi internal agartetap konstan terhadap kondisi lingkungan eksternal yang berfluktuasi (Kappeler,2012 dalam Vallon dkk., 2015)
bioturbasi	**:**	proses yang menunjukkan konsistensi dan struktur sedimen primer dimodifikasi oleh aktifitas fauna yang hidup di dalamnya (Bromley, 1996).
burrow	**:**	secara lateral dalam sedimen sebagai konsekuensi pergerakan binatang secara lateral (Ekdale dkk., 1984)
brackish	**:**	tingkat kadar garam yang kurang dari kadar garam laut seperti di estuaria, pantailagunal
burrow	**:**	ruang dalam sedimen yang ditempati dan dipertahankan oleh binatang, (Bromley, 1996).
burrow fill	**:**	material yang mengisi burrow (Ekdale dkk.,

1984).

burrow lining : material yang digunakan untukmemperkuat dinding, material dapat terakumulasi ketika *burrow* terbuka (Bromley, 1996).

chemichnia : struktur yang terbentuk karena aktifitas *chemosymbiosis* yaitu asosiasi komensalisme antara binatang dan bakteri. Bakteri meng-oksidasi campuran material yang tereduksi yang memanfaatkan oksigen yang disuplai oleh binatang, sehingga menghasilkan kar-bohidrat dan enzim (Reid, 1989).

cubichnia : struktur sedimen biogenik yang menunjuk-kan organisme berhenti sejenak (Ekdale dkk., 1984)

deposit feeder : binatang yang mendapatkan nutrisi dari partikel material organik dan mikroba yang menyatu dalam sedimen (Bromley, 1996).

detritus feeder deposit feeder : yang memakan layer paling atas kaya nutrisi pada substrat (Bromley, 1996)

dilatancy : terminologi kondisi sedimen ketika diterap-kan suatu gaya, maka akan meningkatkan kekuatannya (Bromley,1996).

domichnia : struktur permanen yang dibuat organisme untuk tempat tinggal (Ekdale dkk., 1984)

ekskavasi : teknik pembuatan *burrow* dengan cara meru-bah substrat yang kompak menjadi lepas-lepas dan menyalurkannya keluar sistem, apakah di dasar laut atau bagian lainnya dari burrow, sehingga membentukruang terbuka (Bromley, 1996)

epifauna : binatang yang hidup di permukaan substrat (Ekdale dkk., 1984).

epirelief : iknofosil yang terawetkan baik secara konkaf atau konveks di atas lapisan (Seilacher, 1964)

equilibrichnia : struktur yang terbentuk karena organisme menjaga keterhubungannya dengan bidang antar muka sedimen dan air untuk mempertahankan pasokan oksigen (modifikasi dari Bromley, 1996)

fodinichnia : *burrow* yang dihasilkan oleh aktifitas organisme pemakan sedimen di bawah permukaan sedimen (Ekdale dkk., 1984)

fugichnia : sama dengan *escape trace* (Frey, 1973), struktur sedimen biogenik yang dihasilkan akibat organisme yang melarikan diri karena suatu sebab (penguburan oleh sedimen secara tiba-tiba, erosi atau menghindari predator) (Bromley, 1996)

full relief : iknofosil yang terawetkan secara tiga dimensi dan berada di dalam sedimen (Seilacher, 1964)

iknodisparitas : ragam desain arsitektur iknofosil, terkait inovasi, sistem mobilitas dan/atau behavior di dalam unit iknofabrik (Buatois dan Mángano, 2013)

iknofabrik : semua aspek-aspek struktur dan tekstur internal sedimen yang dihasilkan karena bioturbasi dan bioerosi (Ekdale dan Bromley, 1983; Ekdale dkk., 1984)

iknotaksa : kategori klasifikasi iknofosil

infauna : binatang yang hidup di dalam substrat (Ekdale dkk., 1984)

ingesta : segala sesuatu yang masuk ke dalam lambung

insidental : terminologi dari Miller (2003) untuk menjelaskan struktur iknofosil yang simpel, satu *behavior* dan ditempati hanya sewaktu-waktu oleh binatang

meniscate backfill : bentuk dari proses backfillyang tersusun oleh paket-paket sedimen berbentuk bulan sabit jika dilihat dari sumbu panjang

monospesifik : unit iknofabrik yang terdiri dari satu jenis iknofosil (Droser, 1991)

paschichnia : struktur yang terbentuk karena aktifitas organisme yang bergerak dan makan (Ekdale dkk., 1984)

passive fill : material yang mengisi burrow oleh sedimentasi fisik setelah binatang yang menem-

patinya keluar (Ekdale dkk., 1984)

pellet : material sisa buangan organisme berbentuk silindrik, bundar atau oval, maksimum dimensi kurang dari satu centimeter (Ekdale dkk., 1984)

pemanfaatan ruang : penggunaan ruang dalam substrat oleh infauna sebagai konsekuensi dari perkembangan ukuran tubuhnya dan aktifitas penetrasinya

polispesifik : unit iknofabrik yang di dalamnya hanya tersusun oleh lebih dari satu jenis iknotaksa

repichnia : struktur yang terbentuk akibat organisme yang bergerak, termasuk *trail* dan *track* (Ekdale dkk., 1984)

sediment water interface (SWI) : bidang antar muka sedimen dan air

seston : partikel organik dan inorganik yang tersuspensi di dalam kolom air (Bromley, 1996)

shaft : *burrow* vertikal atau elemen vertikal dari sistem *burrow* (Frey, 1973)

shoreface : zona subtidal pantai, dengan rentang rata-rata pasang terendah sampai dasar gelombang efektif

spreiten : struktur biogenik yang tersusun oleh suksesi dinding *tunnel* yang menyatu secara ketat sebagai hasil dari pergeseran

suspension feeder : binatang yang menangkap dan memakan seston (Bromley, 1996)

tiering : partisi vertikal dari suatu komunitas. Pada komunitas endobentik, pemrosesan sedimen terjadi beberapa level di bawah dasar laut (Ausich dan Bottjer, 1982) yang dihasilkan oleh organisme yang melakukan penetrasi pada kedalaman tertentu secara perlahan karena kebutuhan mendapatkan makanan dan oksigen dengan memanfaatkan strategi yang berbeda (Bromley, 1996)

thixotrophic : terminologi kondisi sedimen ketika diterapkan suatu gaya, maka akan menurunkan kekuatannya dan menjadilebih cair (Bromley, 1996)

track : jejak kaki organisme (Ekdale dkk., 1984)

trail : struktur yang terbentuk karena pergerakan organisme yang menerus tanpamenunjukkan jejak kaki yang terpisah (Ekdale dkk., 1984)

tunnel : burrow horisontal atau elemen horisontal dari sistem burrow (Ekdale dkk., 1984)

RANCANGAN PEMBELAJARAN SEMESTER MATAKULIAH IKNOLOGI

Kemampuan Khusus	Bahan Kajian/Pokok Bahasan
Pendahuluan	1. Pendahuluan dan dasar pengetahuan tentang. iknologi. 2. Iknofosil sebagai struktur sedimen. 3. Sejarah iknologi.
Dasar-dasar paleokologi	1. Definisi. 2. Iknologi dan paleokologi. 3. Paleokologi sebagai basis memahami iknologi.
Sedimen sebagai substrat	1. Kondisi substrat sebagai variabel utama dalam pembentukan iknofosil.
Hubungan organisme dan sedimen	1. Alasan organisme membuat fosil jejak. 2. Bagaimana organisme membuat fosil jejak.
Kriteria klasifikasi iknofosil (bagian PERTAMA)	1. Prinsip-prinsip iknologi. 2. Kriteria berdasarkan bagaimana cara terpreservasi.
Kriteria klasifikasi iknofosil (bagian KEDUA)	1. Kriteria *behavioural*. 2. Kriteria lingkungan.
Sistematika identifikasi iknofosil (Bagian PERTAMA)	1. Struktur pada iknofosil. 2. Orientasi terhadap bidang lapisan.
Sistematika identifikasi iknofosil (Bagian KEDUA)	1. Percabangan. 2. Bentuk secara umum. 3. Isi dalam iknofosil. 4. Dinding.
Metode pengamatan pada singkapan dan core	1. Observasi pada singkapan batuan dan core. 2. Kuantifikasi parameter-parameter iknofosil.
Variabel-variabel iknofosil dalam sedimen	1. Intensitas aktifitas organisme. 2. Keragaman iknofosil. 3. Jumlah *behaviour*.

Kemampuan Khusus	Bahan Kajian/Pokok Bahasan
Field trip iknologi	1. Kunjungan lapangan pada singkapan batuan di kota Samarinda.
Pemodelan dalam iknologi	1. Analisis statistik. 2. Penafsiran model statistik.
Beberapa iknofosil yang umum dijumpai	1. Iknofosil yang umum dijumpai.
Signifikansi iknologi dalam geologi	1. Pada sedimentologi dan stratigrafi. 2. Iknofabrik dan iknofasies.

شَهِدَ اللهُ أَنَّهُ لَا إِلَهَ إِلا هُوَ وَالْمَلائِكَةُ وَأُولُو الْعِلْمِ قَائِمًا بِالْقِسْطِ لَا إِلَهَ إِلا هُوَ الْعَزِيزُ الْحَكِيمُ

Allah menyatakan bahwasannya tidak ada Tuhan melainkan Dia (yang berhak disembah), Yang menegakkan keadilan. Para malaikat dan orang-orang yang berilmu (juga menyatakan yang demikian itu). Tidak ada Tuhan melainkan Dia (yangberhak disembah), Yang Maha Perkasa lagi Maha Bijaksana.
(Ali-Imran: 18)

Untuk orang-orang berilmu yang gigih menegakkan keadilan.

BAB 1

Pendahuluan

Geoogi Cekungan Kutai

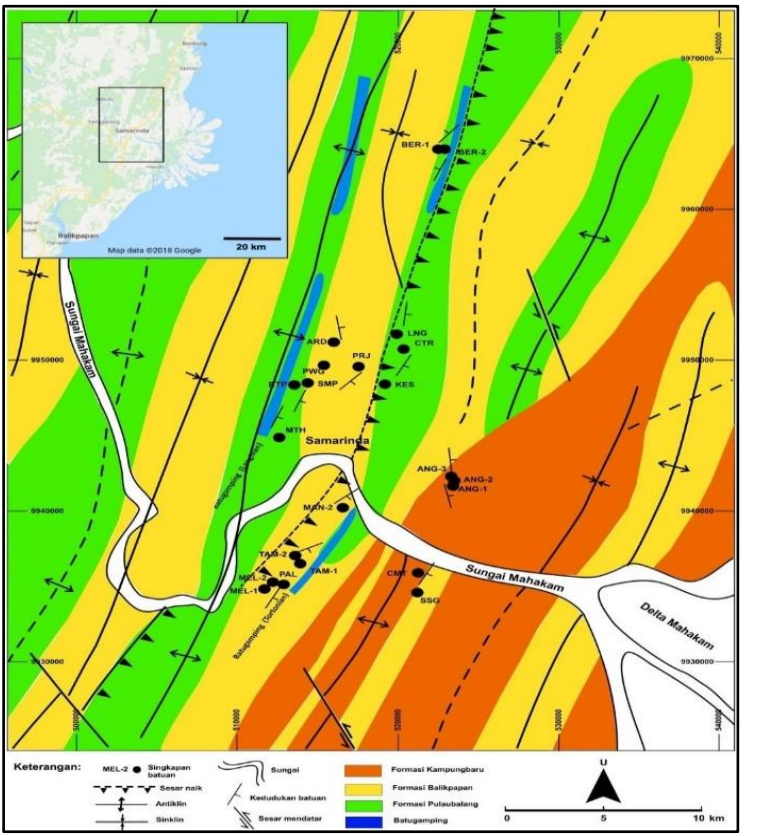
Cekungan Kutai berada pada pertemuan tiga lempeng, yaitu Lempeng Eurasia, Lempeng Pasifik, dan Lempeng India-Australia. Secara fisiografi, Cekungan Kutai terletak di bagian timur Kalimantan, dibatasi oleh Tinggian Kuching di bagian barat, Tinggian Mangkalihat di utara, Selat Makassar di timur, dan Pegunungan Meratus dan Paparan Pasternoster di selatan. Cekungan Kutai dibatasi dari Cekungan Tarakan di utaranya oleh Tinggian Mangkalihat, dan dibatasi dari Cekungan Barito di Selatan oleh Pegunungan Meratus.

Cekungan Kutai terbentuk pada Kala Eosen Tengah sebagai cekungan regangan, yang terisi oleh endapan genang laut berumur Eosen sampai Oligosen, diikuti oleh pengisian endapan susut-laut Miosen (Van de Weerd dan Armin, 1992). Berkembangnya lingkungan pengendapan di Cekungan Kutai mulai dari delta hingga laut dalam (Bachtiar, 2004) tidak lepas dari pengaruh tektonik yang ber-langsung pada kala Miosen. Sejak Miosen hingga saat ini sistem pe-ngendapan terus berprogradasi menuju ke Selat Makassar di sebelah timur Cekungan Kutai. Dengan demikian orientasi garis pantai Ceku-ngan Kutai sejak Miosen Awal hingga saat ini relatif sama dengan orientasi garis pantai Kalimantan Timur sekarang (Allen dan Chambers, 1998; Bachtiar, 2004).

Cekungan Kutai merupakan cekungan terbesar di Indonesia dan satu diantara penghasil hidrokarbon utama di Indonesia (Doust dan Noble, 2008). Sejalan dengan kegiatan eksplorasi sumber daya buminya, studi geologi khususnya sedimentologi telah dilakukan secara intensif untuk mengungkap sistem pengendapannya. Namun

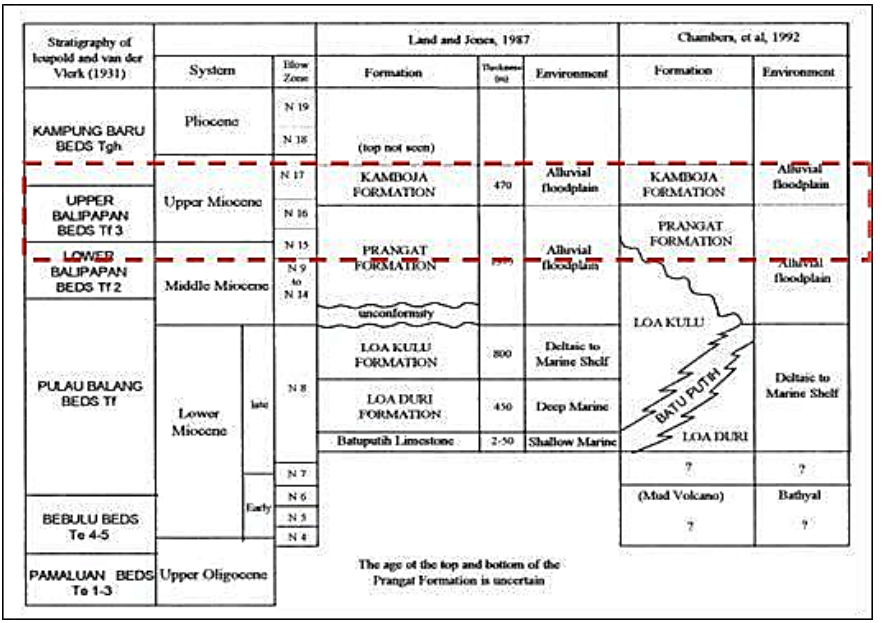
demikian penggunaan data iknofosil untuk studi sistem pengendapan di Cekungan Kutai hampir tidak pernah dilakukan. Situasi tersebut bersamaan pula dengan masih sedikitnya penelitian iknofosil ter-kait sistem delta ataupun sistem yang dipengaruhi oleh proses pa-sang surut (MacEachern dkk., 2005; Gingras dan MacEachern, 2012).

Berdasarkan peta geologi Supriatna dkk. (1995), singkapan-singkapan batuan interval Serravallian dan Tortonian yang terletak pada Formasi Pulau Balang, Formasi Balikpapan dan Formasi Kampung Baru (Gambar 1.1). Formasi-formasi tersebut di atas sebanding dengan Formasi Prangat dan Kamboja (Land dan Jones, 1987; Chambers dkk., 1992) (Gambar 1.1)



Gambar 1.1 Peta Geologi daerah Samarinda dan sekitarnya (modifikasi dari Supriatna dkk. 1995). Singkapan Batuan berada pada Fm. Pulaubalang, Fm. Balikpapan dan Fm. Kampungbaru

Interaksi proses-proses fluvial, pasang surut dan gelombang yang berkembang di Cekungan Kutai, khususnya di Samarinda pada interval umur Miosen Tengah-Miosen Akhir telah ditafsirkan sebagai sistem delta (Allen dan Chambers, 1998; Bachtiar, 2004; Arifullah, 2005). Jika merujuk pada Boyd dkk. (1992); Dalrymple dan Choi (2007), penafsiran tersebut berpotensi menimbulkan perdebatan mengingat interaksi proses-proses fluvial, pasang surut dan gelombang tidak selalu menghasilkan sistem delta.Proses lain yang menyertainya seperti progradasi dan retrogradasi (Boyd dkk., 1992) dan faktor kimiawi seperti pembuktian adanya fluktuasi paleosalini-tas perlu dikenali untuk menentukan sistem pengendapannya (Dalrymple, 2006).



Gambar 1.2 Kesebandingan penamaan formasi-formasi di daerah Samarinda dan sekitarnya menurut van der Vlerk (1931), Land dan Jones (1987) dan Chambers dkk. (1992). Garis putus- putus merah adalah interval stratigrafi daerah penelitian ini.

Pada sistem delta besar (misalnya delta Mahakam) menunjukkan elemen-elemen pengendapan di dalamnya dapat berkembang pada sistem non delta (Allen dan Chambers, 1998; Bhattacharya dan Giosan, 2003; Arifullah, 2005). Wajarlah jika Galloway dan Hobday

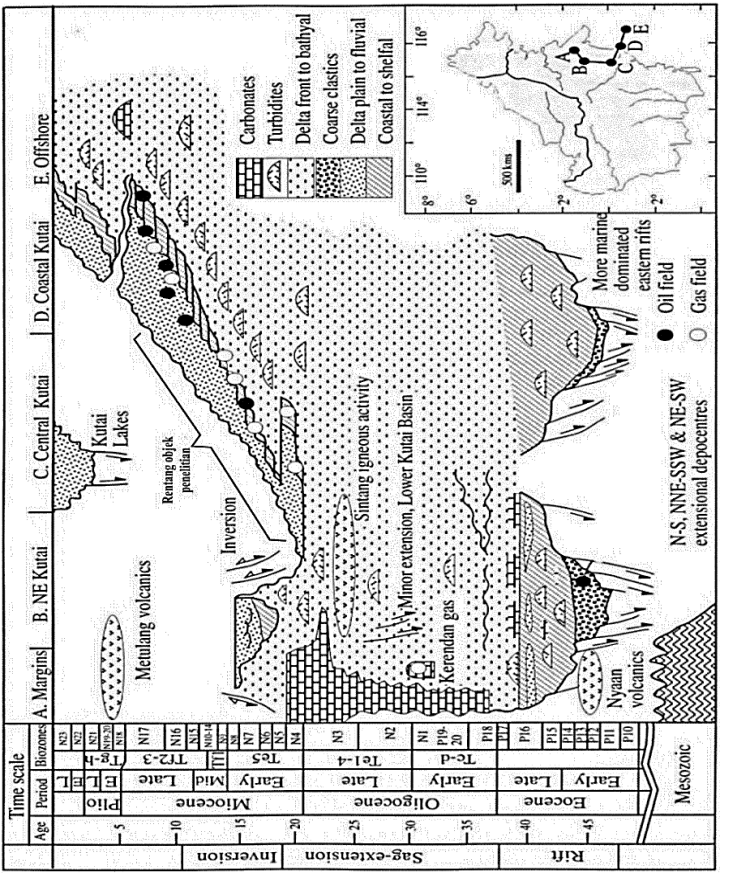
(1996) menyatakan bahwa proses-proses atau lingkungan-lingkungan yang unik khusus untuk delta sedikit sekali.

Karakteristik batuan di daerah sampel menunjukkan perulangan litologi yang hampir sejenis secara strateigrai. Bachtiar (2004) menegaskan bahwa gejala tersebut mengakibatkan paket batuan sedimennya sulit untuk dikelompokkan sebagai formasi. Bachtiar (2004) telah menunjukkan bahwa Formasi Balikpapan dapat dijumpai mulai dari umur Miosen Awal di hulu Sungai Mahakam sampai dengan Miosen Akhir di daerah delta Mahakam. Lebih jauh lagi Bachtiar (2004) menegaskan bahwa identifikasi satu paket delta tidak dapat ditafsirkan langsung dari ciri formasi.

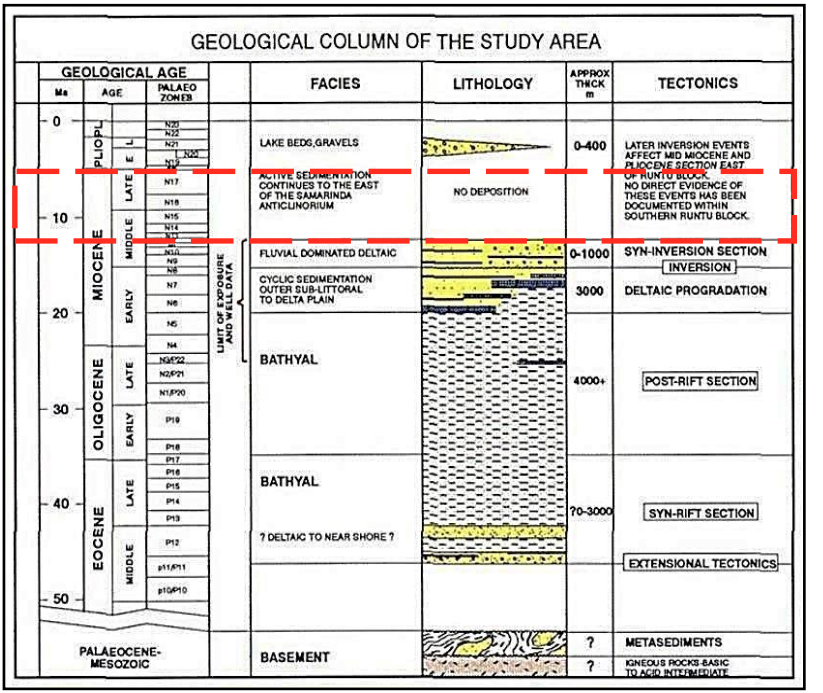
Permasalahan dalam merekonstruksi sistem pengendapan di Cekungan Kutai, maka permasalahannya adalah bagaimana asosiasi-asosiasi iknofosil dan variabel iknofabrik dapat menggambarkan sistem pengendapan di Cekungan Kutai. Berangkat dari uraian diatas, buku ini bermaksud menampilkan model sistem pengendapan berdasarkan iknofosil. Lebih jauh lagi, buku ini menampilkan asosiasi-asosiasi iknofosil dan merekonstruksi sistem pengendapan sedimen berumur Miosen (Serravalian-Tortonian), Cekungan Kutai di Daerah Samarindadan sekitarnya berdasarkan data iknofosil.

Buku ini memaparkan tahapan-tahapan penelitian dalam studi iknologi yang terdiri dari, tahap pengumpulan data, tahap studio dan tahap sintesis. *Pertama*, tahap pengumpulan data. Mencakup metode identifikasi iknofosil dan kodefikasi unit-unit iknofabrik, metode penentuan indeks bioturbasi, metode penentuan keragaman iknofosil, metode penentuan jumlah *behavior,* metode pengukuran kedalaman penetrasi, metode pengukuran diameter iknofosil, serta kolom stratigrafi singkapan dan arus purba. *Kedua,* tahap studio. Meliputi Metode Pengelompokkan Iknofosil, Metode Perhitungan Probabilitas, Metode Analisis Komponen Utama, Metode Klasterisasi Skor KU, Metode Pemetaan Rata-rata Skor KU, Metode Analisis Fasies, serta Metode Analisis Arus Purba. *Ketiga,* tahap sintesis. Sin-tesiss model sistem pengendapan dilakukan dengan cara menyela-raskan hasil penafsiran paleoekologi asosiasi-asosiasi iknofosil dan variabel-variabel iknofabrik sehingga menghasilkan model sistem pengendapan yang mencakup model paleogeografi, model paleoekologi, model elemen-elemen pengendapan dan stratigrafi umum yangberasosiasi dengan asosiasi iknofosil dan komponen iknofabrik.

Daerah Samarinda dipilih sebagai objek penelitian karena posisinya secara geologi adalah pusat pengendapan pada kala Mio-sen (Moss dan Chambers, 1999). Singkapan-singkapan yang dipela-jari berada di antara dan sekitarlapisan-lapisan batugamping Batu-putih yang berumur Langhian dan Stadion Palaranyang berumur Tortonian (Di Martino dkk., 2015). Objek penelitian dibatasi pada sedimen silisiklastik berumur Miosen Tengah-Akhir yang tersingkap di Daerah Samarinda dan sekitarnya. Penentuan sistem pengendapan hanya menggunakan data iknofosil yang mencakup asosiasi-asosiasi iknofosil, IB, KI, JB, KP dan Dm. Datalainnya seperti litofasies dan arah umum arus purba digunakan sebagai data yang memperkuat penafsiran sistem pengendapan.



Gambar 1.3 Tektonostratigrafi Cekungan Kutai



Gambar 1.4 Stratigrafi umum daerah Samarinda (Chambers dan Daley, 1995). Garis putus-putus merah adalah interval stratigrafi daerah penelitian.

Pada interval umur Serravallian-Tortonian telah terjadi peristiwa progradasi aktif ke arah timur akibat episode tektonik inversi sejak Miosen Tengah (Gambar 1.3 dan 1.4) yang membentuk Antiklinorium Samarinda. Arah progradasi tersebut tidak berubah sejak Miosen Awal (Allen dan Chambers, 1998; Bachtiar, 2004; Samuel dan Muchsin, 1975). Keberadaan proses fluvial, pasang surut dan gelombang yang menyertai proses progradasiberasosiasi dengan sistem delta (Allen dan Chambers, 1998; Bachtiar, 2004; Arifullah, 2005; Septama dkk. 2018).

Rekonstruksi Sistem Pengendapan

Sistem pengendapan adalah kumpulan tiga dimensi fasies yang proses-proses di dalamnya saling terkait sehingga mencerminkan elemen-elemen paleogeomorfik utama dalam cekungan (Galloway, 1989). Kalimat kunci dari sistem pengendapan adalah proses-proses yang saling terkait. Yaitu proses-proses fisika, kimia dan biologi dan

aspek-aspek statis lingkungan yang mencakup geomorfologi, kedalaman air, kimia air, suplai sedimen, dan iklim (Boggs, 1987) sebagai domain paleoekologi (Imbrie dan Newell, 1964) studi kesemua proses-proses tersebut adalah dasar dalam rekonstruksi sistem pengendapan (Bottjer, 2016).

Rekonstruksi sistem pengendapan yang di dalamnya terdapat interaksi proses fluvial, gelombang dan pasang surut adalah tantangan tersendiri. Hal tersebut disebabkan interaksi ketiga proses-proses tersebut berpeluang menghasilkan sistem delta estuaria, *strandplain* dan *tidal flat* (Boyd dkk., 1992; Dalrymple dkk., 1992). Dalam sistem delta yang besar pun terdapat elemen-elemen *strandplain*, *shoreface,* laguna, *barrier island* yang umum bagian dari sistem pengendapan non deltaik atau fase destruktif dari delta (Allen dan Chambers, 1998; Bhattacharya dan Giosan, 2003; Arifullah, 2005).

Demikian juga halnya dengan kondisi lingkungan *brackish* yang sering diasosiasikan dengan sistem pengendapan proses pasang surut tidak selalu tepat (Dalrymple dan Choi, 2007; Gingras dan MacEachern, 2012). Kondisi lingkungan *brackish* tidak hanya terjadi pada sistem delta, estuaria tapi juga pada sistem paparan (Dalrymple dan Choi, 2007). Melihat kompleksitas proses-proses yang berlangsung pada sistem pengendapan yang melibatkan interaksi proses fluvial, gelombang dan pasangsurut, maka wajarlah jika Galloway dan Hobday (1996) menegaskan bahwa sedikit sekali proses-proses atau lingkungan-lingkungan yang unik sebagai penciri sistem delta.

Identifikasi sistem delta ataupun bukan delta perlu membuktikan ada tidaknya paleomorfologi bentuk pantai cembung yang merefleksikan influks fluvial yang dominan. Namun demikian gejala melimpahnya litofasies indikator proses fluvial yang dijumpai pada satu singkapan batuan tidaklah cukup menjadi dasar penentuan dominasi proses suatu sistem pengendapan yang skalanya lebih besar (Dalrymple dan Choi, 2007). Dengan demikian yang menjadi prio-ritas adalah identifikasi level analisis dan skala pengamatan dalam konteks geologi regional (Anderton, 1985; Miall, 1985; Bhattacharya dan Giosan, 2003; Dalrymple dan Choi, 2007).

Icnofossil Studi Status

Iknologi sebagai cabang ilmu geologi dikembangkan oleh Adolf Seilacher pada tahun 1960-an yang kemudian mempublikasikan model iknofasies Seilacher (1967). Model tersebut umum digunakan

dalam studi iknologi. Objek dari studi iknologi adalah iknofosil yang merupakan struktur sedimen primer (Pettijohn dan Potter, 1964; Frey, 1975). Pernyataan tersebut didukung oleh Dapples (1942); Moore dan Scruton (1957); Van Straaten (1959); Allen (1965) yang telah membuktikan bahwa fauna adalah salah satu agen penting dalam membentuk kemas akhir sedimen.

Iknofosil sebagai fungsi paleoekologi (Seilacher, 1964; Rhoads, 1975) dan begitu kompleksnya paleoekologi di setiap batimetri mengakibatkan model iknofasies tidak dapat memberikan resolusi maksimal sebagai paleobatimetri (Byers, 1982; Ekdale, 1988; Goldring, 1993). Dalam perkembangnnya metode studi iknofosilpun terbagi menjadi dua yaitu metode iknofasies dan metode iknofabrik (McIlroy, 2008; Gingras dkk., 2011; Mángano dan Buatois, 2012). Ekdale dan Bromley (1983); Bromley dan Ekdale (1986) mempelopori pengembangan metode iknofabrik. Teori-teori ekologi dan paleoekologi di-adopsi dalam rangka pengembangan metode iknofabrik seperti konsep *tiering* (Bottjer dan Ausich, 1986), pengaruh oksigen terhadap ekologi (Rhoads dan Morse, 1971), fluktuasi Salinitas (Sanders dkk.,1965) dan fluktuasi temperatur dari (Johnson, 1965), struktur komunitas (Levinton, 1977; Reise, 1979), suplai makanan (Bambach, 1983), *deposit* dan *suspension feeder* (Purdy, 1964; Rhoads dan Young, 1970), strategi populasi (Root, 1967; Pianka, 1970) dan konsep *disturbance* (White dan Pickett, 1985).

Untuk mengungkap faktor-faktor paleoekologi, variabel-variabel iknofabrik seperti keragaman iknofosil (Ekdale, 1985), indeks bioturbasi (Droser dan Bottjer, 1986, 1989), diameter iknofosil dan kedalaman penetrasi iknofosil (Savrda dan Bottjer, 1987; Wetzel, 1991) dan yang paling mutakhir adalah aspek iknodisparitas (Buatois dan Mángano, 2013) telah menjadi data penting dalam studi iknofabrik.

Inisiasi studi iknofosil dalam rangka memahami paleokologi regional telah dilakukan oleh Bottjer dan Droser (1991) dengan menyajikan histogram-histogram untuk membandingkan nilai rata-rata IB (indeks bioturbasi) satu cekungan dengan cekungan sedimen lainnya. Metode Bottjer dan Droser (1991) berpotensi diterapkan untuk variabel-variabel lainnya seperti KI (keragaman iknofosil), JB (jumlah *behavior*), KP (kedalaman penetrasi) dan Dm (diameter iknofosil). Dalam penyajiannya data iknofabrik juga disandingkan dengan penampang stratigrafi antara lain kurva/histogram BI

(Gingras dkk., 2002; Arifullah, 2005; Gani dkk., 2008), KI (Gingras dkk., 2002; Arifullah, 2005); kurva-kurva KP dan Dm (Savrda dan Bottjer, 1987, 1989).

Skema dari Ekdale dan Bromley (1991) secara implisit mununjukkan bahwa setiap unit iknofabrik dicirikan dengan IB, KI, JB, KP dan Dm tertentu. Namun demikian belum ada yang melakukan integrasi kesemua data iknofosil yang meliputi IB, KI, JB, KP dan Dm. Untuk studi cekungan, kelima variabel tersebut dapat dianalisis dengan menerapkan metode Bottjer dan Droser (1991).

Pemetaan distribusi iknofosil telah dilakukan oleh Bockelie (1991) level stratigrafi tertentu. Dengan metodenya Bockelie (1991) mengetahui perubahan gradasional dari satu asosiasi iknofosil ke asosiasi lainnya. Dia juga telah membuktikan bahwa perubahan jenis asosiasi iknofosil searah dengan arah pengendapan regionalnya. Metode Bockelie (1991) pada dasarnya dapat diterapkan dalam pemetaan variabel-variabel IB, KI, JB, KP dan Dm, namun demikian belum ada yang menginisiasi model pemetaan ini.

Metode statistik adalah metode standar dalam studi ekologi dan paleoekologi (Bottjer, 2016). Karena misi studi iknofabrik adalah mengungkap faktor-faktor paleoekologi, maka metode statistik diharapkan menjadi metode standar dalam iknologi (Martin, 1993; Buatois dan Mángano, 2011; Wetzel, 2017). Kelima variabel seperti IB, KI, JB, KP dan Dm mungkin dianggap terlalu banyak variabel yang dipertimbangkan dalam analisis paleoekologi. Oleh karenanya diperlukan metode statistik untuk mereduksi kelima variabel tersebut tanpa mengurangi maknanya dan tetap dapat diperoleh hubungan antara satu variabel dengan variabel lainnya. Namun sayangnya hingga saat ini penggunaan metode statistik secara optimal dalam studi iknofosil masih belum dilakukan.

Studi iknofosil yang pernah dilakukan di Cekungan Kutai baru dilakukan oleh Arifullah (2005). Dia telah mengidentifikasi iknofasies delta dominasi gelombang, delta dominasi pasang surut dan delta dominasi fluvial yang berkembang pada kala Miosen di Cekungan Kutai. Terdapat kemiripan iknofasies endapan delta dominasi gelombang dari Arifullah (2005) dan iknofasies sistem *shoreface* dari Pemberton dkk. (1992). Penafsiran yang berbeda kemungkinan terkait dengan elemen pengendapan yang diteliti sama yaitu elemen yang didominasi oleh proses gelombang namun berada dalam konteks sistem pengendapan yang berbeda. Namun yang jelas kedua

model tersebut menunjukkan kesamaan gejala paleoekologi.

Peluang pertama adalah pentingnya mengungkap faktor-faktor paleoekologi dari ikno-fosil. Peluang kedua adalah optimalisasi data variabel-variabel ikno-fabrik seperti IB, KI, JB, KP dan Dm. Peluang ketiga adalah membuat peta-peta yang mengekspresikan varibel-variabel IB, KI, JB, KP dan Dm. Ketiga peluang tersebut menjadi dasar dalam merekonstruksi sistem pengendapan berdasarkan data iknofosil.

BAB 2

Metode Studi Iknofosil

Maksud dari kegiatan teknik identifiasi iknologi ini adalah membuat model sistem pengendapan berdasarkan iknofosil. Tujuan penelitian ini adalah:

1. Menentukan asosiasi-asosiasi iknofosil
2. Merekonstruksi sistem pengendapan sedimen berumur Miosen (Serravalian- Tortonian), Cekungan Kutai di Daerah Samarinda dan sekitarnya berdasarkan data iknofosil.

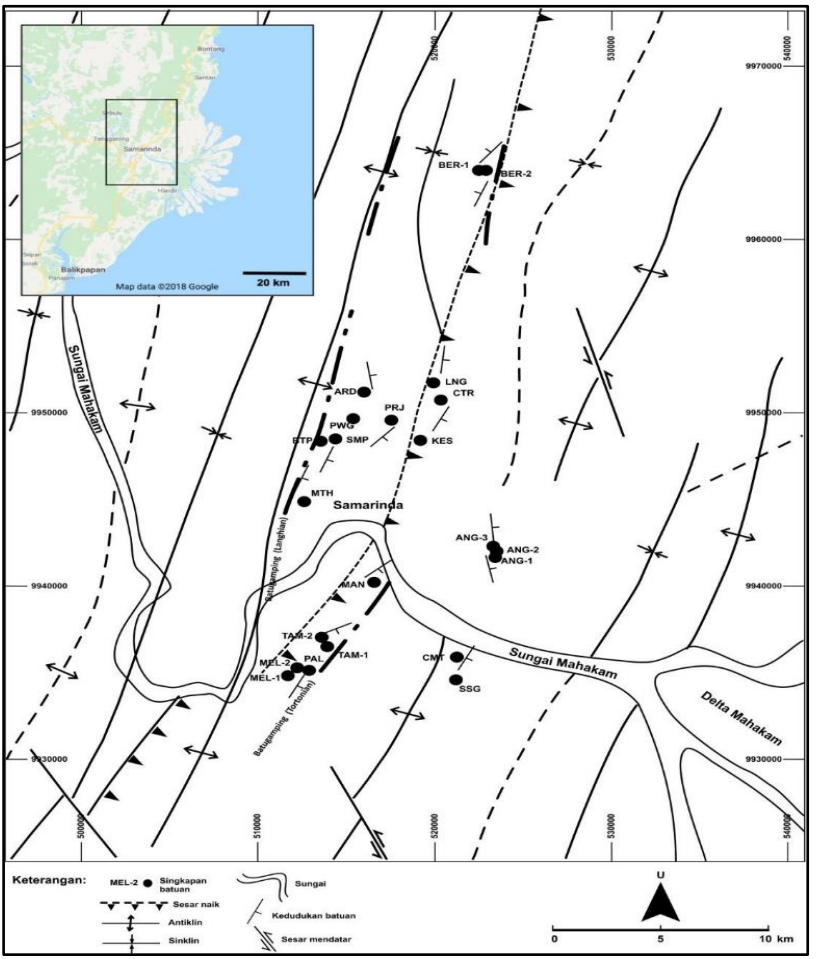
Untuk merekonstruksi sistem pengendapan di Cekungan Kutai, maka permasalahannya adalah bagaimana asosiasi-asosiasi iknofosil dan variabel iknofabrik sehingga dapat menggambarkan sistem pengendapan di Cekungan Kutai.

A. Tahap Pengumpulan Data

Iknofabrik adalah semua aspek-aspek tekstur dan struktur internal sedimen yang dihasilkan semua fase bioturbasi (Ekdale dan Bromley, 1983). Merujuk pada Ekdale dan Bromley (1991), unit iknofabrik didefinisikan sebagai unit substrat yang di dalamnya menunjukkan karagaman iknofosil (KI) tertentu yang didominasi oleh iknofosil dengan *behavior* tertentu yang terbentuk relatif bersamaan.

Enam ratus unit iknofabrik dilakukan pengamatan jenis iknotaksa, indeks bioturbasi (IB), keragaman iknofosil (KI), jumlah *behavior* (JB), kedalaman penetrasi (KP) dan diameter iknofosil (Dm), sedangkan pada 40 unit iknofabrik lainnya, hanya jenis iknotaksa yang diamati. Singkapan-singkapan terletak dipotongan jalan dan bukaan pembangunan perumahan. Lebar singkapan ber-kisar pada lebar 50 – 150 meter dan tinggi 7 – 10 meter. Total ke-tebalan singkapan yang

dipelajari adalah 398 meter dengan ke-tebalan antara 2,52 hingga 75,10 meter (Tabel 2.1). Singkapan-singkapan ini terletak di antara batugamping Batuputih berumur Langhian dan batugamping Stadion Palaran berumur Tortonian (Di Martino dkk., 2015). Jenis litologi penyusun singkapan terdiri dari batu pasir berbutir kasar hingga sangat halus, batulempung, batu bara dan batu gamping.



Gambar 2.1 Contoh peta sampel diambil dari Garmin Basecamp. Pola struktur merujuk pada Rustandi, dkk. (1995).

Tabel 2.1 Daftar koordinat singkapan batuan yang dipelajari

Kode	Nama Singkapan	Kode Singkapan	Tebal (meter)	Koordinat	
1	Palaran	PAL	10,20	E 512864	S 9935114
2	Tamansari-1	TAM-1	41,40	E 513912	S 9936483
3	Tamansari-2	TAM-2	75,10	E 513912	S 9936483
4	Mangkupalas	MAN	19,90	E 516584	S 9940186
5	Berambai-1	BER-1	44,30	E 522634	S 9963976
6	Berambai-2	BER-2	29,40	E 522947	S 9963925
7	Batuputih	BTP	5,30	E 513555	S 9948361
8	SMP-1	SMP	11,80	E 514345	S 9948476
9	Ardan	ARD	11,50	E 516005	S 9951169
10	Anggana-1	ANG-1	5,56	E 523459	S 9941689
11	Anggana-2	ANG-2	7,70	E 523471	S 9942081
12	Anggana-3	ANG-3	13,50	E 523343	S 9942242
13	Lingai	LNG	17,80	E 519933	S 9951733
14	Citraland	CTR	23,60	E 520358	S 9950724
15	Kantor Camat	CMT	15,70	E 521252	S 9935871
16	Sangasanga	SSG	10,80	E 521246	S 9934571
17	MT. Haryono*)	MTH	9,66	E 512598	S 9944865
18	Melati-1*)	MEL-1	8,50	E 511681	S 9934822
19	Melati-2*)	MEL-2	2,52	E 512228	S 9935269
20	Kesejahteraan*)	KES	34,05	E 519205	S 9948398

Keterangan : *) data sekunder dari Arifullah (2005)

Metode Identifikasi Iknofosil dan Kodefikasi Unit-unit Iknofabrik

Iknofosil lebih sering tersingkap sebagai potongan berbentuk bundar hingga elips. Bentuk bundar hingga elips menunjukkan sudut yang dibentuk burrow terhadap bidang singkapan. Besaran sudut yang dibentuk dapat diidentifikasi berdasarkan skema yang dibuat oleh Ekdale dkk. (1984). Besaran sudut yang dibuat oleh *burrow* terhadap bidang potong dapat ditentukan berdasarkan bentuk burrow pada singkapan. Dengan demikian orientasi umum iknofosil terhadap bidang lapisan, ada tidaknya percabangan dan kompleksitas morfologi iknofosil dapat diprediksi. Contoh iknofosil bercabang ditunjukkan oleh Gambar 2.1.

Gambar 2.2 Contoh percabangan pada *Thalassinoides*.

Merujuk pada Knaust (2012), identifikasi iknofosil didasarkan pada kriteria-kriteria: orientasinya terhadap bidang lapisan, bercabang atau tidak bercabang, morfologi umum, *burrow fill* (*active fill*/ *meniscate backfill* atau *passive fill*) dan ada tidaknya burrow lining. Setelah iknofosil dominan diketahui dalam satu unit iknofabrik, maka unit-unit iknofabrik dinamakan berdasarkan iknofosil dominan dengan kode tertentu. Suatu iknofosil dikatakan dominan di dalam satu unit iknofabrik jika iknofosil tersebut > 50% (Pickerill dan Narbonne, 1995; Miller, 2007). Kode yang dibuat ini bukanlah kode standar resmi. Kode ini dibuat untuk mempermudah dalam mengorganisir data. Misalnya unit iknofabrik yang berkode 03-Sk-13, menjelaskan: "03" adalah kode singkapan, "Sk" adalah kode yang menunjukkan *Skolithos* sebagai iknofosil dominan dan "13" menunjukkan iknofosil penyertanya misalnya *Ophiomorpha*.

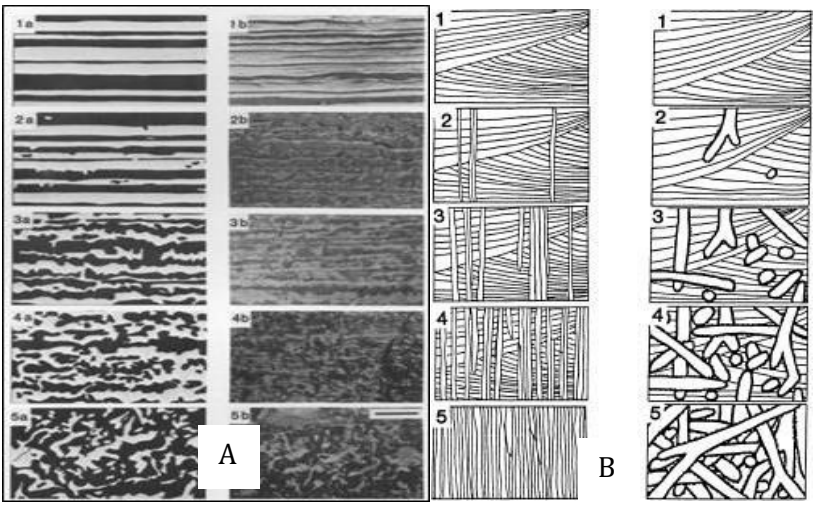
Metode Penentuan Indeks Bioturbasi (IB)

Bioturbasi adalah intensitas perubahan struktur sedimen primer akibat aktifitas fauna yang hidup di dalamnya (Bromley, 1996). Berdasarkan definisi bioturbasi tersebut, maka IB menunjukkan derajat intensitas perubahan oleh fauna terhadap substrat yang dapat dilihat dari persentase struktur sedimen primer yang masih dapat diamati (Droser dan Bottjer, 1986, 1989).

Pada dasarnya indeks bioturbasi menggambarkan derajat mobilitas organisme (Rhoads, 1975). Nilai IB menjadi penting karena sejumlah penelitian menunjukkan IB dapat memberikan informasi terkait kecepatan sedimentasi. Nilai IB yang kecil umumnya

berkorelasi dengan kecepatan sedimentasi yang rendah, sementara semakin besar nilai IB merefleksikan peningkatan kecepatan sedimentasi (Bromley, 1996; Ekdale dan Bromley, 1991; Taylor dkk., 2003). Selain itu nilai IB juga yang semakin tinggi merefleksikan semakin besarnya pengaruh asal laut (Dapples, 1942; Allen, 1965; Moore dan Scruton, 1957, Van Straaten, 1959; Howard dan Frey, 1975; Ekdale dkk.,1984; Arifullah, 2005; Hertweck dkk., 2005; Hauck dkk.,2009). Hingga saat ini hanya Droser dan Bottjer (1986, 1989) yang membuat skala derajat bioturbasi terstandar dalam bentuk skala IB. Karena praktis penggunaannya di lapangan dan belum ada pengembangan lebih lanjut (Morenco dan Bottjer, 2011), maka skala indeks bioturbasi dari Droser dan Bottjer (1986,1989) (Gambar I.4) adalah yang paling banyak digunakan dalam studi iknologi. Berikut kriteria indeks-indeks bioturbasi dari Droser dan Bottjer (1986, 1989):

1. Indeks 1 menunjukkan tidak adanya bioturbasi, struktur sedimen masih tidak termodifikasi.
2. Indeks 2 menunjukkan bioturbasi setempat-setempat, iknofosil terisolasi, Hampir 10% struktur sedimen telah telah dimodifikasi oleh organisme.



Gambar 2.3 Diagram skematis IB untuk menentukan IB di lapangan (A) skema didominasi oleh iknofosil berorientasi horisontal terhadap bidang lapisan (Droser dan Bottjer, 1986), (B) Diagram skematis IB yang didominasi oleh iknofosil berorientasi vertikal terhadap bidang lapisan (Droser dan Bottjer, 1989).

3. Indeks 3 menunjukkan 10 – 40 % struktur sedimen telah termodifikasi, iknofosil masih terlokalisir namun diantaranya ada yang saling tumpang tindih.
4. Indeks 4 menunjukkan sisa struktur sedimen masih dapat dikenali; 40 – 60 % Struktur sedimen telah dimodifikasi, iknofosil saling tumpang tindih dan kadang-kadang sulit dikenali.
5. Indeks 5 menunjukkan lapisan secara umum telah dimodifikasi, iknofosil Masih dapat dikenali, kemas sedimen belum tercampur, struktur sedimen sudah samar-samar.
6. Indeks 6, lapisan hampir atau telah terhomogenisasi, iknofosil sudah saling Tumpang tindih dan sulit dikenali.

Dengan kriteria indeks bioturbasi yang sama, skema tersebut dapat digunakan secara fleksibel pada unit iknofabrik yang berbeda (Droser dan Bottjer, 1986, 1989; Knaust, 2012). Pemanfaatan skema indeks bioturbasi tersebut menyesuaikan ukuran, variasi iknofosil yang diamati pada singkapan yang diobservasi (modifikasi dari Knaust, 2012).

Metode Menentukan Keragaman Iknotaksa (KI)

Keragaman iknotaksa (KI) adalah jumlah variasi iknotaksa yang ada dalam unit iknofabrik (Buatois dan Mángano, 2012). Karena fauna yang sama dapat menghasilkan lebih dari satu jenis iknofosil dan beberapa iknofosil dapat dihasilkan dari hasil aktifitas fauna tunggal (Ekdale dkk., 1984; Bromley, 1996), maka keragaman iknotaksa tidak ada kaitannya dengan keragaman fauna. Perbedaan interaksi-interaksi fauna dan substrat direfleksikan dengan KI. Dengan kata lain, keragaman iknotaksa mempresentasikan tingkat mobilitas fauna, oleh karenanya faktor-faktor yang mengontrolnya berbeda dengan faktor-faktor yang mengontrol keragaman spesies atau fosil tubuh (Rhoads, 1975).

Buatois dan Mángano (2013) dan Gingras dkk. (2011) mengemukakan bahwa keragaman iknotaksa merefleksikan derajat tekanan fisika-kimia dalam lingkungan pengendapan. Keragaman iknofosil yang tinggi menunjukkan kondisi lingkungan yang optimal bagi fauna untuk membuat kolonisasi, sedangkan KI yang rendah mengindikasikan kondisi lingkungan yang menekan (Gingras dkk., 2011; Buatois dan Mángano, 2013).

Keragaman iknotaksa yang rendah mengindikasikan kondisi lingkungan seperti *brackish*, kandungan oksigen yang rendah, energi sedimentasi yang tinggi (Buatois dan Mángano, 2011). Keragaman iknotaksa yang tinggi merefleksikan kondisi lingkungan yang stabil dan dapat diprediksi misalnya kondisi salinitas normal, kondisi oksigen yang cukup dan energi sedimentasi yang rendah (Buatois dan Mángano, 2013).

Contoh perhitungan KI misalnya satu unit iknofabrik terdiri dari *Skolithos, Polykladichnus* dan *Psilonichnus,* maka keragaman iknotaksanya adalah tiga. Keragaman iknofosil tidak memperdulikan sedominan apapun salah satu iknofosildi dalam satu unit iknofabrik.

Metode Penentuan Jumlah *Behavior* (JB)

Behavior didefinisikan sebagai perilaku dan kebiasaan organisme terhadap lingkungannya, untuk mempertahankan kondisi internal agar tetap konstan terhadap kondisi lingkungan eksternal yang berfluktuasi (Kappeler, 2012 dalam Vallon dkk., 2015). Dalam iknologi, jenis *behavior* terdapat dalam klasifikasi etologi Seilacher (1964) yang kemudian dikembangkan oleh Bromley (1996) dan terakhir oleh Vallon dkk. (2015). Sejumlah *behavior* yang terdiri dari *agrichnia, calichnnia, chemichnia, cubichnia, digestichnia, domichnia, ecdysichnia, fixichnia, fodinichnia, fugichnia,paschichnia, praedichnia* dan *repichnia*.

Semakin besar nilai JB, menunjukkan ragam strategi adaptasi organisme untuk bertahan hidup terhadap dinamika lingkungan sekitar. Semakin tinggi nilai JB maka sebagai indikasi pengaruh asal laut semakin besar, sedangkan semakin rendah nilai JB, menunjuk-kan pengaruh asal darat semakin besar (Gingras dkk., 2011).

Setelah jenis iknofosil diketahui, maka dapat diketahui tiga makna dari iknofosil yaitu (1) bagaimana binatang membuat iknofosil apakah dengan intrusi, kompresif, ekskavasi, *backfill,* penafsiran ini didasarkan pada data orientasi terhadap bidang lapisan (2) mengetahui arah umum pergerakan binatang, penafsiran ini didasarkan pada orientasi iknofosil terhadap bidang lapisan dan (3) lamanya jendela kolonisasi, penafsiran ini dilihat morfologi umum iknofosil (struktur simpel sampai kompleks).

Dari ketiga makna yang diperoleh tersebut, maka jenis *behavior* dapat ditentukan dengan merujuk pada klasifikasi etologi Seilacher, (1967). Misalnya *Ophiomorpha*, dapatdibuat dengan cara ekskavasi

dan/atau *backfill*. Jika *Ophiomorpha* dibuat dengan cara ekskavasi saja maka *behavior Ophiomorpha* adalah *domichnia*. Ber-beda jika pada isi *burrow* nya terlihat struktur *meniscate backfill*, maka *behavior* nya menjadi dua yaitu *domichnia* dan *fodonichnia*.

Metode Pengukuran Kedalaman Penetrasi (KP)

Organisme infauna melakukan penetrasi ke dalam substrat dengan kedalaman yang berbeda-beda (Pearson dan Rosenberg, 1978; Ekdale dkk., 1984; Bromley, 1996; Virtasalo dkk., 2011). Sebagai akibat dari faktor paleoekologi (Ausich dan Bottjer, 1982; Bambach, 1983; Bromley dan Ekdale, 1986; Bromley, 1996). Menge-tahui kedalaman penetrasi iknofosil berguna untuk menafsirkan fluktuasi salinitas pada zona pasang surut (Rhoads, 1975). Khusus pada lingkungan transisi semakin dalam penetrasi maka semakin tinggi fluktuasi salinitas (Sanders dkk., 1965) dan fluktuasi tempe-ratur (Johnson, 1965).

Selain itu kedalaman penetrasi suatu iknofosil berguna dalam menafsirkan batas antara zona reduksi dan oksidasi di bawah substrat (Savrda dan Bottjer, 1987; Virtasalo dkk., 2011). Semakin dalam penetrasi maka batas antara zona reduksi dan oksidasi semakin dalam demikian juga sebaliknya.

Metode pengukuran KP merujuk pada Kotake (1993) dan Locklair dan Savrda (1998). Pengukuran KP dilakukan dengan cara mencari iknofosil yang *burrow fill* nya terisi sebagian atau seluruh-nya oleh sedimen dari lapisan di atasnya. Panjang iknofosil yang terisi oleh sedimen dari lapisan sedimen tersebut adalah kedalaman penetrasi dari iknofosil.

Metode Pengukuran Diameter Iknofosil (Dm)

Diameter iknofosil menunjukkan ukuran relatif fauna yang membuat jejak. Terdapat keterkaitan antara ukuran fauna dengan kandungan oksigen dalam habitatnya (Rhoads dan Morse, 1971). Oleh karenanya Savrda dan Bottjer (1987) telah menggunakan variabel Dm untuk merekonstruksi siklus paleoksigen. Lebih jauh lagi, diameter iknofosil dapat memprediksi salinitas dan temperatur (Gingras dkk., 2011).

Sebelum melakukan pengukuran diameter iknofosil, maka determinasi *burrow lining* dan *burrow fill* diperlukan. *Burrow lining* dapat menjadi tebal karena proses diagenesis (Savrda, 2007), se-

hingga diameter iknofosil menjadi lebih lebar. Sedangkan pengukuran diameter iknofosil (misalnya, *shaft* dan *tunnel*) dilakukan pada bagian *burrow fill* (Weist dkk., 2015). Iknofosil yang dijumpai di lapangan tidak selalu berbentuk lingkaran, namun dapat pula berbentuk elips akibat besaransudut yang dibuat oleh *burrow* terhadap bidang potong singkapan atau akibat proses kompaksi (Ekdale dkk., 1984).

Kolom Stratigrafi Singkapan dan Arah Arus Purba

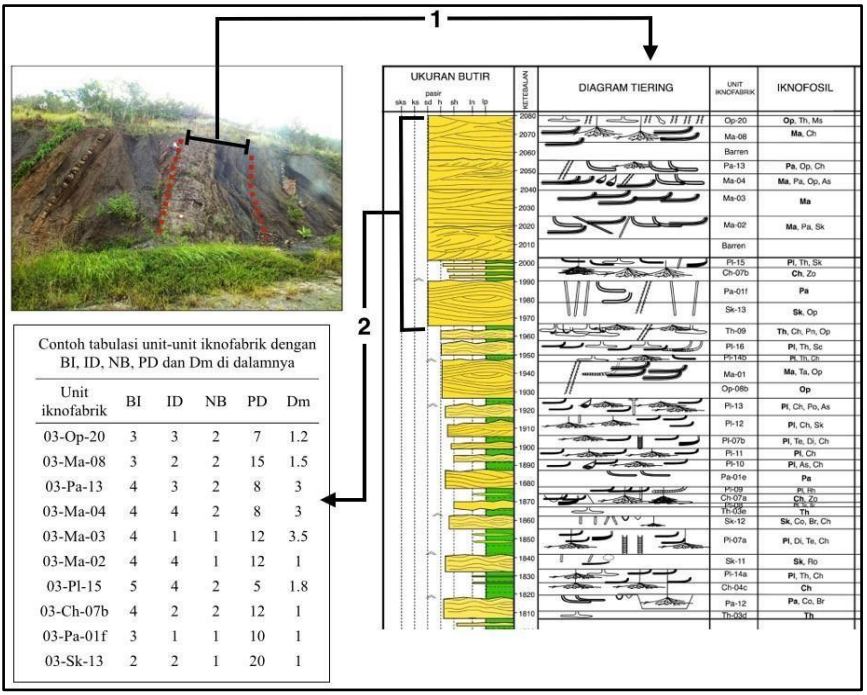
Deskripsi ukuran butir dan struktur sedimen digambarkan dalam bentuk kolom stratigrafi singkapan. Di dalam kolom stratigrafi singkapan tersebut juga terdapat unit-unit iknofabrik berkode yang merepresentasikan kumpulan iknofosil, IB, KI, JB, KP dan Dm. Struktur sedimen yang menjadi objek pengukuran untuk kepenting-an analisis arus purba adalah struktur silang siur dan gelembur gelombang. Pengukuran arah arus purba baru pada struktur silang siur dapat dilakukan setelah memastikan bentuk tiga dimensinya. Pada struktur gelembur gelombang, yang diukur terlebih dahulu adalah arah kelurusan puncak struktur gelembur gelombang dan arah arus purbanya tegak lurus terhadap arah kelurusan puncak gelembur gelombang. Jika puncak struktur gelembur gelombang simetri, maka arah umum arus adalah bimodal dan jika puncak strukturgelembur gelombang asimetri, maka arah umumarus adalah unimodal.

Secara ringkas, alur tahapan pengumpulan data adalah pembuatan kolom stratigrafi singkapan yang di dalamnya terdapat unit-unit iknofabrik berkode. Setiap unit iknofabrik menunjukkan asosiasi-asosiasi iknofosilnya dan nilai-nilai IB, KI, JB, KP dan Dm. Untuk mempermudah analisis lanjut, kumpulan unit iknofabrik ber-kode tersebut dibuat tabulasinya. Sebagai gambaran, Gambar I.5 adalah contoh kolom stratigrafi singkapan TAM-2 beserta tabulasi unit-unit iknofabrik berkode 3 sebagai kode singkapanTAM-2.

Metode pengelompokan iknofosil

Karena iknofosil terbentuk secara insitu, yang merupakan indikator sensitif terhadap perubahan paleoekologi (Howard dan Frey, 1975; Rhoads, 1975; Byers, 1982; Ekdale, 1988; Bromley, 1996; Frey dkk., 1990; Goldring, 1993) maka berpotensi mengungkap proses-proses di dalam sistem pengendapan. Pengungkapan potensi tersebut dimulai dengan cara melakukan pengelompokan iknofosil.

Pengelompokan iknofosil yang dimaksud adalah mengelompokan iknotaksa-iknotaksa menjadi asosiasi-asosiasi iknofosil. Merujuk pada Bromley (1975, 1996), kelompok iknotaksa dalam satu unit iknofabrik kemudian dikelompokan menjadi sub-asosiasi iknofosil dan dilanjutkan pengelompokan menjadi asosiasi-asosiasi iknofosil. Asosiasi-asosiasi iknofosil yang dihasilkan adalah rangkuman iknofosil dalam skala daerah penelitian.



Contoh tabulasi unit-unit iknofabrik dengan BI, ID, NB, PD dan Dm di dalamnya

Unit iknofabrik	BI	ID	NB	PD	Dm
03-Op-20	3	3	2	7	1.2
03-Ma-08	3	2	2	15	1.5
03-Pa-13	4	3	2	8	3
03-Ma-04	4	4	2	8	3
03-Ma-03	4	1	1	12	3.5
03-Ma-02	4	4	1	12	1
03-Pl-15	5	4	2	5	1.8
03-Ch-07b	4	2	2	12	1
03-Pa-01f	3	1	1	10	1
03-Sk-13	2	2	1	20	1

Gambar 2.4 Alur pemrosesan data di studio. (1) hasil pengamatan digambarkan dalam kolom stratigrafi singkapan yang di dalamnya terdapat unit- unit iknofabrik berkode. (2) hasil pengamatan kemudian dibuattabulasinya.

Kode pada unit-unit iknofabrik berguna dalam proses pengelompokan iknofosil. Berdasarkan kode tersebut, maka unit-unit ikonofabrik yang iknotaksa dominannya sama dikelompokkan menjadi satu asosiasi iknofosil yang sama.Misalnya unit-unit iknofabrik yang berkode Sk-01, Sk-02, Sk-03 adalah unit-unit iknofabrik yang didominasi oleh *Skolithos*. Konsekuensinya Sk-01, Sk-02, Sk-03 dapat dikelompokan menjadi asosiasi *Skolithos*. Asosiasi iknofosil yang telah diidentifikasi dapat diketahui probabilitasnya. Probabilitas asosiasi-

asosiasi iknofosil tersebut divisualisasikan dalam bentuk histogram Pareto yang menggambarkan histogram yang mengurut-kan mulai dari asosiasi iknofosil dengan probabilitas tertinggi hingga yang terendah.

Prinsip Pareto diusulkan oleh ekonom Italia Vilfredo Pareto pada tahun 1906 yang mengemukakan bahwa 80% dari tanah di Italia dimiliki oleh 20% dari populasi yang kemudian menjadi prinsip 80/20. Dengan kata lain, yang sedikit mendominasi yang banyak. Prinsip Pareto ini telah menjadi hukum alam (Koch, 2013). Perbandingan 80/20 hanyalah untuk menunjukkan adanya kesenjangan, dengan demikian perbandingan 60/40, 70/30, 90/10 atau perbandingan berapapun dapat diterapkan yang terpenting adalah menunjukkan ketidakseimbangan (Sobeca Limited, 2010). Penulis melihat bahwa *cutoff* 60 % sampai dengan 90% kumulatif variansi untuk memilih komponen utama dalam Jollife (2002) adalah contoh lain dari penerapan prinsip Pareto ini.

Penerapan prinsip Pareto dalam studi iknofosil ini adalah dengan membuat histogram yang mengurutkan dari probabilitas terbesar menuju probabilitas terkecil. Jika prinsip Pareto adalah yang sedikit mendominasi yang banyak dan diterapkan dalam studi iknofosil ini. maka hanya segelintir asosiasi iknofosil yang mendominasi dari sekian banyak ragam asosiasi iknofosil yang ditemukan. Dengan kata lain, frekuensi kumulatif kehadiran segelintir asosiasi iknofosil tertentu lebih besar daripada frekuensi kumulatif kehadiran selain segelintir iknofosil tersebut.. Pada kondisi ini penentuan *cutoff* pada histogram Pareto adalah pada rentang frekuensi kumulatif 60% sampai dengan 90% yang merujuk pada Jollife (2002). Dengan demikian histogram Pareto bermanfaat untuk mencari iknofosil yang dominan.

Histogram Pareto ini juga dapat digunakan untuk skala yang lebih kecil yaitu mengetahui varian dominan dari asosiasi-asosiasi iknofosil, misalnya asosiasi *Skolithos* dapat muncul sebagai Sk-01, Sk-02, Sk-03 dan seterusnya, dengan histogram Pareto dapat diketahui varian-varian asosiasi iknofosil yang palingsering muncul.

Metode Perhitungan Probabilitas IB, KI, JB, KP dan Dm

Ide perhitungan probabilitas IB, KI, JB, KP dan Dm ter-inspirasi dari histogram-histogram IB yang dibuat oleh Bottjer dan Droser (1991). Bottjer dan Droser (1991) melakukan perhitungan

probabilitas IB untuk mengetahui nilai IB muncul terbanyak paik pada skala cekungan maupun skala lingkungan pengendapan. Me-tode tersebut juga untuk membandingkan lingkungan pengendapan di dalam satucekungan, beberapa cekungan dalam umur yang sama atau cekungan-cekungan yang berbeda umur.

Walaupun Bottjer dan Droser (1991) hanya menggunakan variabel IB, variabel-variabel lainnya seperti KI, JB, KP dan Dm dapat diberlakukan dengan cara yang sama (Arifullah 2019). Hal ini di-sebabkan variabel-variabel IB, KI, JB, KP dan Dm adalah variabel-variabel intrinsik unit ikonofabrik. Probabilitas IB, KI, JB, KP dan Dm ini akan ditunjukkan dalam bentuk histogram-histogram.

Sebelum dilakukan perhitungan probabilitas, maka satuan unit variabel-variabel iknofabrik tersebut perlu diseterakan karena terdapat perbedaan satuan unit antara IB, KI,dan JB di satu sisi dan KP dan Dm di sisi lainnya. Nilai-nilai KP dan Dm kemudian dibuat kelas-kelas dengan lebar tertentu sebagaimana yang lazim dalam metode statistik (Sullivan, 2018).

Metode Analisis Komponen Utama (KU)

Jika dihadapkan pada sejumlah besar sampel dalam hal ini adalah unit-unit iknofabrik dengan variabel-variabelnya seperti IB, KI, JB, KP dan Dm, maka terdapat variabel-variabel yang tidak diperlukan. Kemungkinannya adalah membuang variabel-variabel yang diamati sehingga variabel nya menjadi lebih sedikit. Persoalan-nya adalah bagaimana memilih variabel-variabel yang representatif. Cara pertama adalah dengan mempertahankan satu variabel dan buang variabel lainnya dan menghitung rata- rata tertimbang yang bergantung pada pemberian bobot pada setiap variabel, namun demikian cara-cara tersebut bersifat subjektif (Keho, 2012).

Untuk mengatasi permasalahan di atas adalah dengan mem-biarkan kumpulan data mengungkap bobot variabel-variabelnya yang relevan dengan menggunakan metode PCA (Principle compo-nent analysis) (Keho, 2012). Analisis komponen utama (PCA) adalah metode yang digunakan untuk memberikan gambaran hubungan hubungan antara objek dan variabel-variabel. PCA memvisualisasi-kan objek yang di dalamnya terdapat lebih dari tiga variabel. PCA juga memungkinkan untuk mempelajari dan memahami sistem, membantu kita untuk melihat sistem-sistem dalam dua atau tiga dimensi (Monfreda, 2012). Singkatnya, PCA tetap mempertahankan struktur

asli data walaupun dimensinya disederhanakan (Jollife, 2002).

Analisis komponen utama dalam studi iknofosil telah diterapkan oleh Arifullah dkk., (2017ab, 2018, 2019). Perangkat lunak yang digunakan dalam analisis komponen utama adalah PAST-3. Setiap unit iknofabrik memiliki nilai variabel- variabel IB, KI, JB, KP dan Dm. Jika kelima variabel itu sebagai sumbu-sumbu koordinat, maka setiap unit iknofabrik diproyeksikan pada lima sumbu koordinat. Dengan menerapkan PCA variabel-variabel iknofabrik tersebut direduksi dan menghasilkan komponen-komponen baru yang disebut sebagai komponen utama (KU).

Komponen utama yang dipilih merujuk pada Jollife (2002) yaitu minimal *cutoff* 60 % sampai dengan 90% kumulatif variansi data atau KU yang memiliki *eigenvalue* minimal 1 (Kaiser, 1960). Komponen utama 1 (KU-1) memiliki *eigenvalue* lebih besar daripada *eigenvalue* komponen utama 2 (KU-2). Komponen utama 2 (KU-2) memiliki *eigenvalue* lebih besar daripada komponen utama 3 (KU-2) dan seterusnya. Jika *eigenvalue* adalah nilai yang menunjukkan seberapa besar pengaruh komponen- komponen utama terhadap pembentukan karakteristik sebuah vektor atau matriks, maka pengaruh KU-1 lebih besar daripada KU-2. Pengaruh KU-2 lebih besar dari pengaruh KU-3 dan seterusnya.

Setiap komponen baru terdapat variabel-variabel iknofabrik yang memiliki bobot yang berbeda-beda sesuai dengan nilai koefisien korelasinya terhadap komponen utama (KU). Korelasi antara variabel-variabel iknofabrik dengan komponen- komponen baru tersebut digambarkan dalam bentuk histogram. Jika nilai koefiesien korelasi > 0,75, 0,75 – 0,5 dan 0,5 – 0,3, maka masing-masing merepresentasikan variabel-variabel iknofabrik berkorelasi dengan "kuat," "sedang," dan "lemah" terhadap komponen utamanya (Liu dkk., 2003). Besaran koefisien korelasi variabel-variabel terhadap KU digunakan sebagai dasar dalam menafsirkan KU (Liu dkk., 2003; Keho, 2012).

Komponen-komponen baru yang terpilih adalah sumbu-sumbu baru diagram kartesius. Setiap unit iknofabrik memiliki nilai di setiap komponen yang disebut dengan skor. Sebaran skor dengan sumbu-sumbu komponen-komponen baru tersebut membentuk diagram skor. Diagram skor menyajikan garis *biplot* IB, KI, JB, KP, Dm. Garis *biplot* adalah garis regresi bergradien tertentu dengan intercept nol. Garis *biplot* setiap variabel iknofabrik menggambarkan kecenderu-

ngannya terhadap sumbu KU. Semakin kecil sudut yang dibentuk oleh garis *biplot*, maka variabel iknofabrik itu semakin korelatif dengan KU. Garis *biplot* adalah vektor, maka garis-garis tersebut berguna dalam membandingkan besaran nilai-nilai variabel ikno-fabrik antara satu unit iknofabrik dengan unit iknofabrik lainnya.

Metode Klasterisasi Skor KU

Zonasi skor-skor unit iknofabrik didasarkan atas dua kriteria berjenjang yaitu kriteria interval umur dan posisi geografis. Setiap kelompok interval umur, skor-skor unit iknofabrik diklaster berdasarkan kriteria posisi geografis singkapan-singkapan yang masing-masing kelompok berasosiasi dengan asosiasi iknofosil tertentu. variabel iknofabrik yang menyolok (misalnya IB), proses sedimentasi serta arah umum arus purba yang khas.

Rata-rata dan standar deviasi skor KU setiap zonasi singkapan dilakukan perhitungan. Dengan demikian dapat dibandingkan antara besaran skor KU setiap zona. Setiap zonasi singkapan juga dilakukan perhitungan probabilitas asosiasi-asosiasi iknofosil yang berkembang di dalamnya. Dengan prinsip Pareto, maka dapat diidentifikasi asosiasi iknofosil dominannya. Variasi rata-rata dan standar deviasi skor KU yang didapatkan akan digunakan untuk analisis paleoekologi.

Perhitungan rata-rata dan standar deviasi skor KU dilakukan juga di setiap singkapan. Rata- rata skor KU digunakan lebih jauh untuk melakukan pemetaan distribusi skor KU secara lebih rinci. Jika hasil analisis komponen utama menghasilkan dua KU, maka peta yang dibuat ada dua setiap interval umur.

Metode Pemetaan Rata-rata Skor KU

Sebagaimana yang telah dijelaskan, rata-rata skor KU setiap singkapan digunakan untuk melakukan pemetaan pola distribusi rata-rata skor KU. Pemetaan ini dilakukan untuk mendapatkan gambaran regional distribusi skor KU. Pembuatan peta ini juga diintegrasikan dengan arah umum arus purba setiap singkapan. Dengan demikian, dapat diperoleh hubungan antara pola distribusi skor KU dan arah umum arus purbanya.

Metode Analisis Fasies

Identifikasi jenis litologi dan struktur sedimen pada lapisan batuan sedimen. Litofasies yang dihasilkan diberi kode litofasies dengan merujuk pada kode litofasies Arifullah (2005) dan Miall (1985).

Metode Analisis Arah Arus Purba

Hasil pengukuran arah arus purba di lapangan kemudian dikoreksi untuk mengembalikan posisi semula sebelum lapisan batuan terdeformasi. Metode koreksi tersebut dapat menggunakan stereonet dengan menggunakan perangkat lunak *Stereononet3D*.

Sintesis

Sintesis model sistem pengendapan dilakukan dengan cara menyelaraskan hasil penafsiran paleoekologi asosiasi-asosiasi iknofosil dan variabel-variabel iknofabrik sehingga menghasilkan model sistem pengendapan yang mencakup model paleogeografi, model paleoekologi, model elemen-elemen pengendapan dan stratigrafi umum yang berasosiasi dengan asosiasi iknofosil dan komponen iknofabrik.

BAB 3

Iknotaksa & Asosiasi-Asosiasi Iknofosil

A. Iknotaksa

Sekilas *Al* Terdapat 34 iknotaksa yang teridentifikasi di lapangan yaitu; *Alcyonidiopsis, Arenicolites, Bergaueria, Chondrites, Conichnus, Cylindrichnus, Diplocraterion,* Fugichnia, *Gyrolithes, Heimdallia, Helminthoidichnites, Macanopsis, Macaronichnus, Monocraterion, Ophiomorpha, Paleophycus, Phycodes, Phycosiphon, Planolites, Platicytes, Polykladichnus, Psilonichnus, Rhizocorallium, Rosellia, Trackway, Schaubcylindrichnus, Scolicia, Siphonichnus, Skolithos, Taenadium, Teichichnus, Thalassinoides, Zoophycus*. Deskripsi semua iknofosil tersebut akan ditampilkan dalam pen-jelasan berikut.

Alcyonidiopsis

Sekilas *Alcyonidiopsis* mirip dengan *Ophiomorpha*. Namun demikian keduanya dapat dibedakan berdasarkan ada tidaknya *burrow lining* dan pentingnya identifikasi kompleksitas arsitektur iknofosil secara keseluruhan. Secara umum struktur *Alcyonidiopsis* adalah simpel, berorientasi horisontal terhadap bidang lapisan, *epireliefconcave*, tidak bercabang atau bercabang, silindrik, *active fill*, tanpa *burrow lining.* Untuk mencari ciri khas dari *Alcyonidiopsis* terdapat bentuk bekas cetakan pelet di dindingnya (Gambar 3.1). Etologi *Alcyonidiopsis* ditafsirkan sebagai *fodonichnia.* Pada penelitian sebelumnya menunjukkan *Alcyonidiopsis* dibuat oleh *deposit feeder* yaitu *annelids* (Pickerill dan Narbonne, 1995), *polychaetes* (Pemberton dan Frey, 1982). Selain itu penelitian Pickerill dan

Narbonne (1995) juga menunjukkan *Alcyonidiopsis* berasosiasi sedilangkan

Gambar 3.1 *Alcyonidiopsis* yang diidentifikasi di singkapan TAM-2.

Arenicolites

Arenicolites terhadap bidang lapisan adalah berorientasi vertikal. Tersingkap secara *full relief,* tidak bercabang, *shaft* berbentuk huruf U (Gambar 3.2.A), *passive fill*, tanpa *burrow lining.* Kedua *tube* dapat berbentuk silindris atau berbentuk *funnel*. Arenicolites kadang tersingkap seperti *Psilonichnus*, karena hanya salah satu *shaft*-nya saja yang tersingkap sehingga menunjukkan seperti huruf J (Gambar 3.2.B).

Gambar 3.2 *Arenicolites* di singkapan batuan. A) *Arenicolites* di singkapan KES (Arifullah, 2005) yang menunjukkan dua tube berbentuk huruf U; B) *Arenicolites* di singkapan SMP, sekilas hanya dibentuk oleh satu tube seperti huruf J, namun jika ditelusuri maka iknofosil tersebut berbentuk huruf U.

Hanya dengan melacak kemenerusan *shaft* nya maka dapat diketahui apakah berbentuk huruf J atau U. Etologi *Arenicolites* ditafsirkan sebagai *domichnia. Arenicolites* dibuat oleh *suspension feeder* yaitu *polychaete* dan *amphipod crustaceans* (Gingras dkk., 2008). Hasil penelitian sebelumnya menunjukkan *Arenicolites* ber-kembang mulai dari darat hingga laut dalam yang berasosiasi dengan kondisi rezim aliran tinggi (Knaust, 2017).

Asterosoma

Asterosoma berorientasi horisontal terhadap bidang lapisan, tersingkap secara full relief, bercabang, berbentuk radial, passive fill, dengan burrow lining. Tampilan Asterosoma sering dikacaukan dengan Thalassinoides. Ketika intensitas bioturbasi yang Thalassinoides rendah, maka struktur utuh Thalassinoides tidak tersingkap. Kondisi tersebut berpeluang membingungkan dalam membedakan antara Asterosoma dan Thalassinoides. Hanya dengan mengamati burrow fill secara lebih rinci dapat dibedakan antara Asterosoma dan Thalassinoides

Etologi *Asterosoma* ditafsirkan sebagai *fodonichnia.* Referensi menunjukkan bahwa *Asterosoma* dibuat oleh *deposit feeder* yaitu *polychaete* (Bromley, 1996). Asosiasi lingkungan pengendapan *Asterosoma* mulai dari dari darat hingga laut dalam (Knaust, 2017).

Gambar 3.3 *Asterosoma* yang diidentifikasi di singkapan TAM-2.

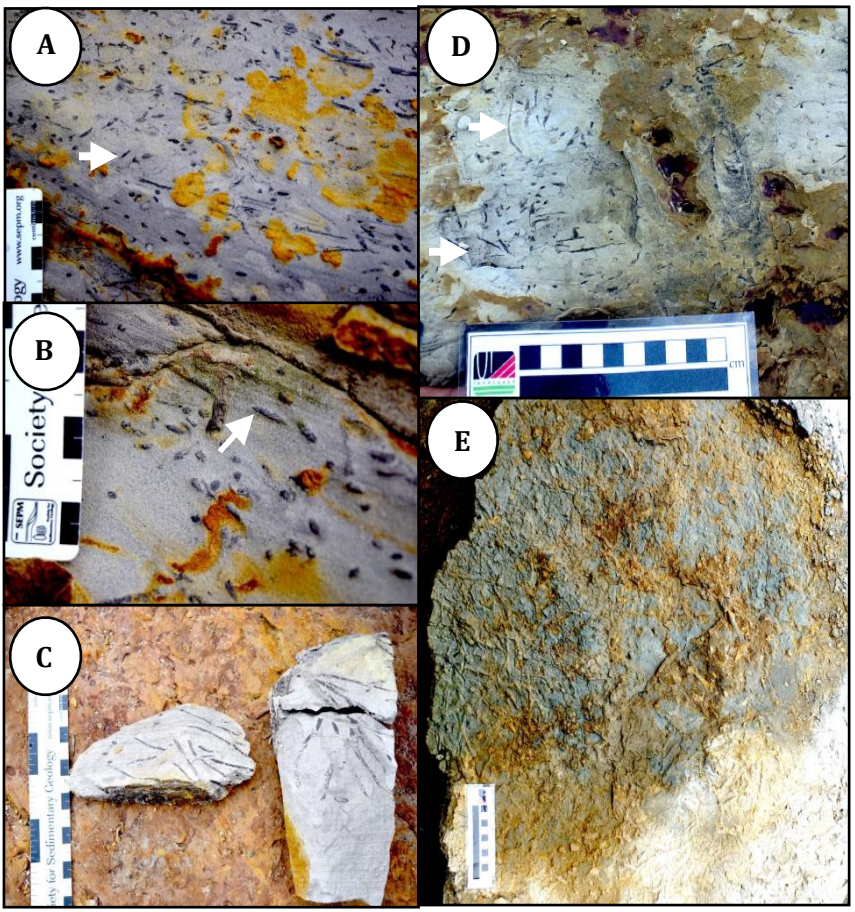
Bergaueria

Bergaueria berorientasi vertikal terhadap bidang lapisan, tersingkap secara *epirelief*, tidak bercabang, berbentuk sumbat botol, *passive fill*, tanpa *burrow lining.* Hanya mendasarkan pada pengamatan sekilas pada morfologinya, *Bergaueria* cukup sulit dibedakan dengan *Conichnus*. Pembedanya adalah tekstur internal *burrow fill*-nya. Tekstur internal *Bergaueria* tidak menunjukkan multi lamina seperti huruf U. Etologi *Bergaueria* ditafsirkan sebagai *cubichnia.* Bromley (1996) menjelaskan bahwa *Bergaueria* dibuat oleh anemon laut. *Bergaueria* berasosiasi dengan sedimen laut dangkal (Knaust, 2017) dan sedimen laut dalam (Książkiewicz, 1977).

Gambar 3.4 *Bergaueria* yang diidentifikasi di singkapan TAM-2.

Chondrites diopsis

Chondrites termasuk dalam iknofosil berstruktur kompleks yang terdiri dari shaft dan tunnel (Gambar 3.5). Strukturnya berorientasi vertikal dan horisontal terhadap bidang lapisan, tersingkap secara *full relief*, berbentuk seperti akar, *active fill*, tanpa *burrow lining.* Warna *burrow fill* selalu menunjukan warna hitam kontras dengan warna batuan tempat iknofosil ini berada. Etologi *Chondrites* ditafsirkan sebagai *fodonichnia* dan *domichnia.* Penelitian pada lingkungan pengendapan modern menunjukkan *Chondrites* dibuat oleh *annelids* (Hertweck dkk., 2007) dan *sipunculans* (Simpson, 1956). *Chondrites* dapat dijumpai mulai dari laut dangkal (Hertweck dkk., 2007) hingga laut dalam (Bromley dan Ekdale, 1984). Hasil penelitian sedimen laut dalam, (Bromley dan Ekdale (1984) menyim-pulkan bahwa Chondrites diasosiasikan dengan kondisi anoksik.



Gambar 3.5 *Chondrites* di singkapan batuan. A) *Chondrites* di dalam lapisan singkapan CMT yang menunjukkan warna yang kontras dengan batuan sekitarnya; B) *close up Chondrites* dari singkapan CMT; C) potongan batuan yang menunjukkan struktur seperti akar *Chondrites* dari singkapan CMT; D) *Chondrites* dari singkapan TAM-1 yang menunjukkan *shaft* dan *tunnel* yang membentuk struktur seperti akar; E) *tunnel Chondrites* di bidang lapisan dari singkapan BTP.

Conichnus

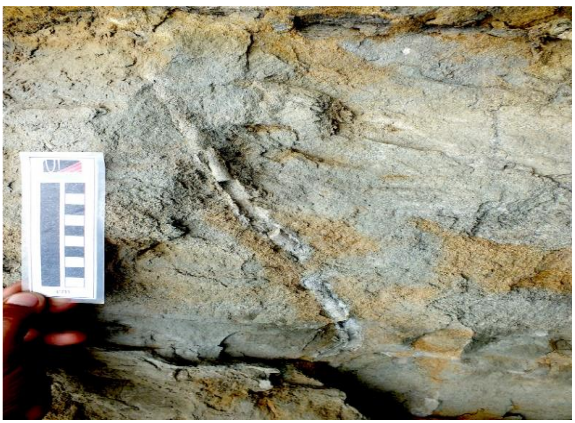
Conichnus berorientasi vertikal terhadap bidang lapisan, tersingkap secara *epirelief*, tidak bercabang, multi lamina seperti huruf U di dalam *burrow fill*- nya, *passive fill*, tanpa *burrow lining* (Gambar 3.6)

Gambar 3.6 *Conichnus* yang diidentifikasi di singkapan LNG. Terdapat multi lamina di dalam struktur *Conichnus.*

Etologi *Conichnus* ditafsirkan sebagai *domichnia.* Penelitian oleh Frey dan Howard (1981) menunjukkan bahwa kemungkinan *Conichnus* dibuat oleh *anemon laut*. *Conichnus* diketahui dijumpai di laut dangkal (Frey dan Howard, 1981), berasosiasi dengan rezim aliran tinggi, suplai sedimentasi tinggi dan substrat yang labil (Abad dan Pendón, 2006).

Cylindrichnus

Cylindrichnus berorientasi vertikal terhadap bidang lapisan, tersingkap secara *full relief,* tidak bercabang, morfologinya berbentuk huruf U, *passive fill*, dengan *burrow lining* (Gambar 3.7).

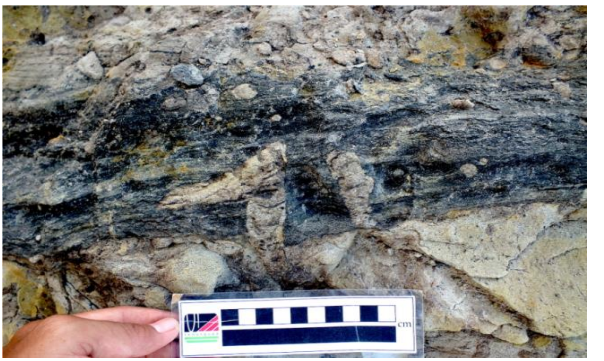


Gambar 3.7 *Cylindrichnus* pada singkapan BTP. *Burrow lining* terlihat dengan jelas.

Etologi *Cylindrichnus* ditafsirkan sebagai *domichnia. Cylindrichnus* dibuat oleh *polychaete* (*terebellids*) (Dashtgard dkk., 2008), *holoturians* (Ayranci dan Dashtgard, 2013). *Cylindrichnus* dijumpai di sistem *shoreface* dengan rezim energi rendah hingga sedang (Fürsich, 1974) dan rezim energi tinggi (Frey, 1990), pada sistem estuaria pada kondisi lingkungan *brackish* (MacEachern dan Gingras, 2007) dan *delta front* (Tonkin, 2012).

Diplocraterion

Diplocraterion berorientasi vertikal terhadap bidang lapisan, tersingkap secara *full relief,* tidak bercabang, morfologinya berbentuk huruf U, *active fill (spreiten)* di antara dua *shaft* nya (Gambar 3.8), tanpa *burrow lining.* Identifikasi *Diplocraterion* sering dikacaukan dengan *Rhizocorallium.* Perbedaan kedua iknofosil tersebut adalah bagaimana orientasinya terhadap bidang lapisan. *Rhizocorallium* selalu berorientasi horisontal terhadap bidang lapisan.



Gambar 3.8 *Diplocraterion* pada singkapan TAM-2. Dua *shaft* yang membentuk seperti huruf U (panah merah) dan *spreiten* di antara keduanya (panah putih).

Etologi *Diplocraterion* ditafsirkan sebagai *domichnia.* Gingras dkk. (2012) telah mengidentifikasi bahwa *Diplocraterion* dibuat oleh *polychaete* dan *crustecean*. *Diplocraterion* dapat dijumpai di laut dangkal yang berasosiasi dengan sistem pasang surut (Gingras dkk. 2012) sampai laut dalam (Hubbard dan Shultz, 2008). Penelitian sebelumnya oleh Goldring (1964) telah menunjukkan bahwa *Diplocraterion* dapat menjadi indikator proses erosi dan pengendapan yang silih berganti yang dapat diamati dari pola *spreiten*-nya.

Fugichnia

Fugichnia adalah etologi ikofosil. Hingga saat ini ahli iknologi tidak memberikan nama khusus secara bersistem untuk iknofosil dengan etologi *fugichnia*. *Fugichnia* berorientasi vertikal terhadap bidang lapisan, tersingkap secara *full relief,* berbentuk multi lamina berbentuk huruf U atau V, tanpa *burrow lining* (Gambar 16). Secara umum *fugichnia* adalah indikator sedimentasi yang cepat (Bromley, 1996).

Gambar 3.9. *Fugichnia* singkapan PAL Terlihat multi lamina berbentuk huruf V.

Gyrolithes

Gyrolithes berorientasi vertikal terhadap bidang lapisan, tersingkap secara *full relief,* tidak bercabang, berbentuk spiral, *active fill (spreiten)*, tanpa *burrow lining.* Etologi *Gyrolithes* ditafsirkan sebagai *domichnia.*

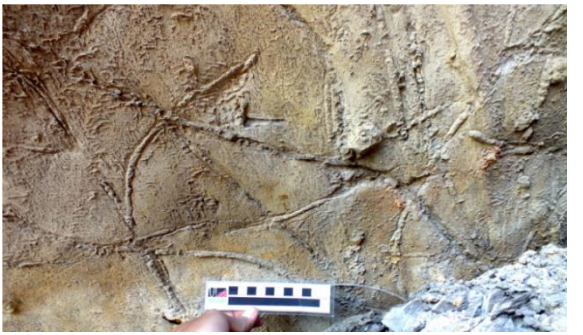
Gyrolithes dibuat oleh *polychaetes* (Howard dan Frey, 1975). *Gyrolithes* dijumpai di *distributary channel* delta Mahakam modern (Arifullah, 2005). *Gyrolithes* juga dapat menjadi indikator zona transisi yang berasosiasi dengan lingkungan yang salinitasnya berflukutasi (Beynon dan Pemberton, 1992; Netto dkk., 2007).

Heimdallia

Heimdallia berorientasi vertikal terhadap bidang lapisan, tersingkap secara *full relief,* tidak bercabang, berbentuk huruf J yang berjajar, *active fill (spreiten)*, tanpa *burrow lining.* Etologi *Heimdallia* ditafsirkan sebagai *fodonichnia.* Hasil penelitian Buckman (1996) menunjukkan bahwa *Heimdallia* berasosiasi dengan laut dangkal.

Helminthoidichnites

Helminthoidichnites berorientasi horisontal terhadap bidang lapisan, tersingkap secara *hyporelief*, *trails*, *unary*, *tube*-nya lurus (Gambar 3.10). Etologi *Helminthoidichnites* ditafsirkan sebagai *rapichnia.* Penelitian sebelumnya oleh Buatois dan Mángano (2012) menunjukkan bahwa *Helminthoidichnites* berasosiasi dengan laut dangkal.



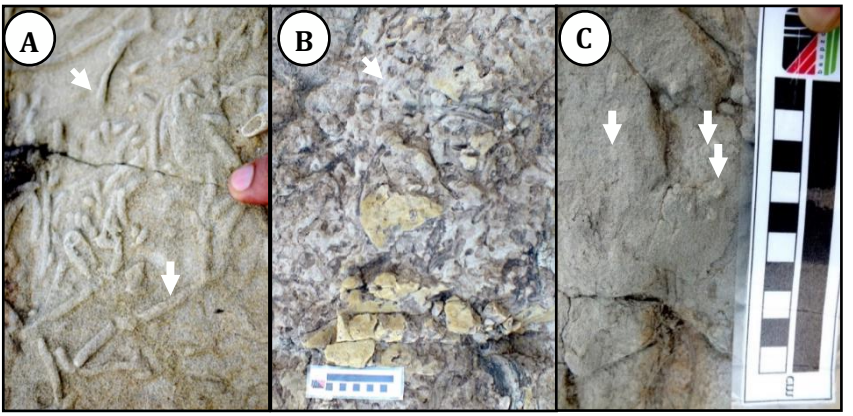
Gambar 3.10 *Helminthoidichnites* sebagai *hiporelief* pada singkapan TAM-2.

Macanopsis

Macanopsis berorientasi vertikal terhadap bidang lapisan, *full relief,* tidak bercabang, silindrik dan cembung di bagian bawah, *passive fill*, tanpa *burrow lining.* Etologi *Macanopsis* ditafsirkan sebagai *domichnia.* Hingga saat ini fauna yang membuat *Macanopsis* belum diketahui. Belum ada referensi yang meyakinkan terkait asosiasi lingkungan pengendapan *Macanopsis*. Dengan ditemukannya *Macanoposis* di daerah penelitian, telah menjadikannya sebagai salah satu iknofosil yang berasosiasi dengan laut dangkal.

Macaronichnus

Macaronichnus berorientasi horisontal terhadap bidang lapisan, tersingkap baik secara *epirelief* dan/atau *full relief*, walaupun saling tumpang tindih tapi bukan berarti membentuk percabangan, silindrik, *active fill*, terdapat *burrow lining* (Gambar 3.11). Etologi *Macaronichnus* ditafsirkan sebagai *fodonichnia.* Penelitian terhadap *Macaronichnus* menunjukkan bahwa iknofosil ini dibuat oleh *Travisia japonica* (Seike dkk., 2011). *Macaronichnus* dijumpai di laut dangkal, seperti *foreshore*, *shoreface* hingga *delta front* (Nara dan Seike, 2004).



Gambar 3.11 *Macaronichnus* pada singkapan. A) *burrow lining Macaronichnus* yang terbuat dari pasir bersih (panah putih) di dalam lapisan singkapan TAM-2; B) *burrow lining Macaronichnus* yang terbuat dari material karbonan di dalam lapisan singkapan TAM-1; C) *Macaronichnus* dengan tingkat bioturbasi rendah pada singkapan BER-2

Monocraterion

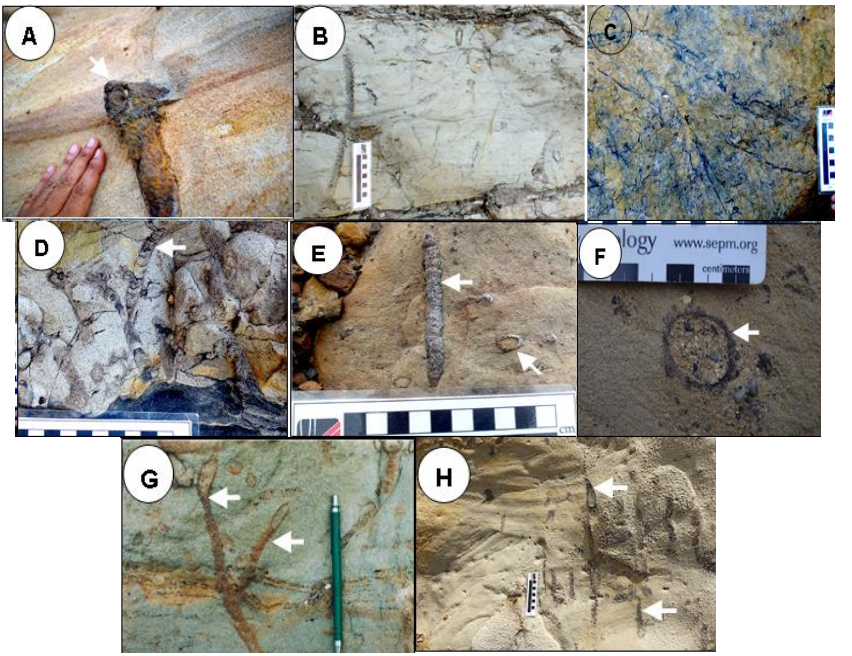
Monocraterion berorientasi vertikal terhadap bidang lapisan, tersingkap secara *full relief,* tidak bercabang, berbentuk seperti corong di bagian atas *tube*-nya, *passive fill*, tanpa *burrow lining* (Gambar 3.12). Etologi *Monocraterion* ditafsirkan sebagai *fodonichnia.* Penelitian dari Droser dkk. (1994) menunjukkan bahwa *Monocraterion* dibuat oleh sejenis cacing. Penelitian Droser dkk. (1994) juga menunjukkan bahwa *Monocraterion* berasosiasi dengan laut dangkal. Arifullah (2005) juga mengamatai bahwa *Monocraterion* berkembang di dalam pasir *tidal dunes* estuaria delta Mahakam modern.

Gambar 3.12 *Monocraterion* di dalam lapisan pada singkapan LNG.

Ophiomorpha

Ophiomorpha berorientasi vertikal dan horisontal terhadap bidang lapisan, tersingkap secara *full relief* dan/atau *epirelief*, *boxwork*, *passive fill* dan/atau *meniscate backfill*, terdapat *burrow lining* yang tersusun oleh fragmen-fragmen batuan atau *pellet*

(Gambar 3.13). Etologi *Ophiomorpha* ditafsirkan sebagai *domichnia* dan *fodonichnia.*



Gambar 3.13 *Ophiomorpha* di singkapan batuan. A) yang telah teroksidasi dari singkapan PAL; B) *shaft* dan cetakannya di dalam lapisan singkapan BER-2; C) *tunnel* pada bidang lapisan singkapan TAM-2; D) struktur *meniscate back fill*; E) *shaft* (panah merah) dan *tunnel* (panah putih) di dalam lapisan batuan di singkapan MAN; F) pasir kerikilan di dalam *burrow fill*; G) percabangan seperti huruf Y dari singkapan KES; (H) dominasi *shaft* pada singkapan PAL.

Ophiomorpha dikenal struktur yang dibuat oleh *Callianasa major* (Bromley, 1967; Frey dkk., 1978). *Ophiomorpha* dapat dijumpai mulai dari laut dangkal (Frey dkk., 1978; Pollard dkk., 1993) seperti di di dalam *sedimen tidal dunes estuaria* dan *distributary channel* di delta Mahakam modern (Arifullah, 2005). Bahkan *Ophiomorpha* berkembang hingga di dalam sedimen laut dalam (Uchman, 2009).

Paleophycus

Paleophycus berorientasi horisontal terhadap bidang lapisan, tersingkap secara *full relief* dan/atau *epirelief*, tidak bercabang, silindrik, *passive fill*, terdapat *burrow lining* (Gambar 3.14). Etologi *Paleophycus* ditafsirkan sebagai *domichnia*. *Paleophycus* dibuat oleh fauna karnivora (Frey dkk., 1990) dan *nereidid polychaetes* (Gingras dkk. 2012). *Paleophycus* terbukti dapat dijumpai di dalam sedimen darat (Uchman, 1991) sampai sedimen laut dalam (Hubbard dkk., 2012; Uchman dan Wetzel, 2012).

A **B**

Gambar 3.14 *Paleophycus* di singkapan batuan TAM-2. A) Tersingkap secara *full relief*; B) tersingkap secara *epirelief*. Tersingkap secara *full relief*, bercabang, *active fill*, tanpa *burrow lining.* Etologinya ditafsirkan sebagai *fodonichnia*. Secara umum *Phycodes* dibuat oleh *crustaceans* (Bromley, 1996). *Phycodes* dijumpai di dalam sedimen darat (Bjerstedt dan Erickson, 1989; Buatois dkk., 1997) hingga di dalam sedimen laut dalam (Miller, 2001a).

Phycosiphon

Phycosiphon berorientasi horisontal terhadap bidang lapisan, tersingkap secara *full relief* dan/atau *epirelief*, berbentuk *lobate*, *active fill*, tanpa *burrow lining* (Gambar 3.15). Etologi *Phycosiphon* ditafsirkan sebagai *fodonichnia*. Fauna yang membuat *Phycosiphon* belum diketahui. *Phycosiphon* telah dijumpai di dalam sedimen laut dangkal (Goldring dkk., 1991; Pemberton dkk., 2012) hingga sedimen laut dalam (Savrda dkk., 2001; Callow dkk., 2013).

Gambar 3.15 *Phycosiphon* yang tersingkap di dalam lapisan pada singkapan TAM-2.

Planolites

Planolites adalah struktur simpel yang berorientasi horisontal terhadap bidang lapisan, tersingkap secara *full relief*, tidak ber-cabang, silindrik, *active fill*, tanpa *burrow lining.* Warna Planolites umumnya kontras dengan sedimen sekitarnya (Gambar 3.16). Karena berorientasi horisontal dan ukurannya relatif tidak jauh ber-beda dengan *Chondrites*, maka membedakan *Planolites* dan *Chondrites* adalah tantangan tersendiri. *Planolites* dipastikan tidak terdapat komponen shaft, sedangkan *Chondrites* terdapat komponen *shaft*.

Etologi *Planolites* ditafsirkan sebagai *fodonichnia*. Fauna yang membuat *Planolites* kemungkinan adalah sejenis cacing (Ekdale dkk., 1984). *Planolites* dapat dijumpai di dalam sedimen darat hingga sedimen laut dalam (Knaust, 2017).

Gambar 3.16. Lapisan batuan dengan intensitas bioturbasi yang tinggi oleh *Planolites* pada singkapan CTR.

Platicytes

Platicytes adalah struktur simpel yang berorientasi horisontal terhadap bidang lapisan, tersingkap secara *full relief*, tidak ber-cabang, silindrik, *passive fill*, tanpa *burrow lining.* Etologi *Platicytes* ditafsirkan sebagai *fodonichnia*. Hingga saat ini fauna yang membuat *Platicytes* belum diketahui. Belum ada referensi yang meyakinkan terkait asosiasi lingkungan pengendapan *Macanopsis*. Dengan ditemukannya *Macanoposis,* telah menjadikannya sebagai salah satu iknofosil penciri laut dangkal.

Polykladichnus

Polykladichnus berorientasi vertikal terhadap bidang lapisan, tersingkap secara *full relief,* bercabang, berbentuk huruf Y, *passive fill*, tanpa *burrow lining.* Ketika *shaft* seperti huruf Y dari *Polikladichnus* tidak teridentifikasi, maka penamaan iknofosil berpeluang menjadi *Skolithos*. Mengenali *shaft* berbentuk huruf Y adalah mutlak untuk penamaan *Polykladichnus*. Etologi *Polykladichnus* ditafsirkan sebagai *fodonichnia*. *Polykladichnus* kemungkinan dibuat oleh sejenis cacing (Schlirf dan Uchman, 2005). Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa *Polykladichnus* dijumpai di dalam sedimen laut dangkal (Pearson dan Gingras, 2006; Virtasalo dkk., 2014).

Psilonichnus

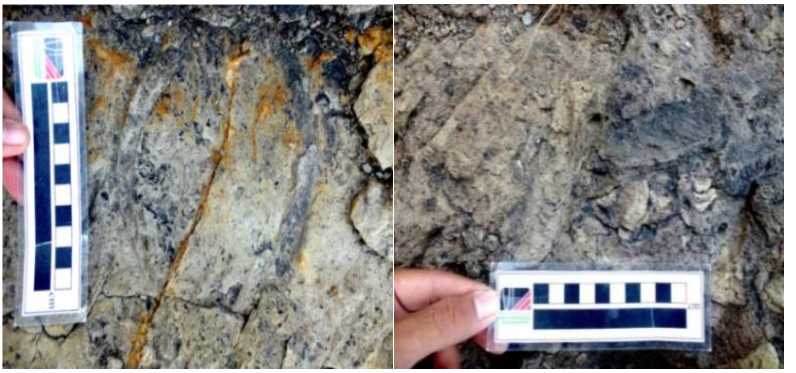
Psilonichnus berorientasi vertikal terhadap bidang lapisan, tersingkap secara *full relief,* bercabang, berbentuk huruf J, *passive fill*, tanpa *burrow lining* (Gambar 3.17). Ketika *shaft* seperti huruf J dari *Psilonichnus* tidak teridentifikasi, maka penamaan iknofosil berpeluang menjadi *Skolithos*. Memastikan shaft berbentuk huruf J adalah mutlak untuk penamaan iknofosil sebagai *Psilonichnus*.

Gambar 3.17 *Psilonichnus* yang tersingkap di dalam lapisan pada singkapan BER-1.

Etologi *Psilonichnus* ditafsirkan sebagai *domichnia*. *Psilonichnus* kemungkinan dibuat oleh *gost crab* (Frey dan Pemberton, 1987). *Psilonichnus* umumnya dijumpai di dalam sedimen darat hingga sedimen laut dangkal (Frey dan Pemberton, 1987).

Rhizocorallium

Rhizocorallium berorientasi horisontal terhadap bidang lapisan, tersingkap secara *epirelief* dan/atau *full relief*, tidak ber-cabang, berbentuk huruf U, *active fill (spreiten)* di antara dua *tube*-nya, tanpa *burrow lining* (Gambar 3.18) Secara praktis, *Rhizoco-rallium* adalah orientasi horisontal dari *Diplocraterion*. Etologi *Rhizo-corallium* ditafsirkan sebagai *fodonichnia*. *Rhizocorallium* kemungki-nan dibuat oleh *decapods crustaceans* (Knaust, 2013). *Rhizocorallium* dapat dijumpai di dalam sedimen darat (Fürsich dan Mayr, 1981), sedimen laut dangkal (Farrow, 1966) dan sedimen laut dalam (Knaust, 2017).



A **B**

Gambar 3.18 *Rhizocorallium* yang tersingkap pada singkapan TAM-2. A) tersingkap secara *epirelief* (panah putih); B) tersingkap sebagai komposit (panah putih).

Rosselia

Rosselia berorientasi vertikal terhadap bidang lapisan, ter-singkap secara *full relief,* tidak bercabang, *conical*, *passive fill*, ter-dapat *burrow lining.* Etologi *Rosselia* ditafsirkan sebagai *domichnia*. *Rosselia* kemungkinan dibuat oleh *terebellid polychaetes* (Nara, 2002). *Rosselia* umumnya dijumpai di dalam sedimen laut dangkal yang berasosiasi dengan kecepatan pengendapan yang tinggi dan erosi yang berulang ulang (Nara, 2002).

Schaubcylindrichnus

Schaubcylindrichnus berorientasi vertikal terhadap bidang lapisan, tersingkap secara *full relief,* bercabang, berbentuk huruf U, *active fill*, terdapat *burrow lining* (Gambar 3.19). Identifikasi Schaubcylindrichnus harus memastikan keberadaan percabangannya. Jika percabangan tidak teridentifikasi, maka iknofosil akan di-namakan *Arenicolites*.

Gambar 3.19 *Schaubcylindrichnus* yang tersingkap pada singkapan TAM-2. Panah putih adalah titik percabangannya. Garis putih putus-putus sejajar dengan bidang lapisan.

Etologi *Schaubcylindrichnus* ditafsirkan sebagai *domichnia*. *Schaubcylindrichnus* kemungkinan dibuat oleh cacing (Löwemark dan Nara, 2010). *Schaubcylindrichnus* umumnya dijumpai di dalam sedimen laut dangkal hingga sedimen laut dalam (Frey dan Pemberton, 1991; Löwemark dan Nara, 2010).

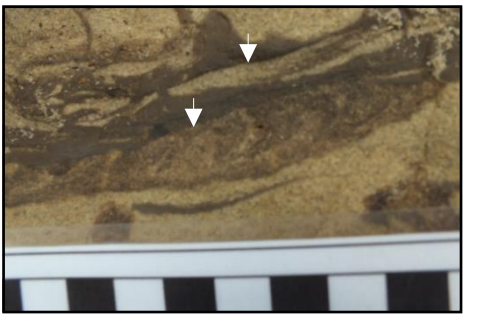
Trackway

Orientasinya horisontal terhadap bidang lapisan, *epirelief, biserial. Trackway* ditafsirkan sebagai etologi *rapichnia*. *Trackway* dapat dikenali dengan baik jika memang tersingkap di permukaan bidang lapisan. Jika tidak tersingkap, maka *trackway* diidentifikasi dengan pengamatan jarak dekat terhadap batas lapisan. *Trackway* tidak terikat lingkungan pengendapan tertentu. *Trackway* adalah indikator adanya fauna yang berpindah dari satu tempat ke tempat lainnya.

Scolicia

Scolicia berorientasi horisontal terhadap bidang lapisan, tersingkap secara *full relief*, tidak bercabang, silindrik, *active fill (spreiten* atau *meniscate backfill)*, tanpa *burrow lining* (Gambar 3.20). Etologi *Scolicia* ditafsirkan sebagai *fodonichnia*. *Scolicia* kemungkinan dibuat

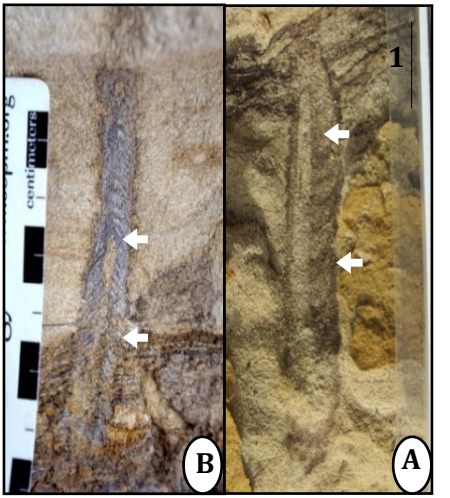
oleh *echinocardium cordatum* (Bromley, 1996) dan gastro-poda (Chamberlain, 1971). *Scolicia* dapat dijumpai di dalam sedimen laut dangkal (Gingras dkk., 2002; Carmona dkk., 2008) hingga sedimen laut dalam (Knaust, 2009; Callow dkk., 2013).



Gambar 3.20 *Scolicia* yang tersingkap pada singkapan TAM-2. Panah putih menunjukkan struktur *meniscate backfill.*

Siphonichnus

Siphonichnus berorientasi vertikal terhadap bidang lapisan, tersingkap secara *full relief,* tidak bercabang, silindrik, *active fill (spreiten* atau *meniscate backfill)*, terdapat *burrow lining. Siphonich-nus* sering menunjukkan struktur retrusif dan protrusif (Gambar 3.21). Etologi *Siphonichnus* ditafsirkan sebagai *domichnia*. *Siphonich-nus* dibuat oleh *bivalve* (Reineck, 1958).

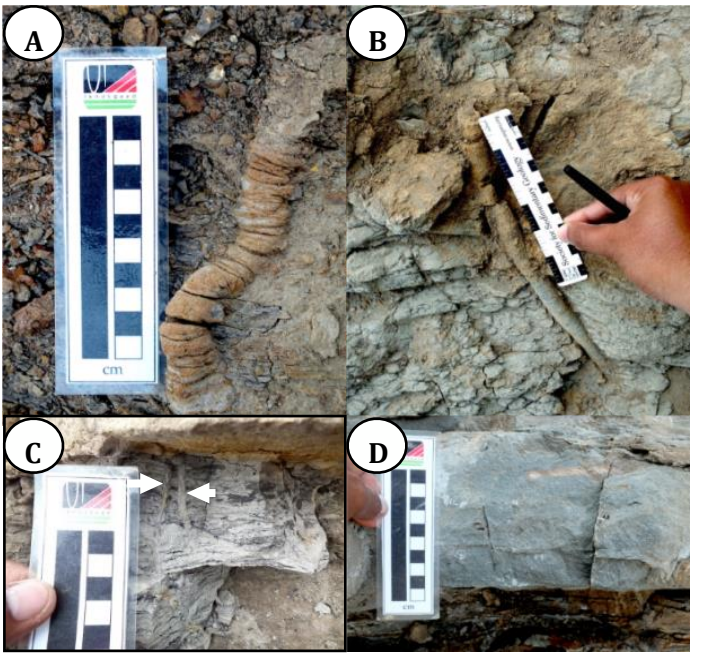


Gambar 3.21 *Siphonichnus* di singkapan. A) struktur retrusif di singkapan PAL; B) struktur protrusif di singkapan LNG.

Siphonichnus umumnya dijumpai di dalam sedimen laut dangkal yang berasosiasi dengan kondisi salinitas dan pasokan air tawar yang berfluktuasi (Knaust, 2015). *Siphonichnus* juga merupa-kan indikator fauna yang terus mempertahankan hubungannya dengan SWI *(sediment water interface)* (Reineck, 1958) konsekuensi dari erosi dan pengendapan silih berganti (Goldring, 1964).

Skolithos

Skolithos berorientasi vertikal terhadap bidang lapisan, ter-singkap *full relief* dan/ atau *epirelief,* tidak bercabang, silindrik, *passive fill*, tanpa *burrow lining* (Gambar 3.22.A). Jika *shaft* di bagian bawah *Skolithos* melengkung (Gambar 3.22) dan terpotong maka menjadi *Psilonichnus*. Etologi *Skolithos* ditafsirkan sebagai *domichnia*. *Skolithos* adalah iknofosil yang paling umum dijumpai di daerah penelitian.



Gambar 3.22 *Skolithos* di singkapan batuan. A) *shaft*-nya melengkung dan terlihat laminasi sebagai *burrow fill* di lapisan singkapan TAM-1; B) *shaft* relatif lurus dengan penetrasi yang dalam di singkapan BER-1; C) indikasi penetrasi dangkal oleh fauna di singkapan ANG-3; D) material karbonan terdapat dalam *burrow fill*.

Skolithos dibuat oleh cacing, *crustaceans, holoturians* (Dashtgard dan Gingras, 2012), anemon laut (Hertweck, 1972). *Skolithos* dapat dijumpai di dalam sedimen darat, transisi (Hasiotis, 2006; Netto, 2007) hingga laut dalam (Knaust, 2017).

Skolithos dibuat oleh cacing, *crustaceans, holoturians* (Dashtgard dan Gingras, 2012), anemon laut (Hertweck, 1972). *Skolithos* dapat dijumpai di dalam sedimen darat, transisi (Hasiotis, 2006; Netto, 2007) hingga laut dalam (Knaust, 2017).

Taenadium

Taenadium berorientasi horisontal terhadap bidang lapisan, tersingkap secara *epirelief*, tidak bercabang, silindrik, *active fill (meniscate backfill)*, tanpa *burrow lining* (Gambar 3.23).

Taenadium ditafsirkan beretologi *fodonichnia*. *Taenadium* dapat dibuat oleh serangga (Smith, 2007) dan *arthropods* (RodríguezTovar dkk., 2016). *Taenadium* dijumpai di dalam sedimen darat (Hasiotis, 2006) hingga laut dalam (D'Allessandro dan Bromley, 1987).

Gambar 3.23. *Taenadium* yang tersingkap pada singkapan MEL-2. Panah putih menunjukkan struktur *meniscate backfill* (foto dari Arifullah, 2005).

Teichichnus

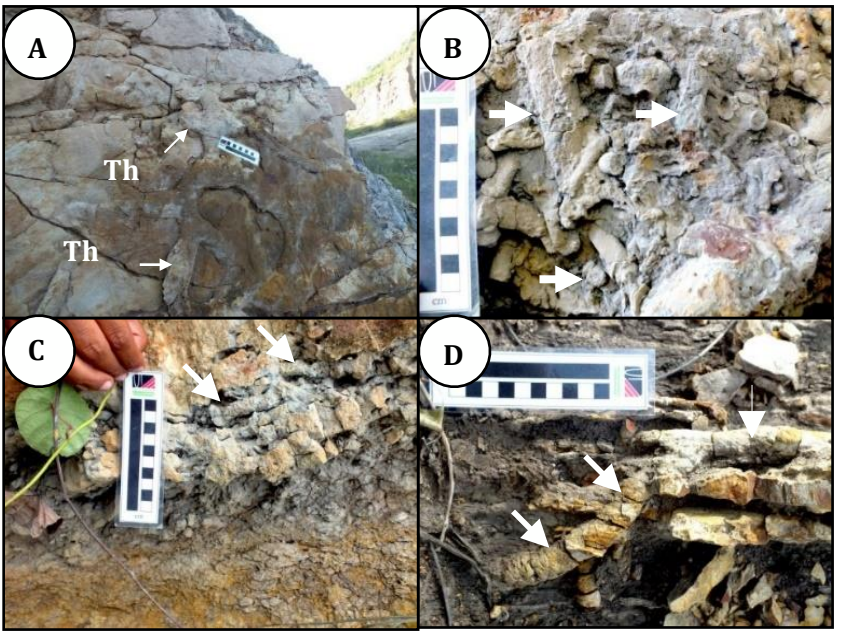
Teichnichnus berorientasi horisontal terhadap bidang lapisan, tersingkap secara *full relief*, tidak bercabang, silindrik bersusun, *active fill (spreiten* atau *meniscate backfill)*, tanpa *burrow lining* (Gambar 31). Etologi *Teichichnus* ditafsirkan sebagai *fodonichnia*.

Gambar 3.24 *Teichichnus* dengan struktur *meniscate backfill* yang tersingkap pada singkapan TAM-2.

Teichichnus dibuat oleh *polychaete* (Dashtgard dan Gingras, 2012), *bivalve* (Bromley, 1996). *Teichichnus* dapat dijumpai di dalam sedimen laut dangkal (Pemberton dan Wightman, 1992) hingga sedimen laut dalam (Hubbard dkk., 2012; Wetzel dan Uchman, 2012.

Thalassinoides

Thalassinoides berorientasi horisontal terhadap bidang lapisan, tersingkap secara *full relief* dan/atau *epirelief*, *boxwork*, *passive fill*, tanpa *burrow lining* (Gambar 3.25). Etologi *Thalassionides* ditafsirkan sebagai *fodonichnia* dan *domichnia*. *Thalassinoides* telah dikenali sebagai struktur yang dibuat oleh *Callianasa major* (Bromley, 1967; Frey dkk., 1978). *Thalassionides* dapat dijumpai di dalam sedimen laut dangkal hingga laut dalam (Monaco dkk., 2009).

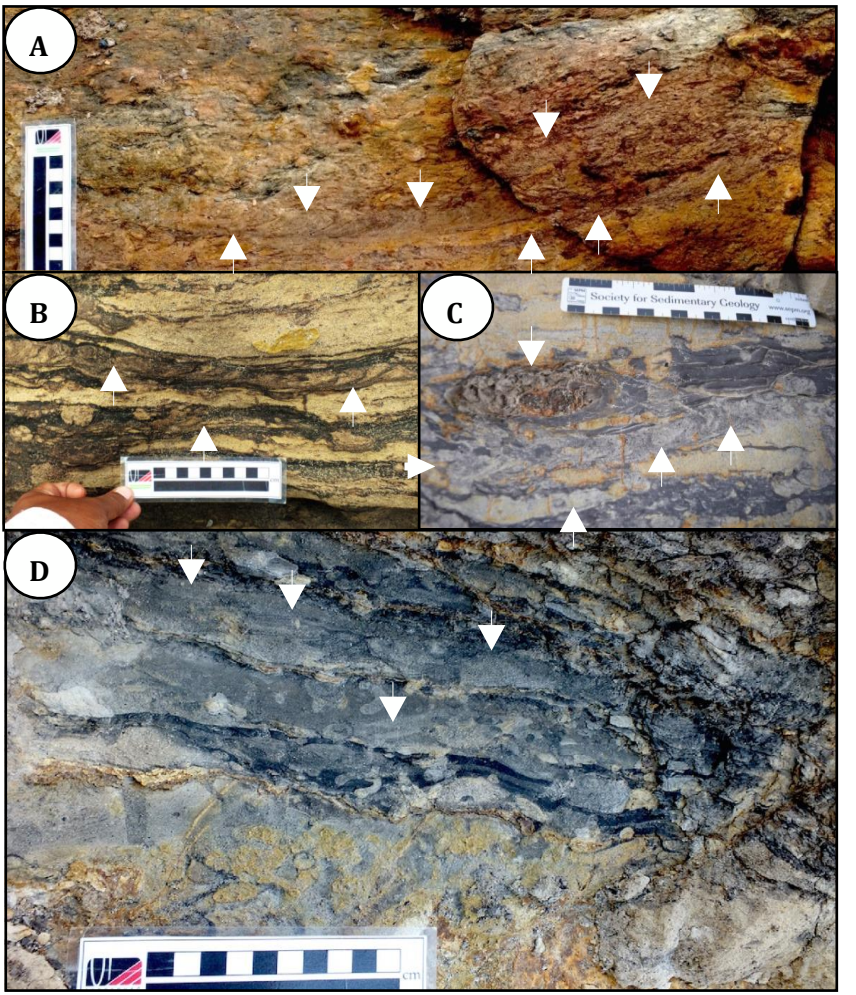


Gambar 3.25 *Thalassinoides* di singkapan batuan. A) *tunnel* yang membentuk percabangan di bidang lapisan pada singkapan TAM-2; B) *boxwork* di dalam lapisan pada singkapan TAM-1; C) bagian tunnel di dalam lapisan pada singkapan TAM-2; D) koneksi antara *tunnel* (panah putih) dan *shaft* (panah merah).

Zoophycos

Zoophycos berorientasi horisontal terhadap bidang lapisan, tersingkap secara *full relief*, *helicoidal*, *active fill (meniscate backfill* dan *spreiten)*, tanpa *burrow lining. Helicoidal* adalah *spreiten* yang tebentuk ketika pergerakan fauna secara simultan disepanjang *shaft* utama dan berputar mengelilingi *shaft* utama tersebut.

Rentang tersingkapnya secara horisontal dapat beberapa puluh sentimeter yang terdiri dari sejumlah set spreiten (Gambar 3.26). Etologi *Zoophycos* ditafsirkan sebagai *fodonichnia*. *Zoophycos* dibuat oleh *polychaetes* (Bischoff, 1968), *echiurans* (Kotake, 1992), *sipunculans* (Olivero dan Gaillard, 2007). *Zoophycos* dapat dijumpai di dalam sedimen laut dangkal hingga sedimen laut dalam (Kotake, 1992).



Gambar 3.26 *Zoophycos* di singkapan batuan. A) dua-tiga set *spreiten* yang memanjang secara lateral pada singkapan MAN; B) dua set *meniscate back fill* pada singkapan PAL; C) dua set spreiten pada singkapan CTR; D) tersingkap di permukaan bidang lapisan.

B. Asosiasi-Asosiasi Iknofosil

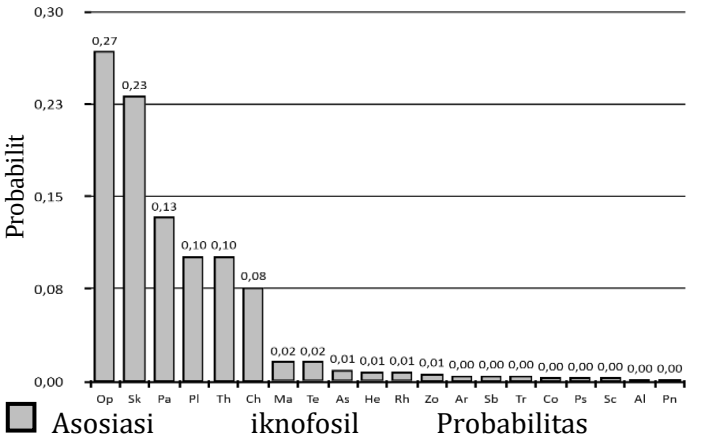
Penamaan asosiasi iknofosil didasarkan iknotaksa dominan dalam unit iknofabrik. Dari 34 iknotaksa yang diidentifikasi, 20 iknotaksa di antaranya dominan di dalam unit iknofabrik yang kemudian menjadi dasar dalam penamaan asosiasi iknofosil (Tabel 3.1). Namun demikian, hanya enam iknotaksa yang dapat mewakili

yaitu *Ophiomorpha, Skolithos, Paleophycus, Thalassinoides, Planolites* dan *Chondrites* (Gambar 3.27) muncul sebagai iknotaksa dominan dengan frekuensi kumulatif 91,09%.

Persentase kumulatif 8,08% adalah akumulasi asosiasi-asosiasi *Alcyonidiopsis, Arenicolites, Asterosoma, Helmintoidinichnites, Hillichnus, Macaronichnus, Monocraterion, Phycosiphon, Psilonichnus, Rhizocorallium, Schaubcylindrichnus, Scolicia, Teichichnus, trackway*, dan *Zoophycos*. Temuan tersebut menunjukan iknotaksa yang mendominasi hanyalah sedikit.

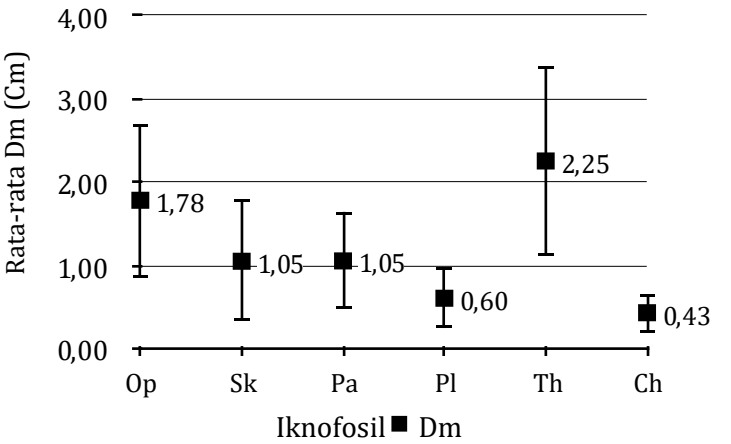
Tabel 3.1 Probabilitas dan persentase frekuensi kumulatif asosiasi-asosiasi iknofosil.

No	Asosiasi		Frek.	Prob.	FK	% FK
1	*Ophiomorpha*	*(Op)*	171	0,27	171	26,72%
2	*Skolithos*	*(Sk)*	148	0,23	319	49,84%
3	*Paleophycus*	*(Pa)*	85	0,13	404	63,13%
4	*Planolites*	*(Pl)*	65	0,10	469	73,28%
5	*Thallasinoides*	*(Th)*	65	0,10	534	83,44%
6	*Chondrites*	*(Ch)*	49	0,08	583	91,09%
7	*Macaranonichnus*	*(Ma)*	10	0,02	593	92,66%
8	*Teichichnus*	*(Te)*	10	0,02	603	94,22%
9	*Asterosoma*	*(As)*	6	0,01	609	95,16%
10	*Helmintoidinichnites*	*(He)*	5	0,01	614	95,94%
11	*Rhizocorallium*	*(Rh)*	5	0,01	619	96,72%
12	*Zoophycos*	*(Zo)*	4	0,01	623	97,34%
13	*Arenicolites*	*(Ar)*	3	0,00	626	97,81%
14	*Schaubcylindrichnus*	*(Sb)*	3	0,00	629	98,28%
15	*Trackway*	*(Tr)*	3	0,00	632	98,75%
16	*Conichnus*	*(Co)*	2	0,00	634	99,06%
17	*Psilonichnus*	*(Ps)*	2	0,00	636	99,38%
18	*Scolicia*	*(Sc)*	2	0,00	638	99,69%
19	*Alcyonidiopsis*	*(Al)*	1	0,00	639	99,84%
20	*Phycosiphon*	*(Pn)*	1	0,00	640	100,00%
	Total				64	

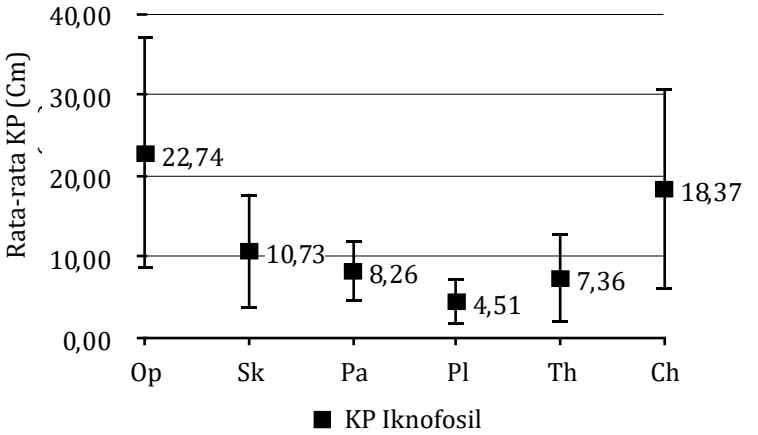


Gambar 3.27 Histogram Pareto asosiasi-asosiasi iknofosil interval Serravallian-Tortonian. Terdapat enam asosiasi-asosiasi iknofosil utama yaitu Op, Sk, Pa, Pl, Th dan Ch.

Dalam analisis ini juga dilakukan pengukuran Dm dan KP iknotaksa utama *Ophiomorpha, Skolithos, Paleophycus, Thalassinoides, Planolites* dan *Chondrites* sebagaimana yang disajikan dalam Gambar 3.28 dan 3.29 Rata-rata Dm terbesar adalah *Thalassinoides* sedangkan yang terkecil adalah *Chondrites.* Ratarata PD terbesar ditunjukkan oleh *Ophiomorpha* dan *Chondrites*.



Gambar 3.28 Rata-rata dan standar deviasi Dm iknofosil *Ophiomorpha*, *Skolithos, Paleophycus, Planolites, Thalassinoides* dan *Chondrites*.



Gambar3.29 Rata-rata dan standar deviasi KP *Ophiomorpha*, *Skolithos, Paleophycus, Planolites, Thalassinoides* dan *Chondrites*.

Standar deviasi Dm dan PD yang terbesar ditunjukkan oleh *Ophiomorpha*. Semakin besar Dm, maka standar deviasinya juga semakin besar. Demikian juga dengan semakin besarnya KP, maka standar deviasi juga semakin besar.

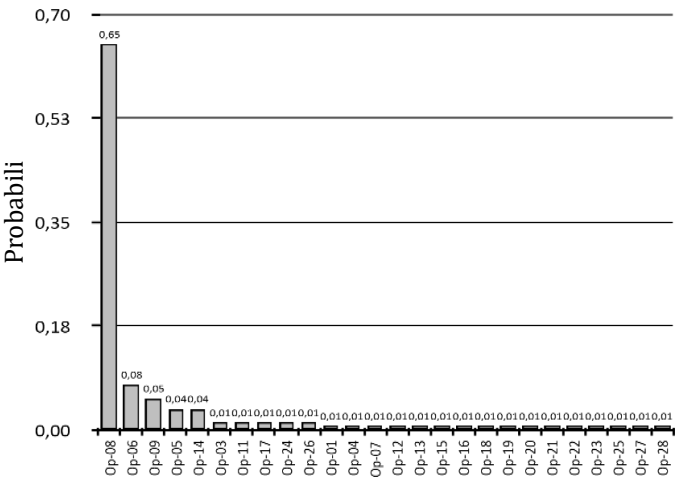
Asosiasi *Ophiomorpha*

Berdasarkan Tabel 3.2, asosiasi *Ophiomorpha* terdiri dari *Ophiomorpha*, iknofosil dengan *behavior Fugichnia*, *Rhizocorallium, Taenadium, Scolicia, Rosselia, Thalassinoides, Paleophycus, Skolithos, Chondrites, Siphonichnus, Cylindrichnus, Macaronichnus, Schaubcylindrichnus, Conichnus, Heimdallia, Asterosoma, Macanopsis, Planolites, Teichichnus* dan *Alcyonidiopsis*. Dari 26 varian asosiasi *Ophiomorpha*, Op-08 adalah varian yang hanya tersusun oleh *Ophimorpha.* Varian tersebut dominan di antara varian-varian lainnya dengan probabilitas 0,65 (Gambar 3.30).

Tabel 3.2 Daftar varian asosiasi Ophiomorpha.

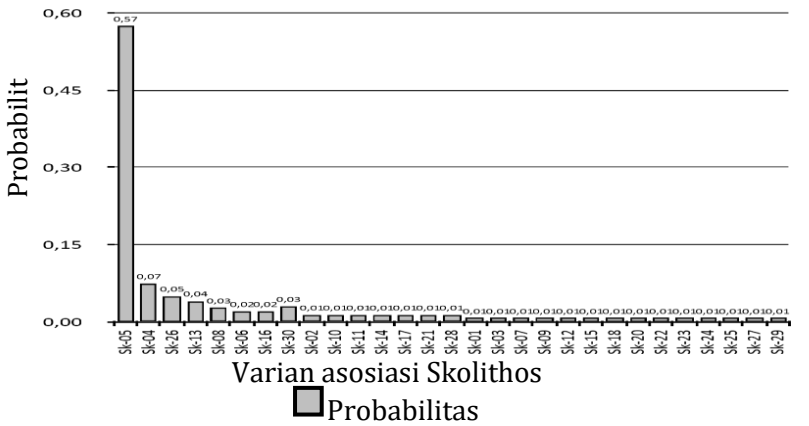
No	Varian	Iknotaksa Dominan	Iknotaksa Penyerta
1	Op---01	*Ophiomorpha*	*Fugichnia*
2	Op---03	*Ophiomorpha*	*Rhizocorallium,Taenadium, Scolicia*
3	Op---04	*Ophiomorpha*	*Rosselia, Thallasinoides*

No	Varian	Iknotaksa Dominan	Iknotaksa Penyerta
4	Op---05	*Ophiomorpha*	*Paleophycus, Skolithos*
5	Op---06	*Ophiomorpha*	*Chondrites*
6	Op---07	*Ophiomorpha*	*Siphonichnus*
7	Op---08	*Ophiomorpha*	'idak ditemukan iknotaksa lain
8	Op---09	*Ophiomorpha*	*Skolithos*
9	Op---11	*Ophiomorpha*	*Cylindrichnus,*
10	Op---12	*Ophiomorpha*	*Macaronichnus, Chondrites*
11	Op---13	*Ophiomorpha*	*Cylindrichnus, Macaronichnus,*
12	Op---14	*Ophiomorpha*	*Paleophycus*
13	Op---15	*Ophiomorpha*	*Schaubcylindrichnus, Conichnus*
14	Op---16	*Ophiomorpha*	*Heimdallia*
15	Op---17	*Ophiomorpha*	*Asterosoma, Scolicia*
16	Op---18	*Ophiomorpha*	*Asterosoma*
17	Op---19	*Ophiomorpha*	*Paleophycus, Chondrites*
18	Op---20	*Ophiomorpha*	*Macanopsis, Thallasinoides*
19	Op---21	*Ophiomorpha*	*Planolites, Chondrites*
20	Op---22	*Ophiomorpha*	*Paleophycus, Teichichnus*
21	Op---23	*Ophiomorpha*	*Trichichnus*
22	Op---24	*Ophiomorpha*	*Paleophycus, Thallasinoides*
23	Op---25	*Ophiomorpha*	*Teichichnus, Chondrites*
24	Op---26	*Ophiomorpha*	*Skolithos, Chondrites*
25	Op---27	*Ophiomorpha*	*Alcyonidiopsis*
26	Op---28	*Ophiomorpha*	*Thallasinoides, Scolicia, Skolithos*


0,70
0,53
0,35
0,18
0,00
Probabili
0,65
0,08
0,05
0,04
0,04
0,01
0,01
0,01

Tabel 3.3 Daftar varian asosiasi Skolithos (lanjutan)

No	Varian	Iknotaksa Dominan	Iknotaksa Penyerta
4	Sk---04	*Skolithos*	*Paleophycus*
5	Sk---05	*Skolithos*	*Tidak ditemukan iknotaksa lain*
6	Sk---06	*Skolithos*	*Arenicolites*
7	Sk---07	*Skolithos*	*Cylindrichnus, Paleophycus*
8	Sk---08	*Skolithos*	*Conichnus*
9	Sk---09	*Skolithos*	*Platycites*
10	Sk---10	*Skolithos*	*Bergauria,Conichnus*
11	Sk---11	*Skolithos*	*Rosselia*
12	Sk---12	*Skolithos*	*Conichnus, Bergauria, Chondrites*
13	Sk---13	*Skolithos*	*Ophiomorpha*
14	Sk---14	*Skolithos*	*Monocraterion*
15	Sk---15	*Skolithos*	*Ophiomorpha, Zoophycos,*
16	Sk---16	*Skolithos*	*Platycites, Diplocraterion*
17	Sk---17	*Skolithos*	*Asterosoma, Arenicolites*
18	Sk---18	*Skolithos*	*Asterosoma, Paleophycus, Scolicia, Fugichnia*
19	Sk---20	*Skolithos*	*Fugichnia*
20	Sk---21	*Skolithos*	*Ophiomorpha, Arenicolites, Paleophycus*
21	Sk---22	*Skolithos*	*Heimdalia*
22	Sk---23	*Skolithos*	*Scolicia*



Gambar 3.31 Histogram Pareto varian *Skolithos* dan persentase kumulatifnya interval Serravallian-Tortonian. Varian yang dominan adalah Sk-05.

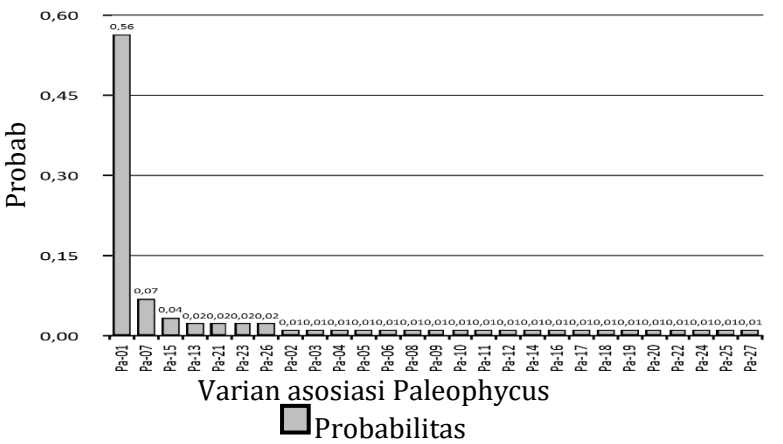
Asosiasi *Paleophycus*

Berdasarkan Tabel 3.4, asosiasi Paleophycus terdiri dari *Paleophycus, Planolites, Asterosoma, Rhizocorallium*, *Teichichnus, Siphonichnus, Thalassinoides, Macanopsis, Scolicia, Ophiomorpha, Conichnus, Skolithos, Diplocraterion, Arenicolites, Bergaueria, Chondrites, Platycites, Cylindrichnus, Schaubcylindrichnus, Macanopsis, Rosselia*, iknofosil dengan *behavior Fugichnia*, *Teichichnus* dan *Heimdallia*. Dari 27 varian asosiasi *Paleophycus,* Pa-01 adalah varian yang hanya tersusun oleh *Paleophycus.* Varian tersebut dominan di antara varian-varian lainnya dengan probabilitas 0,56 (Gambar 3.32).

Tabel 3.4 Daftar varian asosiasi Paleophycus

No	Varian	Iknotaksa Dominan	Iknotaksa Penyerta
1	Pa---01	*Paleophycus*	Tidak ditemukan iknotaksa lain
2	Pa---02	*Paleophycus*	*Planolites, Asterosoma, Rhizocorallium, Teichichnus*
3	Pa---03	*Paleophycus*	*Siphonichnus*
4	Pa---04	*Palophycus*	*Planolites, Thallasionides, Rhizocorallium, Asterosoma*
5	Pa---05	*Paleophycus*	*Rhizocorallium, Macanopsis, Scolicia*
6	Pa---06	*Paleophycus*	*Ophiomorpha, Thallasionoides, Conichnus*
7	Pa---07	*Paleophycus*	*Skolithos*
8	Pa---08	*Paleophycus*	*Diplocraterion, Rhizocorallium*
9	Pa---09	*Paleophycus*	*Diplocraterion*
10	Pa---10	*Paleophycus*	*Rhizocorallium*
11	Pa---11	*Paleophycus*	*Arenicolites*
12	Pa---12	*Paleophycus*	*Bergauria, Conichnus*
13	Pa---13	*Paleophycus*	*Ophiomorpha, Chondrites*

14	Pa---14	*Paleophycus*	*Platycites*
15	Pa---15	*Paleophycus*	*Thallasinoides,*
16	Pa---16	*Paleophycus*	*Conichnus, Bergauria, Cylindrichnus*
17	Pa---17	*Paleophycus*	*Skolithos, Schaubcylindrichnus, Macanopsis, Thallasinoides, Conichnus*
18	Pa---18	*Paleophycus*	*Macanopsis, Rosselia*
19	Pa---19	*Paleophycus*	*Skolithos, Arenicolites*
20	Pa---20	*Paleophycus*	*Skolithos, Asterosoma, Fugichnia*
21	Pa---21	*Paleophycus*	*Chondrites*
22	Pa---22	*Paleophycus*	*Ophiomorpha, Schaubcylindrichnus*
23	Pa---23	*Paleophycus*	*Ophiomorpha*
24	Pa---24	*Paleophycus*	*Thallasinoides, Skolithos*
25	Pa---25	*Paleophycus*	*Teichichnus, Macanopsis, Heimdalia*
26	Pa---26	*Paleophycus*	*Scolicia,Teichichnus*
27	Pa---27	*Paleophycus*	*Skolithos, Bergauria*



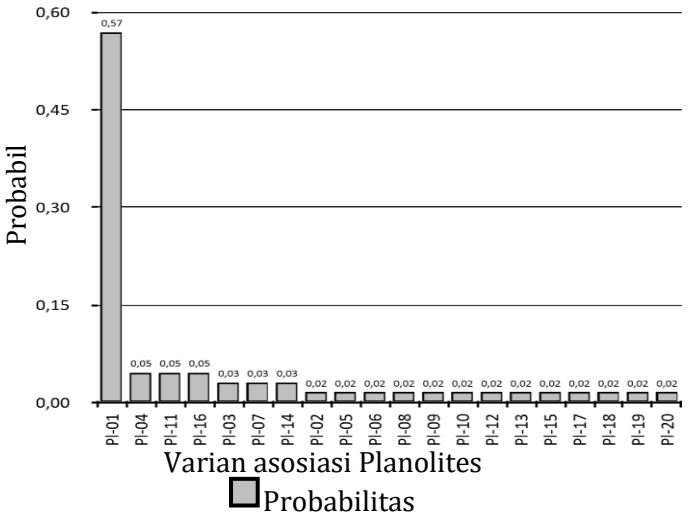
Gambar 3.32. Histogram Pareto varian asosiasi *Paleophycus* dan persentase kumulatifnya interval Serravallian-Tortonian. Varian dominan adalah Pa-01.

Asosiasi *Planolites*

Berdasarkan Tabel 3.5, asosiasi Planolites terdiri dari *Planolites, Chondrites, Conichnus, Paleophycus, Skolithos, Arenicolites, Gyrolithes, Rosselia, Diplocraterion, Teichichnus, Bergaueria, Rhizocorallium, Asterosoma, Polykladichnus, Thalassinoides* dan *Scolicia.* Dari 20 varian asosiasi *Planolites*, Pl-01 adalah varian yang hanya tersusun oleh *Planolites*. Secara umum *Planolites* lebih banyak berasosiasi dengan *Chondrites.* Varian tersebut dominan di antara varian-varian lainnya dengan probabilitas 0,56.

Tabel 3.5 Daftar varian asosiasi Planolites

No	Varian	Iknotaksa Dominan	Iknotaksa Penyerta
1	Pl---01	*Planolites*	Tidak ditemukan iknotaksa lain
2	Pl---02	*Planolites*	*Chondrites, Conichnus*
3	Pl---03	*Planolites*	*Paleophycus*
4	Pl---04	*Planolites*	*Skolithos*
5	Pl---05	*Planolites*	*Arenicolites, Gyrolithes*
6	Pl---06	*Planolites*	*Rosselia*
7	Pl---07	*Planolites*	*Chondrites, Diplocraterion,Teichichnus*
8	Pl---08	*Planolites*	*Teichichnus, Bergauria*
9	Pl---09	*Planolites*	*Rhizocorallium*
10	Pl---10	*Planolites*	*Chondrites, Asterosoma*
11	Pl---11	*Planolites*	*Chondrites*
12	Pl---12	*Planolites*	*Chondrites, Skolithos*
13	Pl---13	*Planolites*	*Chondrites, Asterosoma, Polykladichnus*
14	Pl---14	*Planolites*	*Chondrites, Thallasionoides*
15	Pl---15	*Planolites*	*Thallasinoides, Teichichnus, Skolithos*
16	Pl---16	*Planolites*	*Thallasinoides, Scolicia.*
17	Pl---17	*Planolites*	*Asterosoma*
18	Pl---18	*Planolites*	*Teichichnus*
19	Pl---19	*Planolites*	*Teichichnus, Thallasinoides*
20	Pl---20	*Planolites*	*Skolithos, Bergauria*



Gambar 3.33 Histogram Pareto varian asosiasi *Planolites* dan persentase kumulatifnya interval Serravallian-Tortonian. Varian dominan adalah Pl-01.

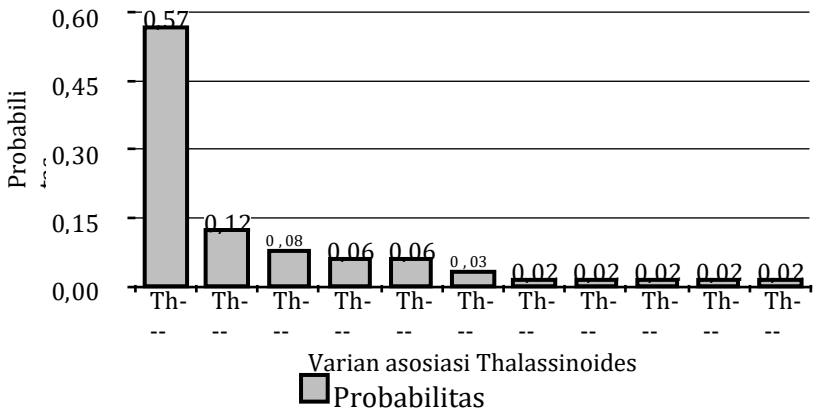
Asosiasi *Thalassinoides*

Berdasarkan Tabel 3.6, asosiasi *Thalassinoides* terdiri dari *Thalassinoides*, *Asterosoma, Skolithos, Rhizocorallium, Planolites, Paleophycus, Skolithos, Platycites, Phycosiphon, Chondrites, Ophiomorpha, Bergaueria,* dan *Helminthoidinichnites.* Dari 11 varian asosiasi *Thalassinoides*, Th-03 adalah varian yang hanya tersusun oleh Thalassinoides. Varian tersebut dominan di antara varian-varian lainnya dengan probabilitas 0,57 (Gambar 3.34).

Tabel 3.6 Daftar varian asosiasi Thalassinoides

No	Varian	Iknotaksa Dominan	Iknotaksa Penyerta
1	Th---01	*Thallasinoides*	*Asterosoma, Skolithos*
2	Th---02	*Thallasinoides*	*Rhizocorallium, Planolites*
3	Th---03	*Thallasinoides*	Tidak ditemukan iknotaksa lain
4	Th---04	*Thallasinoides*	*Planolites*
5	Th---05	*Thallasinoides*	*Paleophycus*
6	Th---06	*Thallasinoides*	*Skolithos, Rhizocorralium, Platycites*
7	Th---07	*Thallasinoides*	*Phycosiphon*

8	Th---08	*Thallasinoides*	*Skolithos*
9	Th---09	*Thallasinoides*	*Phycosiphon, Chondrites, Ophiomorpha*
10	Th---10	*Thallasinoides*	*Paleophycus, Bergauria*
11	Th---11	*Thallasinoides*	*Helminthodinichnites*



Gambar3.34 Histogram Pareto varian asosiasi *Thalassinoides* dan persentase kumulatifnya interval Serravallian-Tortonian. Varian dominan adalah Th-03.

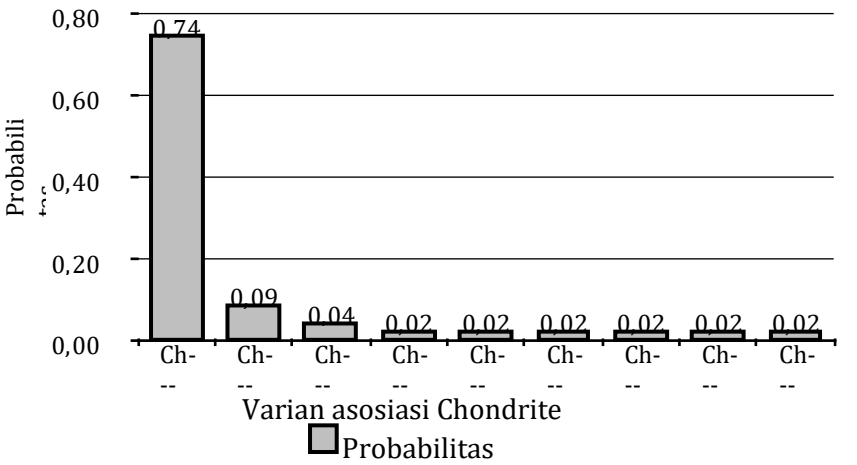
Asosiasi *Chondrites*

Berdasarkan Tabel 3.7, asosiasi Chondrites terdiri dari *Chondrites, Scolicia, Ophiomorpha, Diplocraterion, Planolites, Zoophycos, Paleophycus, Skolithos, Arenicolites, Cylindrichnus dan Paleophycus*. Dari sembilan varian asosiasi *Chondrites*, Ch-05 adalah varian yang hanya tersusun oleh *Chondrites*. Varian tersebut dominan di antara varian-varian lainnya dengan probabilitas 0,74 (Gambar 3.35)

Tabel 3.7 Daftar varian asosiasi Chondrites

No	Varian	Iknotaksa Dominan	Iknotaksa Penyerta
1	Ch---01	*Chondrites*	*Scolicia, Ophiomorpha, Diplocraterion*
2	Ch---02	*Chondrites*	*Ophiomorpha*
3	Ch---03	*Chondrites*	*Scolicia*
4	Ch---04	*Chondrites*	Tidak ditemukan iknotaksa lain

5	Ch---05	*Chondrites*	*Planolites*
6	Ch---07	*Chondrites*	*Zoophycos*
7	Ch---08	*Chondrites*	*Paleophycus, Skolithos, Arenicolites*
8	Ch---09	*Chondrites*	*Arenicolites, Cylindrichnus, Ophiomorpha*
9	Ch---11	*Chondrites*	*Paleophycus*



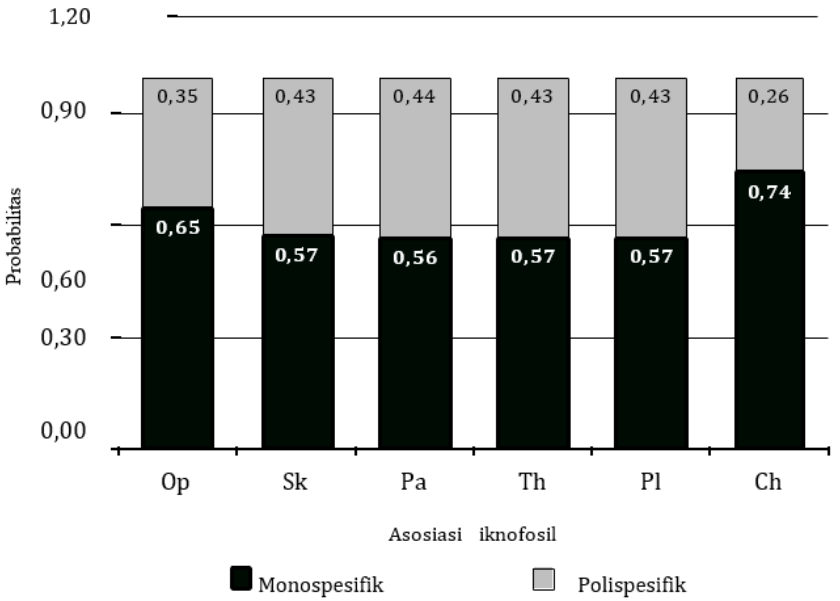
Gambar 3.35 Histogram Pareto varian asosiasi *Chondrites* dan persentase kumulatifnya interval Serravallian-Tortonian. Varian yang dominan adalah Ch-04.

Varian Monospesifik dan Polispesifik

Sebagaimana telah dijelaskan sebelumnya, dalam setiap asosiasi iknofosil muncul dengan berbagai varian. Varian yang mendominasi adalah varian monospesifik seperti Op-08, Sk-05, Pa-01, Pl-01, Th-03, dan Ch-04. Unit iknofabrik yang di dalamnya terdapat lebih dari satu jenis iknofosil disebut varian polispesifik.

Perbandingan varian monospesifik dan polispesifik dapat dilihat dalam Gambar 3.36 Masing-masing asosiasi-asosiasi iknofosil utama dicirikan oleh dominasi varian iknofosil monospesifik muncul dengan probabilitas > 0,5. Secara umum, karakteristik iknofosil di daerah penelitian adalah (1) dominasi enam asosiasi iknofosil, (2) asosiasi-asosiasi iknofosil tersebut didominasi oleh varian iknofosil monospesifik, (3) varian iknofosil polispesifik merupakan kombinasi dua iknofosil yang di dalamnya beranggotakan iknofosil-iknofosil dari enam iknofosil utama yaitu *Ophiomorpha, Skolithos, Paleophycus,*

Planolites, Thalassinoides dan *Chondrites.*



Gambar 3.36 Histogram persentase varian monospesifik dan polispesifik asosiasi-asosiasi iknofosil utama.

BAB 4

Indeks Bioturbasi, Keragaman Iknofosil, Jumlah Behavior, Kedalaman Penetrasi dan Diameter Iknofosil

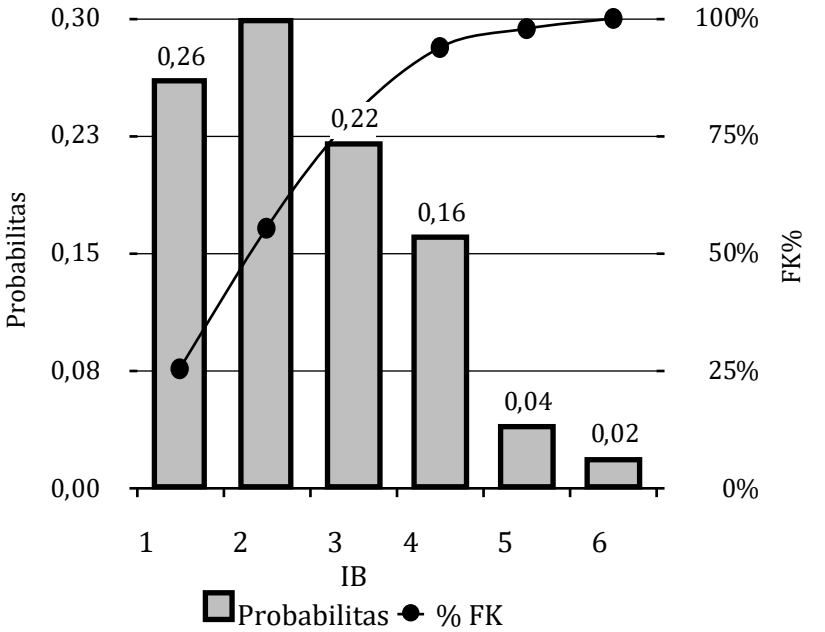
Nilai rata-rata variabel-variabel iknofabrik yaitu indeks bioturbasi, keragaman iknofosil, jumlah *behavior*, kedalaman penetrasi dan diameter iknofosil pada bab ini mencakup interval Serravallian dan Tortonian.

Indeks Bioturbasi (IB)

Merujuk pada Bottjer dan Droser (1991), cara mengetahui gambaran umum IB di daerah penelitian adalah dengan menghitung rata-ratanya dari semua unit iknofabrik yang diamati. Rata-rata BI dihitung dengan cara (IB 1 x probabilitas BI 1) + (IB 2 x probabilitas IB 2)….+(IB 6 x probabilitas IB 6). Cara yang sama diberlakukan juga untuk median dan rata-rata KI, JB, KP dan Dm. Penentuan median dilakukan dengan cara memotongkan garis *cutoff* 50% FK dan kurva FK nya. Titik potong tersebut kemudian diproyeksikan ke sumbu x, dengan demikian dapat diketahui median IB. Ketika nilai rata-rata tidak jauh dengan median, maka yang dipilih adalah rata-ratanya (Sullivan, 2018).

Nilai IB yang teridentifikasi di daerah penelitian adalah mulai dari 1 - 6. Variabel IB dengan rentang nilai 1-2, 3-4 dan 5-6, berturut-turut dikategorikan “rendah”, “sedang” dan “tinggi”. Merujuk pada Gambar 4.1, median IB adalah 2 dan rataratanya adalah 2,49. Dengan

demikian IB di daerah penelitian termasuk kategori “rendah”.



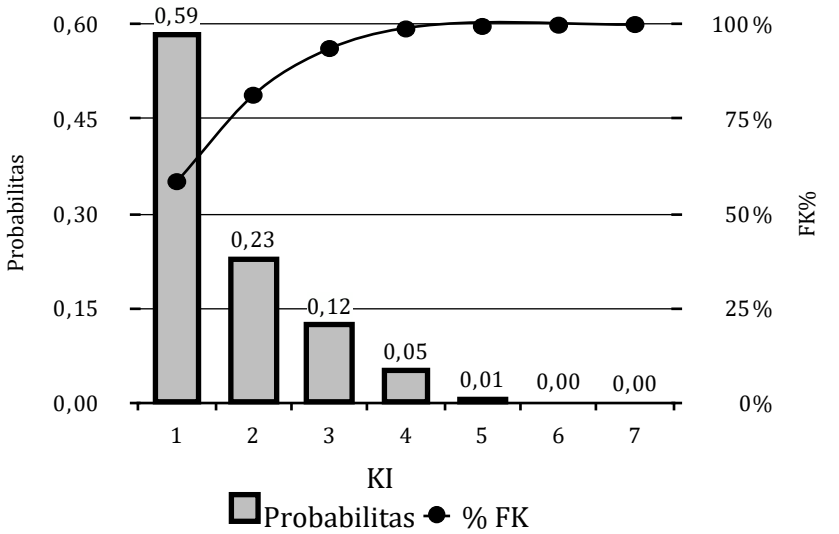
Gambar 4.1 Diagram probabilitas IB dan persentase frekuensi kumulatifnya. Median IB adalah 2 dan rata-ratanya 2,46.

Keragaman Iknotaksa (KI)

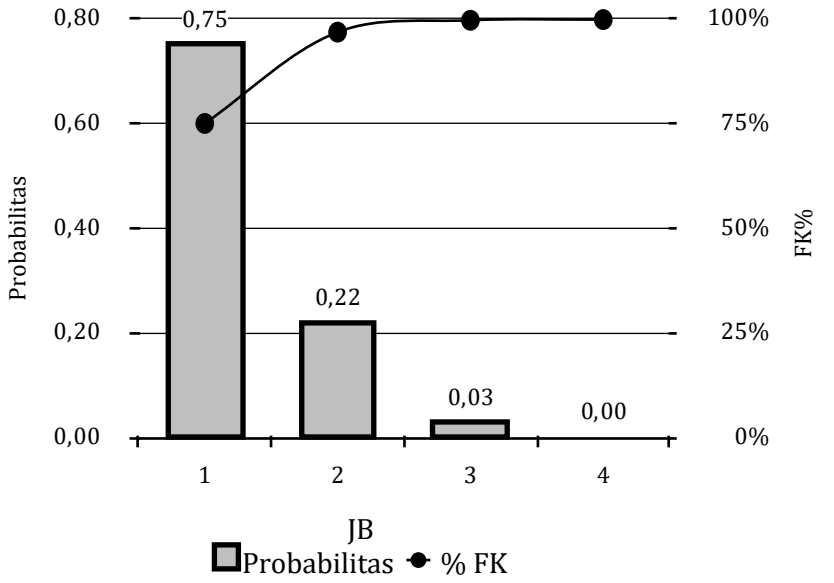
Variabel KI dengan rentang nilai 1-2, 3-4 dan 5-7, berturut-turut dikategorikan “rendah”, “sedang” dan “tinggi.” Merujuk pada Gambar 4.2, median KI adalah 1. Dengan demikian KI di daerah penelitian termasuk dalam kategori “rendah”. Gejala ini menunjukan pada umumnya unit-unit iknofabrik lebih didominasi oleh iknotaksa tunggal. Hal ini dapat dibandingkan pula dengan gejala dominasi varian monospesifik pada unit-unit iknofabrik.

Jumlah *behavior* (JB)

Untuk variabel JB, dengan rentang nilai 1-2, 3-4, berturut-turut dikategorikan “rendah” dan “tinggi”. Pengkategorian ini tergantung pada berapa rentang JB yang didapatkan di lapangan. Merujuk pada Gambar 4.3, median JB adalah 1. Dengan demikian jumlah *behavior* di daerah penelitian termasuk dalam kategori “rendah”.



Gambar 4.2 Diagram probabilitas KI dan persentase frekuensi kumulatifnya. Median KI adalah 1 dan rata-ratanya 1,69.



Gambar 4.3 Diagram probabilitas JB dan persentase frekuensi kumulatifnya. Median JB adalah 1 dan rata-ratanya 1,28.

Kedalaman Penetrasi (KP)

Nilai-nilai KP diklasifikasikan menjadi kelas-kelas dengan rentang nilai 1-2 dikategorikan "dangkal" nilai 3-4 dikategorikan "sedang" dan nilai 5-6 adalah dikategorikan "dalam". Penentuan jumlah kelas mengikuti skala IB dan jumlah KI. Merujuk pada Sullivan (2018), klasifikasi kedalaman penetrasi dilakukan dengan cara: (1) menentukan jumlah kelas yang dikehendaiki, (2) menentukan batas atas dan batas bawah (*upper and lower fences*), (3) membagi rentang pagar atas dan pagar bawah. Pagar atas dan bawah tersebut kemudian menjadi *cutoff* interval kelas atas dan batas interval kelas bawah. Merujuk pada Sullivan (2018), adapun rumus penentuan batas atas adalah:

Batas atas = Q1 - 1,5 (IQR) (III.1)

Rumus lebar kelas di antar batas atas dan batas bawah adalah:

$$\text{Lebar kelas} = \frac{(\text{batas atas} - \text{batas bawah})}{\text{jumlah kelas}} \quad \text{(III.4)}$$

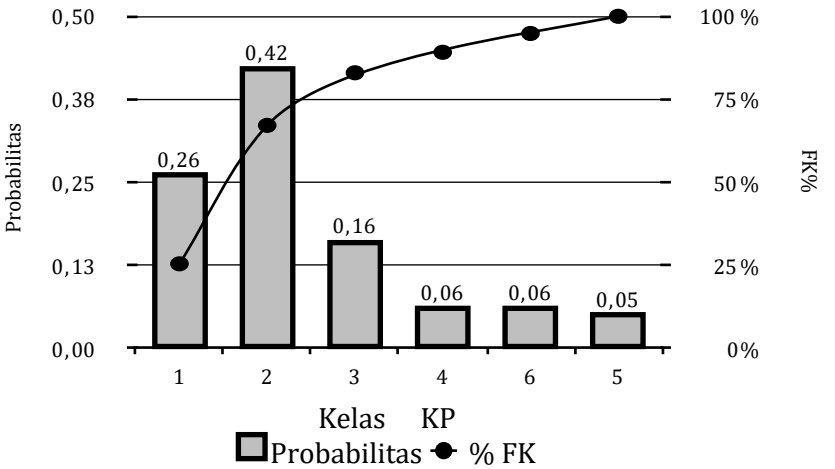
Batas bawah = Q3 - 1,5 (IQR) (III.3)

IQR adalah interkuartil, Q1 adalah kuartil 1 dan Q3 adalah kuartil 3

Penggunaan rumus di atas menghasilkan kelas terhadap data KP menghasilkan Tabel 4.1 yang membagi kelas variabel KP. Merujuk pada Gambar 4.4, median KP adalah 1,5. Dengan demikian kedalaman penetrasi di daerah penelitian termasuk dalam kategori "dangkal".

Tabel 4.1 Daftar lebar kelas variabel KP

Kelas	Lebar kelas (cm)
1	< 7,00
2	7,00 - 14,00
3	14,10 - 21,10
4	21,20 - 28,20
5	28,30 - 36,00
6	> 36,00



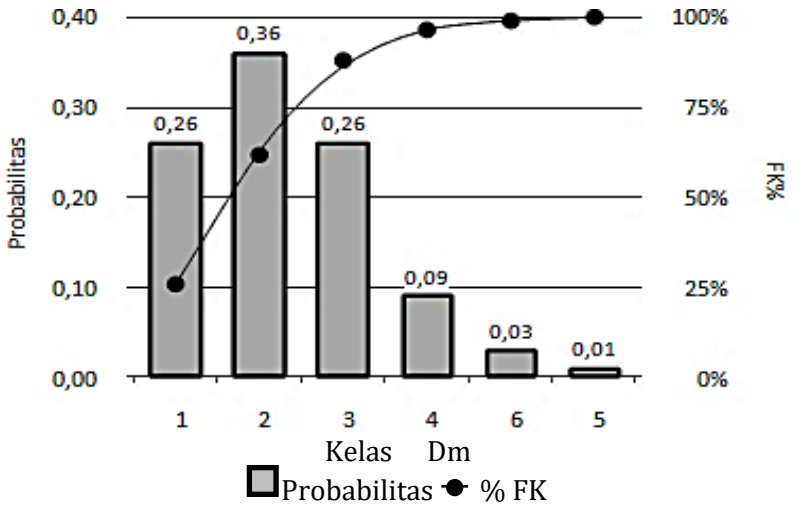
Gambar 4.4 Probabilitas kelas KP dan persentase frekuensi kumulatifnya. Median KP adalah 2 dan rata-ratanya 2,28.

Diameter iknofosil (Dm)

Nilai-nilai Dm diklasifikasikan menjadi kelas-kelas dengan rentang nilai 1-2 adalah "kecil" kelas 3-4 adalah "sedang" dan kelas 5-6 adalah "besar". Penentuan jumlah kelas mengikuti skala IB dan jumlah KI. Metode klasifikasi diameter iknofosil dilakukan dengan cara yang sama seperti yang diterapkan pada penentuan kelas variabel KP. Dengan demikian diameter iknofosil di daerah penelitian termasuk dalam kategori "kecil" (lihat Tabel 4.2) karena median Dm adalah 1,5 (Gambar 4.5).

Tabel 4.2 Daftar lebar kelas variabel Dm

Kelas	Lebar kelas (cm)
1	< 0,70
2	0,70 - 1,40
3	1,50 - 2,20
4	2,30 - 3,00
5	3,10 - 3,90
6	> 3,90

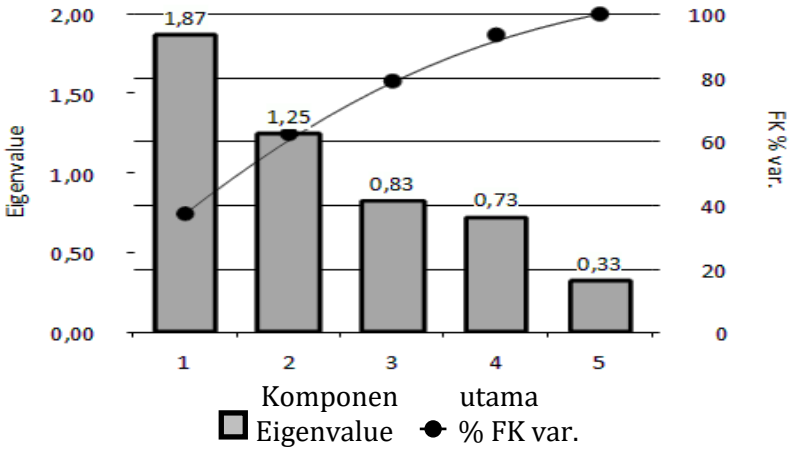


Gambar 4.5 Probabilitas kelas Dm dan persentase frekuensi kumulatifnya. Median Dm adalah 2 dan rata-ratanya 2,18.

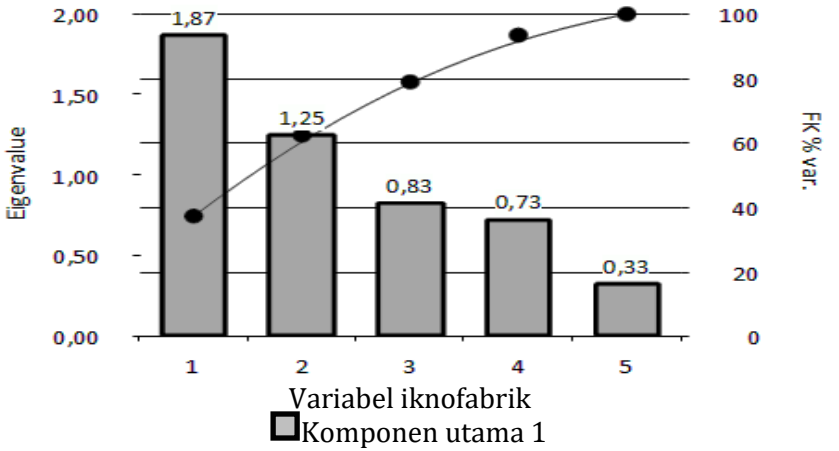
Analisis Komponen Utama

Analisis komponen utama yang dilakukan terhadap unit-unit iknofabrik yang memiliki nilai IB, KI, JB, KP dan Dm menghasilkan lima komponen utama (Gambar 4.6). Jumlah komponen-komponen utama yang dihasilkan sama dengan jumlah variabel iknofabrik yang digunakan. Hanya komponen 1 (KU-1) dan komponen utama 2 (KU-2) yang dapat dipilih karena *eigenvalue* KU-1 dan KU-2 lebih dari 1 (Keiser, 1960) yaitu masing-masing dengan *eigenvalue* 1,87 dan 1,25. Demikian juga persentase frekuensi kumulatif variansi KU-1 dan KU-2 telah melebihi 60%, maka KU-1 dan KU-2 cukup sebagai komponen-komponen utama yang dipertimbangkan untuk analisis lebih lanjut (Jollife, 2002).

Komponen utama pertama (KU-1) tersusun oleh variabel-variabel IB, KI, JB, KP dan Dm dengan bobot yang berbeda-beda (Gambar 4.6). Perbedaan bobot tersebut ditunjukkan dengan nilai koefisien korelasinya. Merujuk pada Liu dkk., (2003), variabel KI dan JB berkorelasi positif kuat dengan KU-1 dengan nilai koefisien korelasi masing-masing adalah 0,86 dan 0,82, sedangkan variabel IB berkorelasi positif sedang dengan KU-1 dengan nilai koefisien korelasi 0,60.

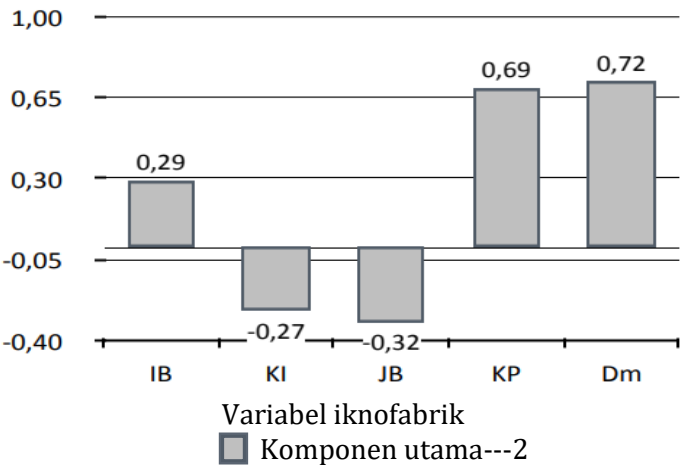


Gambar 4.6 Histogram Pareto *eigenvalue* dan % FK variansi. KU-1 dan KU-2 sudah cukup sebagai komponen-komponen utama yang dipertimbangkan untuk analisis lebih lanjut.



Gambar 4.7 Histogram KU-1 dan hubungannya terhadap variabel-variabel IB, KI, JB, KP dan Dm yang ditunjukkan dengan nilai koefisien korelasi.

Komponen utama kedua (KU-2) tersusun oleh variabel-variabel IB, KI, JB, KP dan Dm. Perbedaan bobot ditunjukkan dengan nilai koefisien korelasinya (Gambar 4.7). Merujuk pada Liu dkk., (2003), variabel KP dan Dm berkorelasi positif sedang dengan KU-2. Nilai koefisien korelasi variabel KP dan Dm, masing-masing adalah 0,72 dan 0,69.



Gambar 4.8 Histogram KU-2 dan hubungannya variabel-variabel IB, KI, JB, KP dan Dm yang ditunjukkan dengan nilai koefisien korelasinya.

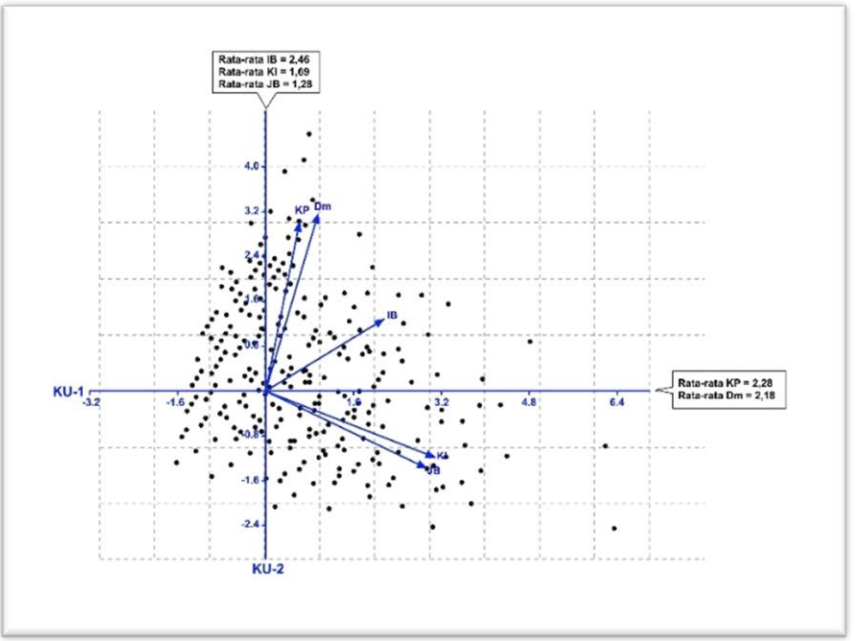
Komponen Utama (KU) -1 dan -2

Salah satu hasil analisis komponen utama adalah skor KU-1 dan KU-2 sebagaimana yang dicontohkan dalam Tabel 4.3. kemudian, Gambar 4.9 menunjukkan unit-unit iknofabrik menyebar ke segala arah dan tidak menunjukkan klasterisasi yang begitu jelas, namun demikian orientasinya masih terlihat yaitu berorientasi sejajar dengan sumbu KU-1 dan sumbu KU-2.

Tabel 4.3 Contoh tabulasi yang menunjukkan skor KU-1 dan KU-2 di setiap unit iknofabrik.

N	Unit iknofabrik	Skor KU-1	Skor KU-2
1	01-Op-07	0,28	1,32
2	01-Ch-03	1,34	0,66
3	01-Pa-03	0,47	0,41
4	01-Ch-04	-1,14	1,03
5	01-Op-08	-1,43	-0,36
....	...	...	...
600	16-Sk-05	-1,62	-1,28

Dalam analisis komponen utama, titik perpotongan sumbu KU-1 dan KU-2 adalah nilai rata-rata IB, KI, JB, KP dan Dm. Berdasarkan Gambar 4.9, unit-unit iknofabrik di sebelah kanan sumbu KU-2 memiliki nilai IB, KI dan JB lebih besar dari nilai rata-ratanya, sedangkan di sebelah kiri sumbu KU-2 nilai IB, KI dan JB lebih kecil dari nilai rata-ratanya. Unit-unit iknofabrik di sebelah atas sumbu KU-1, nilai KP dan Dm lebih besar dari nilai rata-ratanya, sedangkan nilai KP dan Dm di bawah sumbu KU-1, nilaiKP dan Dm lebih kecil dari nilai rata-ratanya.



Gambar 4.9 Diagram sebaran skor enam ratus unit iknofabrik terhadap KU-1 dan KU-2.

Klasterisasi Diagram Skor KU-1 dan KU-2

Skor unit-unit iknofabrik sebagaimana yang ditunjukkan Gambar 4.9 diklaster dengan kriteria umur yaitu interval Serravallian dan Tortonian. Setiap interval umur dikelompokkan lagi dengan kriteria proses-proses sedimentasi dan pola arah umum arus purba di setiap zona pada interval umur tertentu.

Tabel 4.4 Klasifikasi litofasies (modifikasi dari Arifullah, 2005 dan Miall, 1985)

No	Kode Fasies	Litofasies	Struktur Sedimen	Penafsiran
1	C	Batubara	masif atau berlembar, kadang disisipi oleh batulempung	Rawa
2	Fr	Lanau, lempung	*Rootlet*	*seatearth*
3	Sgc	Pasir	*Guttercast*	*scour fill*
4	Hm	Lanau atau lempung sisipan pasir	perlapisan, laminasi	dominasi suspensi yang diselingi dengan traksi
5	Hs	Pasir sisipan lanau atau lempung	perlapisan, laminasi	dominasi traksi yang diselingi dengan suspensi
6	Mm	Lanau atau lempung	laminasi atau masif	suspensi atau hasil rombakan fauna
7	Se	Pasir dengan *scouring* dengan fragmen	silang siur Udak beraturan	*scour fill*
8	Sf	Pasir	*synsedimentary fault, microfold*	*gravity flow*
9	Sg	Pasir	*gradded bedding*	*gravity flow*
10	Sh	Pasir	laminasi sejajar, lineasi fragmen batuan	*planar bed flow*
11	Shcs	Pasir	*hummocky cross stratification*	gelombang, endapan storm
12	Sl	Pasir	silang siur bersudut rendah	*scour fill, crevasse splays, antidune*
13	Sp	Pasir	gabungan silang siur (*alpha*) atau sekelompok silang siur planar	*linguoid, transverse bars, sand waves* (rezim

No	Kode Fasies	Litofasies	Struktur Sedimen	Penafsiran
				aliran rendah)
14	Spm	Pasir	silang siur planar dengan *mud drapes* baik pada *foreset* dan/ atau *topset*	*linguoid, transverse bars, sand waves* (rezim aliran rendah) indikator pasang surut
15	Sr	Pasir	Silang siur gelembur gelombang	migrasi *ripple*
16	Srm	Pasir	silang siur gelembur gelombang *indikator pasang surut* dengan *mud drapes* baik pada *foreset* dan/atau *topset*	migrasi *ripple*
17	St	Pasir	silang siur mangkok	*dunes* (rezim aliran rendah)

Tabel 4.5 Litofasies di setiap singkapan dan penafsiran dominasi proses sedimentasinya.

Umur	Zona	Nama singkapan	Litofasies Proses	Dominasi
Serravallian	A	BER-1 BER-2	Sh, Shcs, Se, Sr, Srm, Sp, Spm, Hm, Hs, Mm, C L, Shcs, Sh, Sl Sr, Sp, Hm, Mm,	Gelombang-Pasang surut Gelombang
	B	BTP SMP ARD LNG CTR MTH* PRJ***	L, Sh, Sl, Se, Sp, Sr, Sg Sh, Sr, Se, Fr, Hm, Mm Sp, Sh, Hm, Fr, C Shcs, Sh, Sr, St, Spm, Hm, Mm, Shcs, Sr, Srm, Sh, Sp, Sf, Mm, C Sp, Hm, Mm, C, Shcs, Hs, sr -	Fluvial-Gelombang Fluvial Fluvial Pasang Surut Gelombang Fluvial-Pasang Surut Fluvial-Pasang Surut Fluvial
		KES*	Sp, Sl, Sr, Srm, Mm, C,	Fluvial-

Umur	Zona	Nama singkapan	Litofasies Proses	Dominasi
			St, Shcs, Sh, Hs, Hm,	Gelombang
		PWG**	Sp, Mm, C, Sf, Sh, Sl, Se, Hm, Fr, Hs, Spm, Sr, C	Fluvial-Pasang Surut
	C	PAL TAM-1 TAM-2	St, Sp, Sr, Srm, Hm, Mm, C Sp, Sh, Mm, C, Sr, Hm Shcs, Hm, Hs, Sp, Mm, Ss, Sh, St, Sgc, C	Pasang Surut Gelombang Gelombang
		MAN	Sp, Sr, Mm, Hs Hm, C.	Gelombang-Pasang Surut
		MEL-2*	Sh, Sp, Sr, Shcs, Mm, C	Gelombang
		MEL-1*	Hm, Mm, Srm, Sp, Sh, Sp,	Pasang surut
Tortonian	D	CMT SSG	Shcs, Sl, Sr, Sh, Sf, Hm Srm, Sp, Sr, Sl, St, Sf, Sh, Hs, C	Gelombang-Fluvial Fluvial
	E	ANG-1 ANG-2	Sr, Srm, Sp, Se, Hm, C. Sr, Srm, Sp, Se, Sh, Sf, Mm, C, Fr	Pasang Surut Fluvial-Pasang Surut
		ANG-3	Sp, Sl, Sh, Hm, Mm, C	Pasang Surut

Keterangan:
*) Arifullah (2005); **) Bachtiar (2004)

Enam belas litofasies telah diidentifikasi (Tabel 4.4) yang menunjukkan jenis litologi dan struktur sedimen sebagai dasar penafsiran proses sedimentasi. Dominasi proses yang teridentifikasi di setiap singkapan (Tabel 4.5) dijadikan dasar dalam penafsiran elemen pengendapan.

Interval Serravallian terdiri dari tiga zona yaitu zona A yang didominasi oleh proses gelombang, zona B didominasi oleh interaksi proses fluvial - gelombang - pasang surut dan zona C yang didominasi oleh proses gelombang-pasang surut (Gambar 4.10). Interval Tortonian terdiri tiga zona yaitu zona D yang didominasi oleh proses fluvial-gelombang dan zona E yang didominasi oleh proses fluvial pasang surut (Gambar 4.11). Peta-peta proses sedimentasi sebagai-

mana yang ditunjukkan oleh Gambar 4.10 dan Gambar 4.11 dilengkapi dengan data arah umum arus purba.

Pembagian zona sebagaimana yang telah dilakukan berdasarkan kriteria proses sedimentasi tercermin pula dengan nilai rata-rata dan standar deviasi KU-1 dan KU-2 (Tabel 4.6 dan Gambar 4.12). Rata-rata skor KU-1 zona A dan B berada di bawah rata-rata, sedangkan zona C menunjukkan rata-rata skor KU-1 di atas rata-rata. Pada interval Tortonian, zona D menunjukkan rata-rata skor KU-1 dan KU-2 di atas rata-rata. Berbeda dengan zona E yang menun-jukkan skor KU-1 dan KU-2 berada di bawah rata-rata. Rata-rata skor KU-2 zona E adalah terendah di antara zona lainnya.

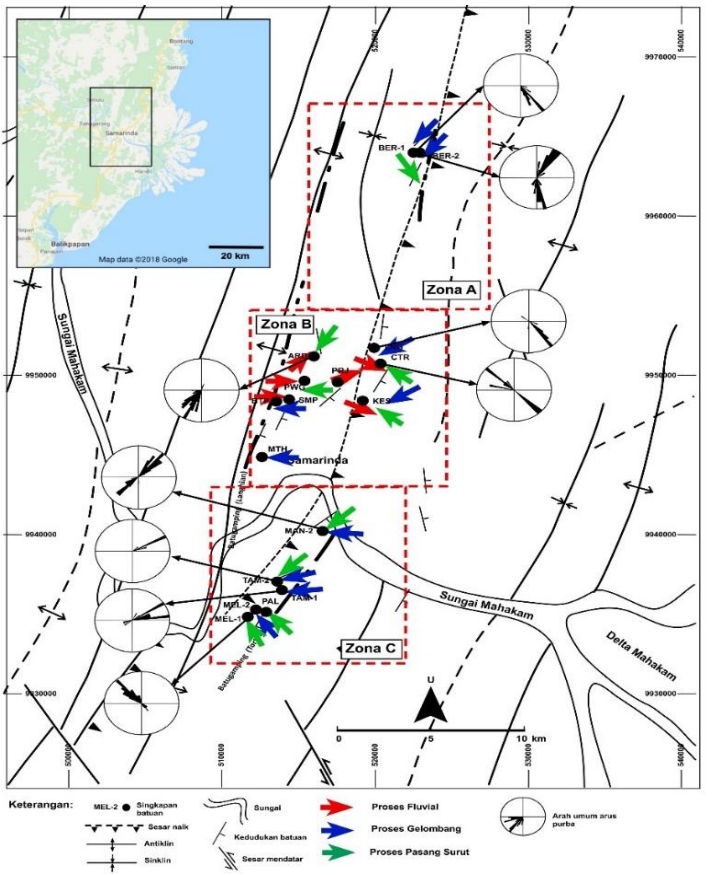
Standar deviasi skor KU-1 dan KU-2 yang ditunjukkan Gambar 4.12 merefleksikan seberapa lebar variasi data. Standar deviasi rata-rata skor KU-1 zona C adalah yang tertinggi, sedangkan yang terendah adalah zona A. Standar deviasi rata-rata skor KU-2 tertinggi adalah dari zona D sedangkan yang terendah adalah zona E. Visua-lisasi nilai rata-rata dan standar deviasi KU-1 dan KU-2 (Gambar 4.12) dalam diagram skor (Gambar 4.9) disajikan dalam Gambar 4.13 dan 4.14. Kedua gambar tersebut merepresentasikan data di setiap zona yang menggambarkan satu standar deviasi dengan tingkat keyakinan 68%. Orientasi kelonjongan elips menggambarkan besaran standar deviasi dan tingkat pengaruh KU-1 dan KU-2. Semakin lonjong elips, maka salah satu komponen lebih men-dominasi dibandingkan komponen lainnya. Misalnya zona C (Gambar 4.13), kelonjongan elips cenderung searah dengan KU-1, dengan demikian zona C lebih dikontrol oleh komponen KU-1. Demikian juga pada kasus zona D (Gambar 4.14), kelonjongan elips cenderung searah dengan KU-2 yang menunjukkan kontrol PR lebih dominan daripada KU-1.

Arah kolonjongan elips juga memberi pengertian jenis korelasi KU-1 dan KU-2. Misalnya pada zona C (Gambar 4.13) menggambarkan skor KU-1 dan skor KU-2 berkorelasi negatif. Dengan kata lain semakin besar skor KU-1 diikuti dengan semakin kecilnya skor KU-2. Berbeda dengan arah kolonjongan elips zona D (Gambar 4.14) menggambarkan skor KU-1 dan skor KU-2 berkorelasi positif. Dengan kata lain semakin besar skor KU-1 diikuti pula dengan semakin besarnya skor KU-2. Rata-rata skor interval Serravallian dan Tortonian akan dijelaskan sebagai berikut.

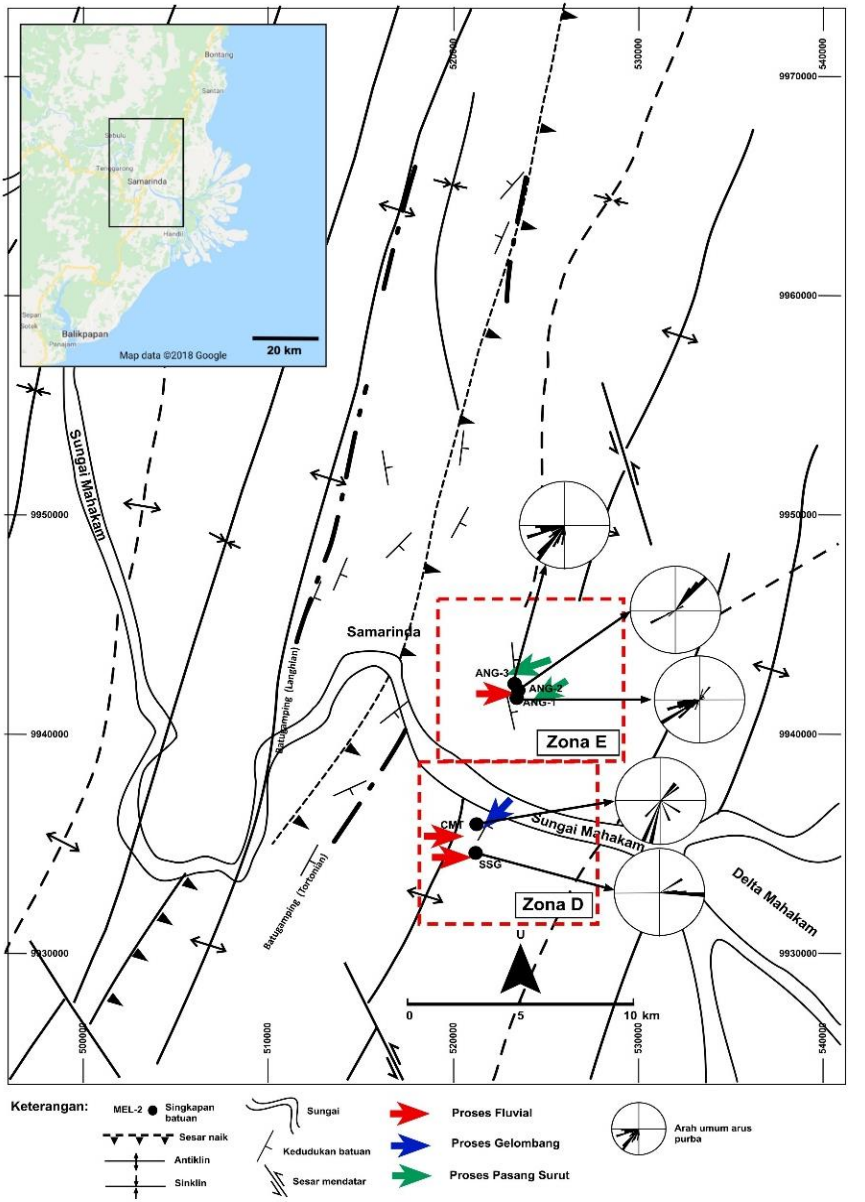
Berdasarkan Gambar 4.13, seluruh zona interval Serravallain lebih dipengaruhi oleh komponen KU-1. Gejala ini juga dapat

diidentifikasi dari besaran standar deviasi skor KU-1 dibandingkan skor KU-2 sebagaimana yang ditunjukkan oleh Gambar 4.12. Standar deviasi skor KU-1 dari yang paling besar ke yang paling kecil berturut-turut ditunjukkan oleh zona C, B dan A.

Zona C menunjukkan korelasi negatif antara skor KU-1 dan skor KU-2 yang berarti semakin meningkat skor KU-1 maka diikuti semakin menurunnya skor KU-2. Berbeda dengan zona tengah dan utara yang menunjukkan korelasi positif Tabel 4.6 Tabulasi nilai rata-rata dan standar deviasi skor KU-1 dan skor KU-2 setiap zona pada interval Serravallian dan Tortonian.



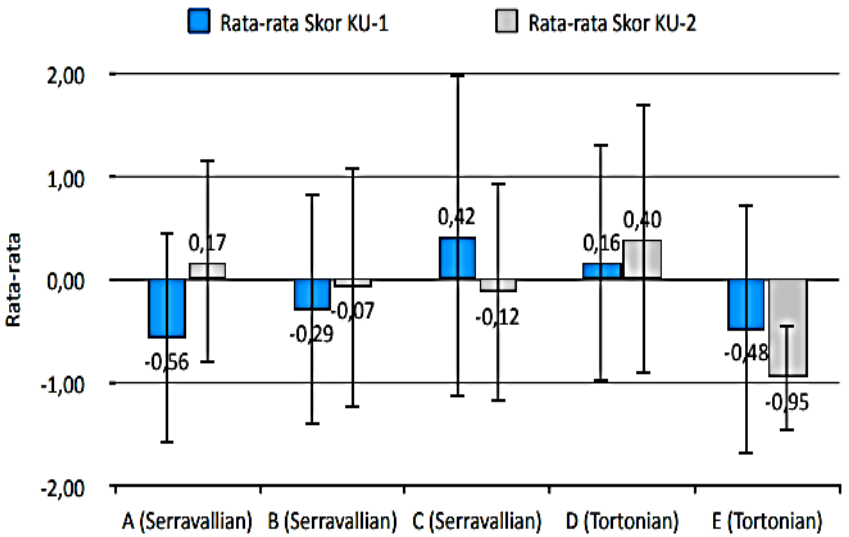
Gambar 4.10 Peta proses sedimentasi dan arah umum arus purba pada interval Serravallian. Zona A didominasi oleh proses gelombang. Zona B didominasi oleh proses fluvial dan zona C didominasi oleh proses gelombang dan pasang surut.



Gambar 4.11 Peta yang proses sedimentasi dan arah umum arus purba pada interval Tortonian. Zona D didominasi oleh proses fluvial. Zona E lebih didominasi oleh proses pasang surut. Kedua zona dibedakan dari proses dominasi yang berbeda.

Tabel 4.6 Tabulasi nilai rata-rata skor KU-1 dan KU-2 setiap singkapan pada zona dan interval Serravallian dan Tortonian.

Zona dan Umur	Singkapan	Rata-rata skor KU-1	Rata-rata skor KU-2	Std. Deviasi Skor KU-1	Std. Deviasi skor KU-2
A (Serravallian)	BER---1, BER---2	-0,56	0,17	1,03	0,98
B (Serravallian)	BTP, SMP, ARD, CTR, LNG	-0,29	-0,07	1,14	1,17
C (Serravallian)	PAL, TAM---1, TAM---2, MAN	0,42	-0,12	1,56	1,06
D (Tortonian)	CMT, SSG	0,16	0,40	1,15	1,31
E (Tortonian)	ANG---1, ANG---2, ANG---3	-0,48	-0,95	1,21	0,51



Gambar 4.12 Diagram yang menunjukkan nilai rata-rata dan standar deviasi skor KU-1 dan KU-2 di setiap zona pada Serravallian dan Tortonian.

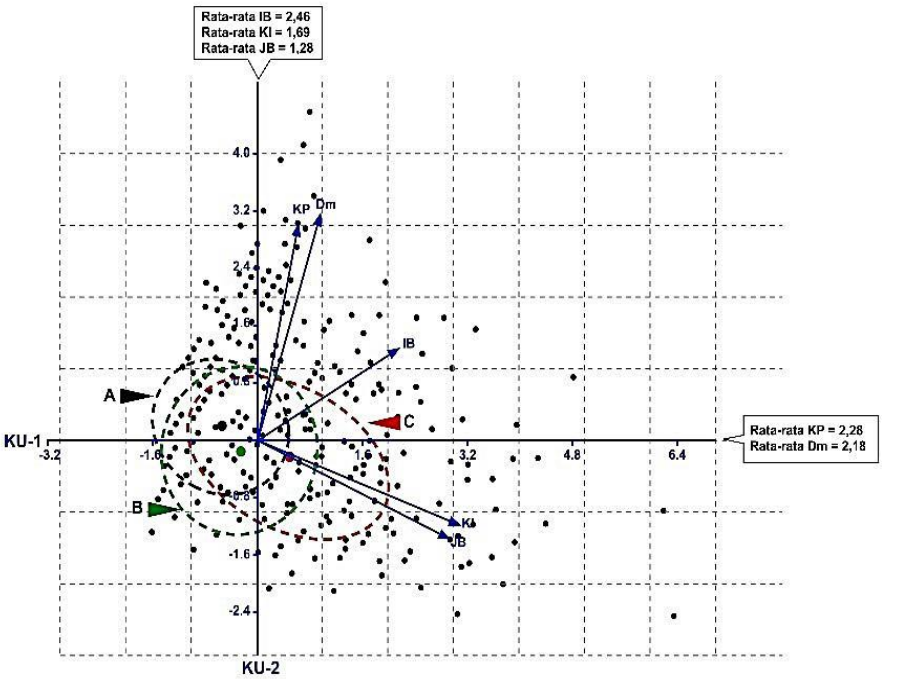
Antara skor KU-1 dan skor KU-2. Elips-elips yang tersajikan dalam Gambar 4.13 memperlihatkan saling tumpang tindih antara zona A, B dan C. Karena skor KU-1 semakin besar dari zona A, B dan C maka dari zona A, B dan C berturut-turut menunjukkan varian polispesifik yang semakin besar.

Elips kedua zona condong pada sumbu KU-2 (Gambar 4.14) menunjukkan masing-masing zona dipengaruhi oleh komponen yang sama yaitu KU-2. Kelonjongan elips zona D dan E menunjukkan kecenderungan korelasi positif antara skor KU-1 dan skor KU-2. Luas irisan yang ditunjukkan oleh Gambar 4.14 mengisyaratkan zona D dan E lebih banyak menunjukkan perbedaan daripada persamaan. Rasio varian monospesifik dan polispesifik zona tengah lebih besar daripada zona selatan. Berdasarkan orientasi elips-elips pada Gambar 4.13 dan 4.14, maka interval Serravallian lebih dikontrol oleh KU-1, sedangkan interval Tortonian cenderung dikontrol oleh KU-2.

Berdasarkan Gambar 4.15 sampai Gambar 4.7, terdapat lebih dari satu asosiasi iknofosil yang mendominasi di setiap zona. Histogram Pareto probabilitas asosiasi iknofosil di zona A (Gambar 4.15) dan zona B (Gambar 4.17) menunjukkan kesenjangan antara asosiasi-asosiasi iknofosil dominan dan yang tidak dominan. Berbeda dengan histogram Pareto zona C (Gambar 4.17), kesenjangan probabilitas asosiasi-asosiasi iknofosil relatif tidak signifikan.

Distribusi Skor KU-1 dan KU-2

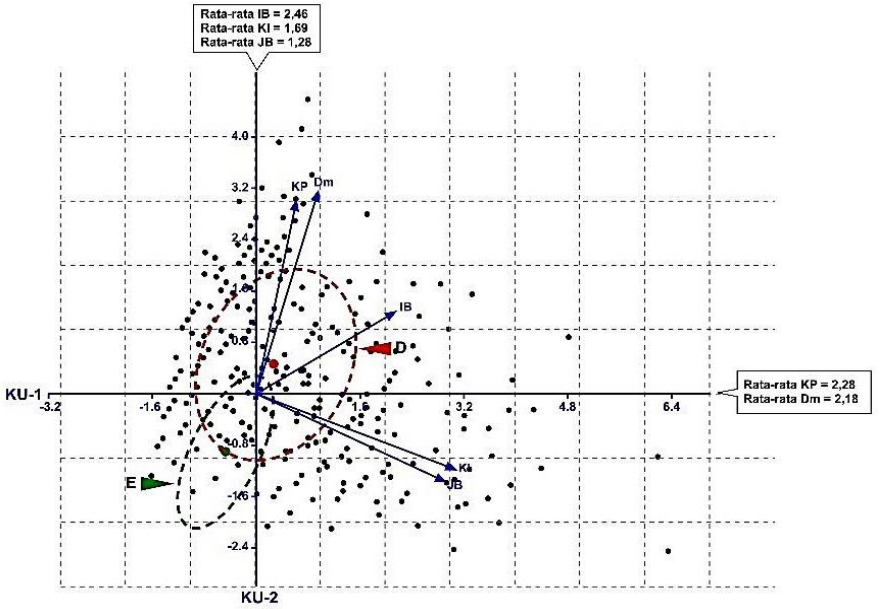
Identifikasi asosiasi iknofosil yang berkembang pada interval Serravallian menunjukkan *Skolithos, Paleophycus, Ophiomorpha* dan *Planolites* adalah asosiasi-asosiasi iknofosil yang umum dijumpai. Jika menarik *cutoff* 60% frekuensi kumulatif, zona A didominasi oleh asosiasi *Skolithos* dan *Paleophycus* (Gambar 4.15). Zona B didominasi olah *Skolithos* dan *Ophiomorpha* (Gambar 4.16). Zona C merupakan dominasi asosiasi *Ophiomorpha, Planolites* dan *Skolithos* (Gambar 4.17).



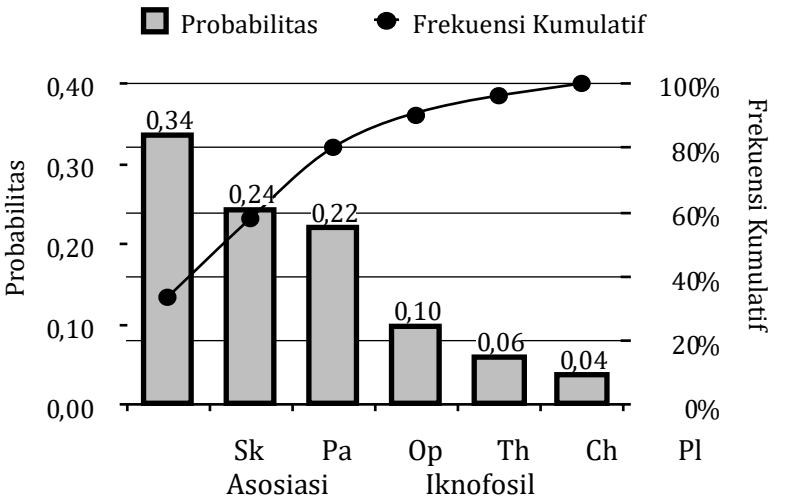
Gambar 4.13 Klasterisasi unit-unit iknofabrik: zona A (elips hitam), B (elips hijau) dan zona C (elips merah) interval Serravallian.

Dapat dipastikan bahwa asosiasi *Skolithos* selalu muncul sebagai asosiasi iknofosil dominan. Asosiasi *Ophiomorpha* hanya dominan di zona B dan C. Jika asosiasi iknofosil dominan di setiap zona pada interval Serravallian diperhatikan dengan seksama, maka asosiasi iknofosil kunci di zona A adalah *Paleophycus* dan asosiasi iknofosil kunci zona C adalah *Planolites*.

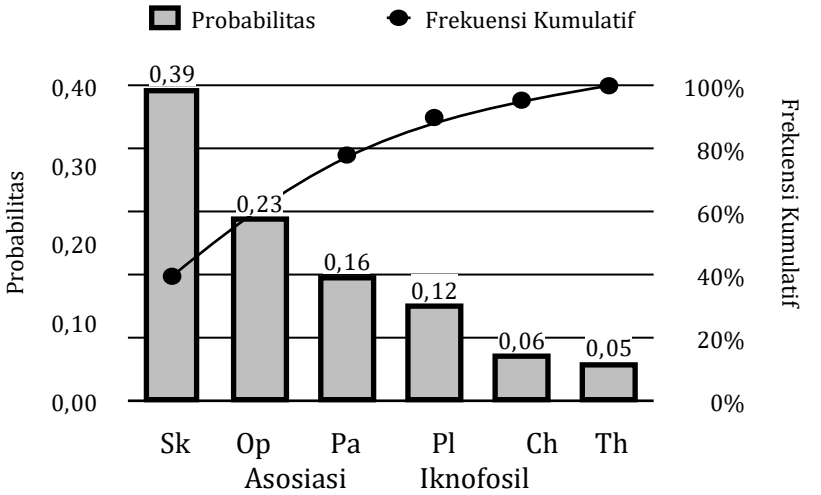
Histogram Pareto asosiasi iknofosil interval Tortonian sebagaimana yang disajikan dalam Gambar 4.18 dan 4.19 menunjukkan hanya satu asosiasi iknofosil yang dominan. Terdapat perbedaan probabilitas kehadiran asosiasi iknofosil antara asosiasi iknofosil yang dominan dan yang tidak dominan. Jika menarik *cutoff* 60% frekuensi kumulatif, zona E didominasi oleh asosiasi *Skolithos* dan zona D didominasi oleh asosiasi *Ophiomorpha*.



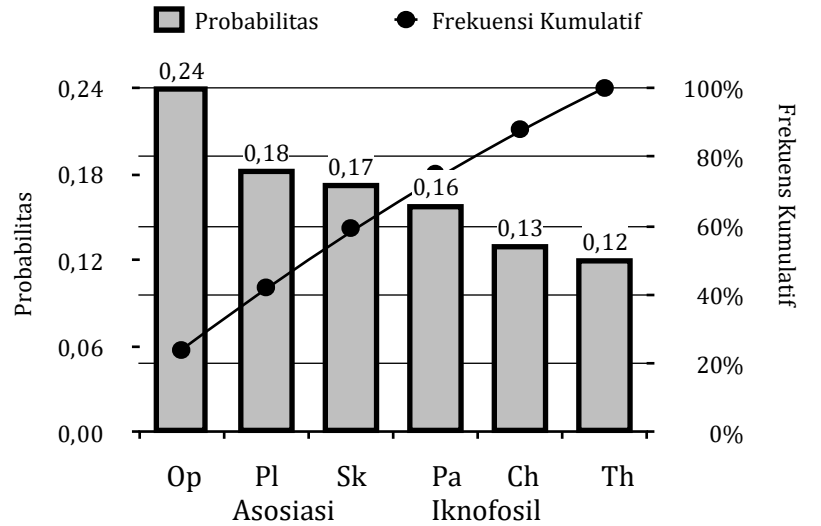
Gambar 4.14 Klasterisasi unit-unit iknofabrik: zona D (elips merah) dan E (elips hijau) interval Tortonian.



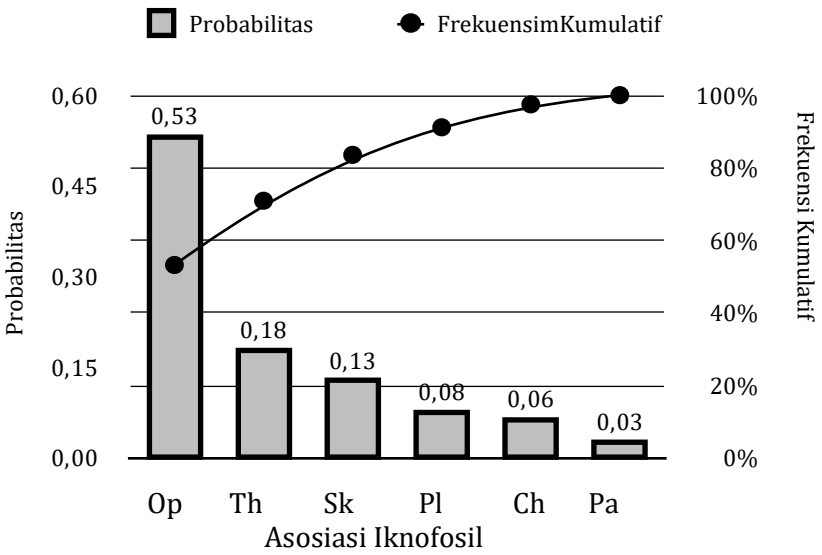
Gambar 4.15 Histogram Pareto probabilitas asosiasi iknofosil di zona A interval Serravallian. Asosiasi iknofosil yang mendominasi adalah asosiasi *Skolithos* dan *Paleophyus*.



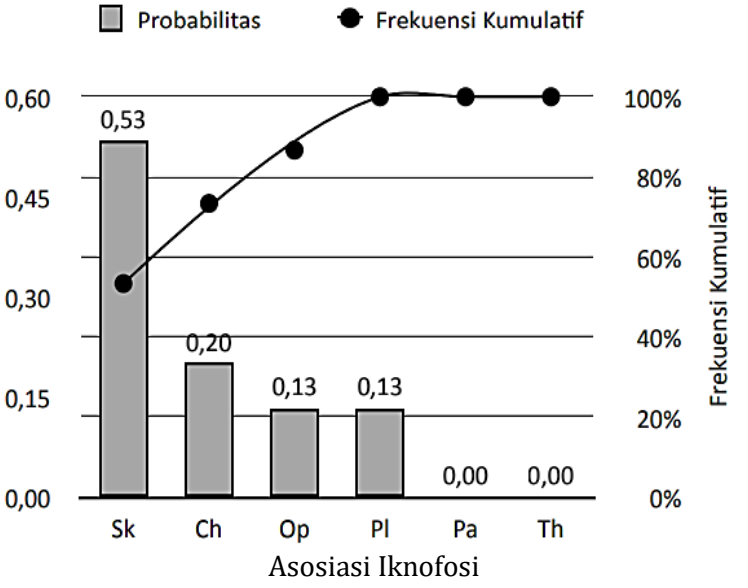
Gambar 4.16 Histogram Pareto probabilitas asosiasi iknofosil di zona B interval Serravallian. Asosiasi iknofosil yang mendominasi adalah asosiasi *Skolithos* dan *Ophiomorpha*.



Gambar 4.17 Histogram Pareto probabilitas asosiasi iknofosil di zona C interval Serravallian. Asosiasi iknofosil yang dominan adalah *Ophiomorpha, Planolites* dan *Skolithos*. Pada interval ini iknofosil cenderung lebih beragam dibandingkan zona lainnya pada interval umur yang sama.



Gambar 4.18 Histogram Pareto probabilitas kehadiran asosiasi iknofosil di zona D interval Tortonian. Asosiasi iknofosil yang mendominasi adalah asosiasi *Ophiomorpha*.



Gambar 4.19 Histogram Pareto probabilitas kehadiran asosiasi iknofosil di zona E interval Tortonian. Asosiasi iknofosil yang mendominasi adalah asosiasi *Skolithos*.

Berdasarkan pola dominasi asosiasi iknofosil di setiap interval umur, maka interval umur Serravallian lebih didominasi oleh asosiasi iknofosil lebih dari satu sedangkan pada interval Tortonian hanya didominasi oleh satu asosiasi iknofosil.

Setiap singkapan di daerah penelitian dapat dihitung rata-rata dan standar deviasi skor KU-1 dan KU-2 nya (Tabel 4.6). Peta kontur rata-rata skor KU-1 dan KU-2 pada interval Serravallian dan Tortonian dapat dibuat.

Tabel 4.7 Tabulasi nilai rata-rata skor KU-1 dan KU-2 setiap singkapan pada zona dan interval Serravallian dan Tortonian.

Interval	Zona	Singkapan	Rata-rata Skor KU-1	Skor KU-2	Standar Deviasi Skor KU-1	Skor KU-2
Serravallian	A	BER-1	-0,62	0,27	0,80	0,98
		BER-2	-0,51	0,09	1,19	0,98
		BTP	-0,69	0,04	0,95	0,90
	B	SMP	-0,41	-0,16	1,05	0,99
		ARD	0,24	0,04	1,13	1,10
		LNG	-0,46	0,07	1,12	1,32
		CTR	-0,04	-0,28	1,22	1,33
	C	PAL TAM-1	0,59	0,52	1,30	1,29
		TAM-2	0,11	-0,52	1,55	0,85
		MAN	0,54	-0,22	1,62	1,05
		CMT	0,29	0,05	1,67	0,71
Tortonian	D	SSG	0,46	0,24	1,12	1,28
		ANG-3	-0,12	0,55	1,12	1,34
	E	ANG-2	-0,23	-0,77	0,95	0,90
		ANG-1	-1,17	-1,47	0,89	0,39
			-0,33	-0,83	1,63	0,57

Setiap singkapan di daerah penelitian dapat dihitung rata-rata dan standar deviasi skor KU-1 dan KU-2 nya (Tabel 4.6). Peta kontur rata-rata skor KU-1 dan KU-2 pada interval Serravallian dan Tortonian dapat dibuat.

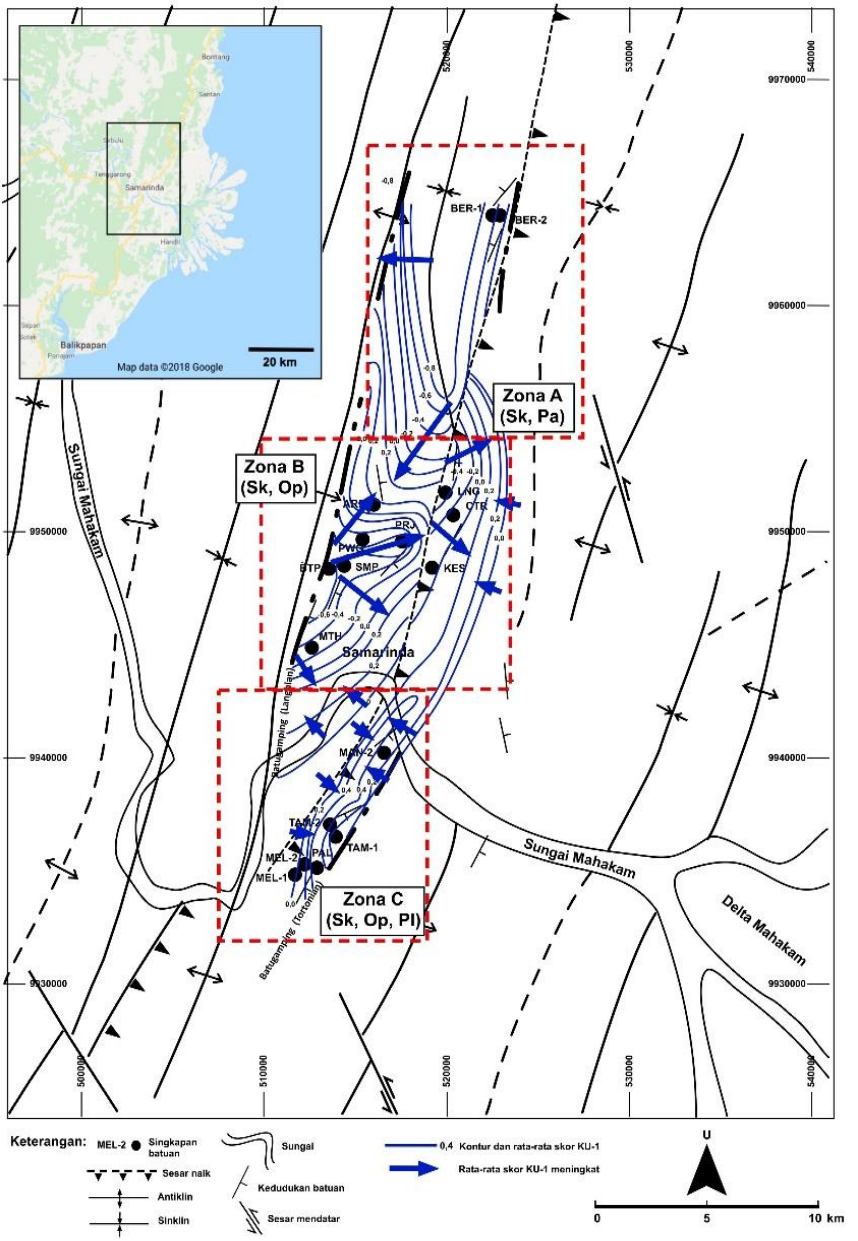
Pada interval Serravallian (Gambar 4.20), zona A menunjukkan rata-rata skor KU-1 semakin besar relatif ke arah barat, rata-rata skor KU-1 di zona B semakin besar relatif ke arah timur, sedangkan rata-rata skor KU-1 di zona C justru menunjukkan semakin besar secara relatif baik ke arah barat maupun timur.

Asosiasi iknofosil zona A seperti *Skolithos* dan *Paleophycus* berubah dari yang bersifat monospesifik menjadi polispesifik relatif ke arah barat. Asosiasi iknofosil di zona B seperti *Skolithos* dan *Ophiomorpha* berubah dari yang bersifat monospesifik menjadi polispesifik relatif ke arah timur. Semakin besar skor KU-1 asosiasi iknofosil di zona C seperti *Skolithos, Ophiomorpha* dan *Planolites* berubah dari yang bersifat monospesifik menjadi polispesifik baik ke arah barat maupun ke arah timur.

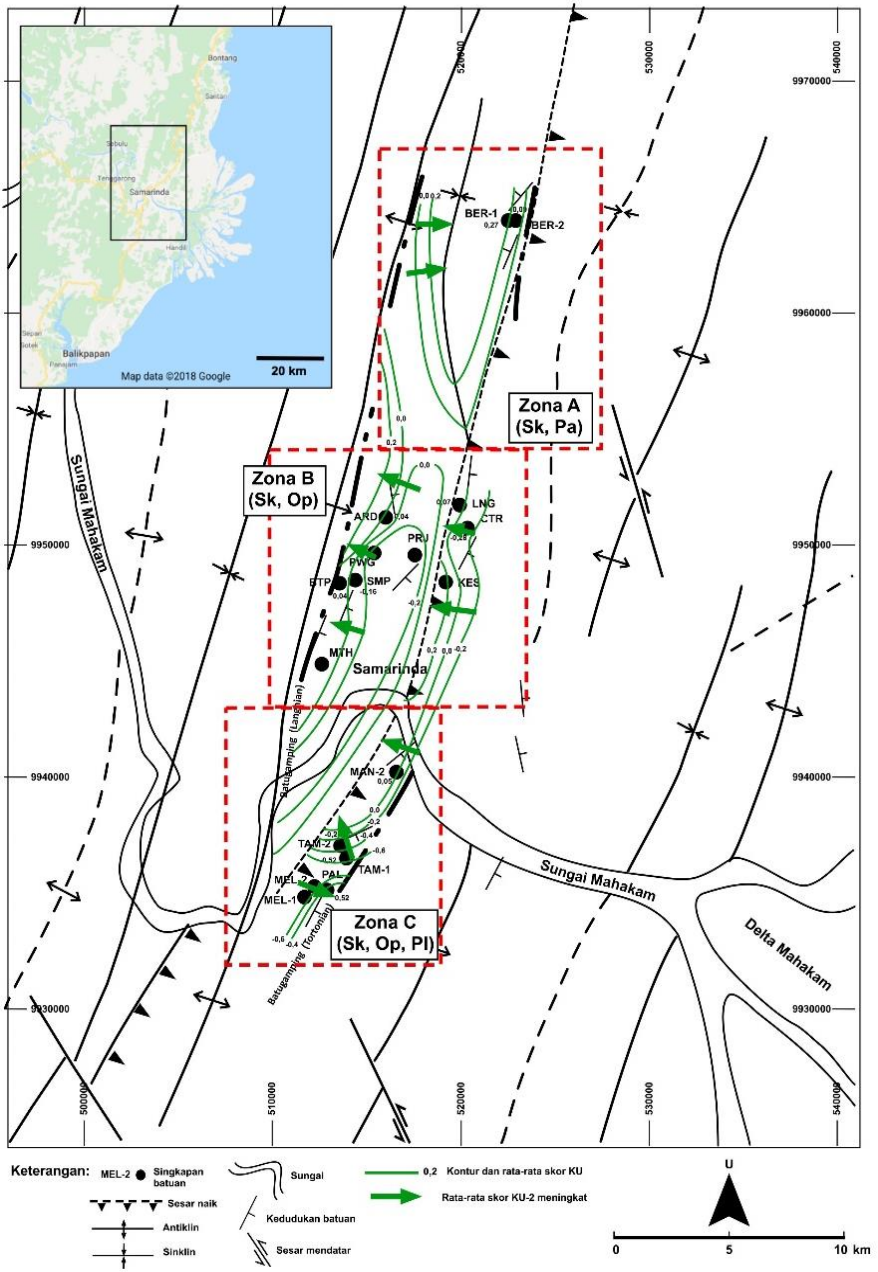
Asosiasi-asosiasi iknofosil tersebut di atas juga menunjukkan perubahan rata-rata skor KU-2 nya. Asosiasi *Skolithos* dan *Paleophycus* di zona A menunjukkan rata-rata skor KU-2 yang semakin besar ke arah timur. Dengan kata lain, KP dan Dm *Skolithos* dan *Paleophycus* semakin besar ke arah timur.

Asosiasi *Skolithos* dan *Ophiomorpha* di zona B menunjukkan rata-rata skor KU-2 semakin besar ke arah barat. Dengan kata lain, KP dan Dm asosiasi *Skolithos* dan *Ophiomorpha* semakin besar ke arah barat. Demikian juga dengan asosiasi *Skolithos, Ophiomorpha* dan *Planolites* di zona C menunjukkan rata-rata skor KU-2 relatif semakin besar ke arah barat yang menunjukkan KP dan Dm nya semakin besar ke arah barat.

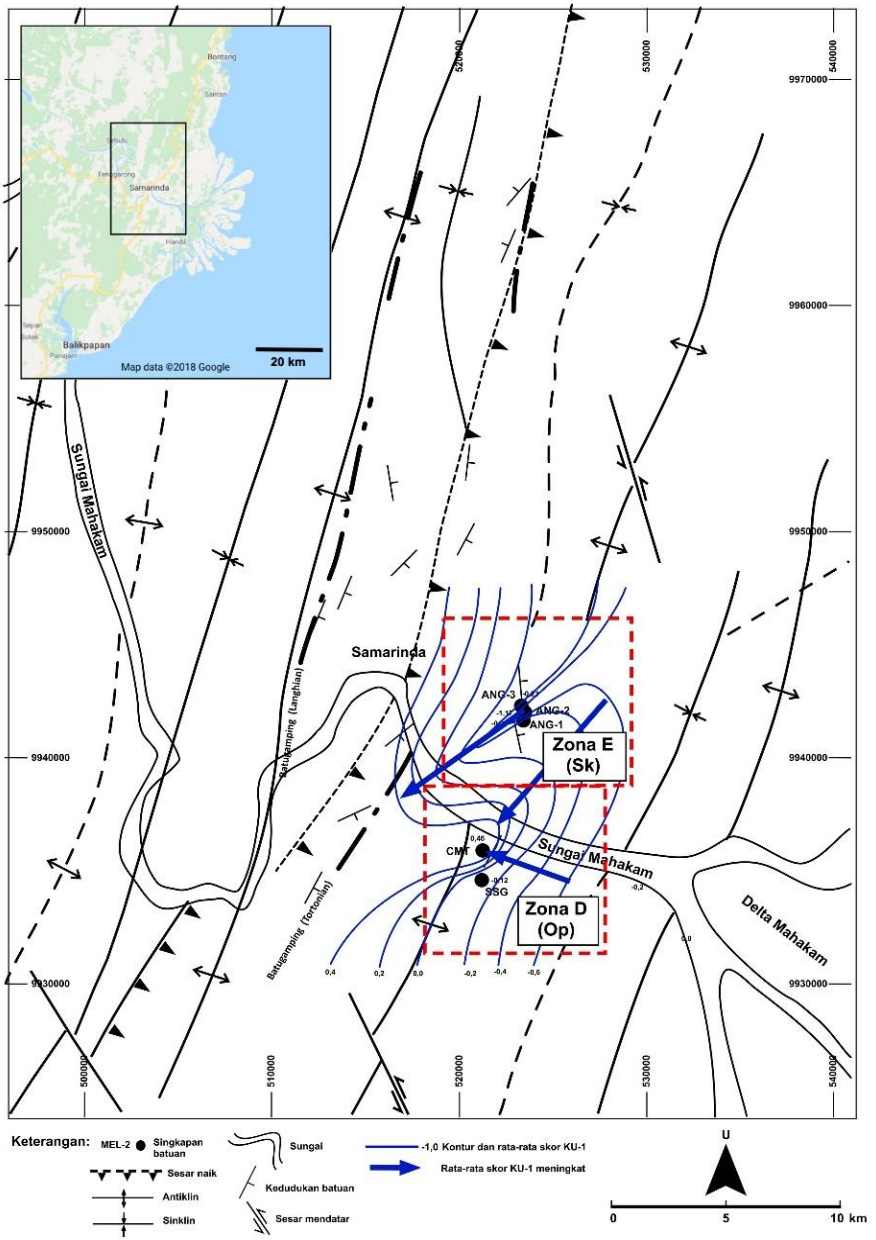
Jika diperhatikan pola distribusi rata-rata skor KU-1 dan KU-2 dan arah umum arus purbanya pada interval Serravallian, maka menunjukkan gejala keterdapatan korelasi antara distribusi skor KU-1 maupun KU-2 terhadap arah umum arus



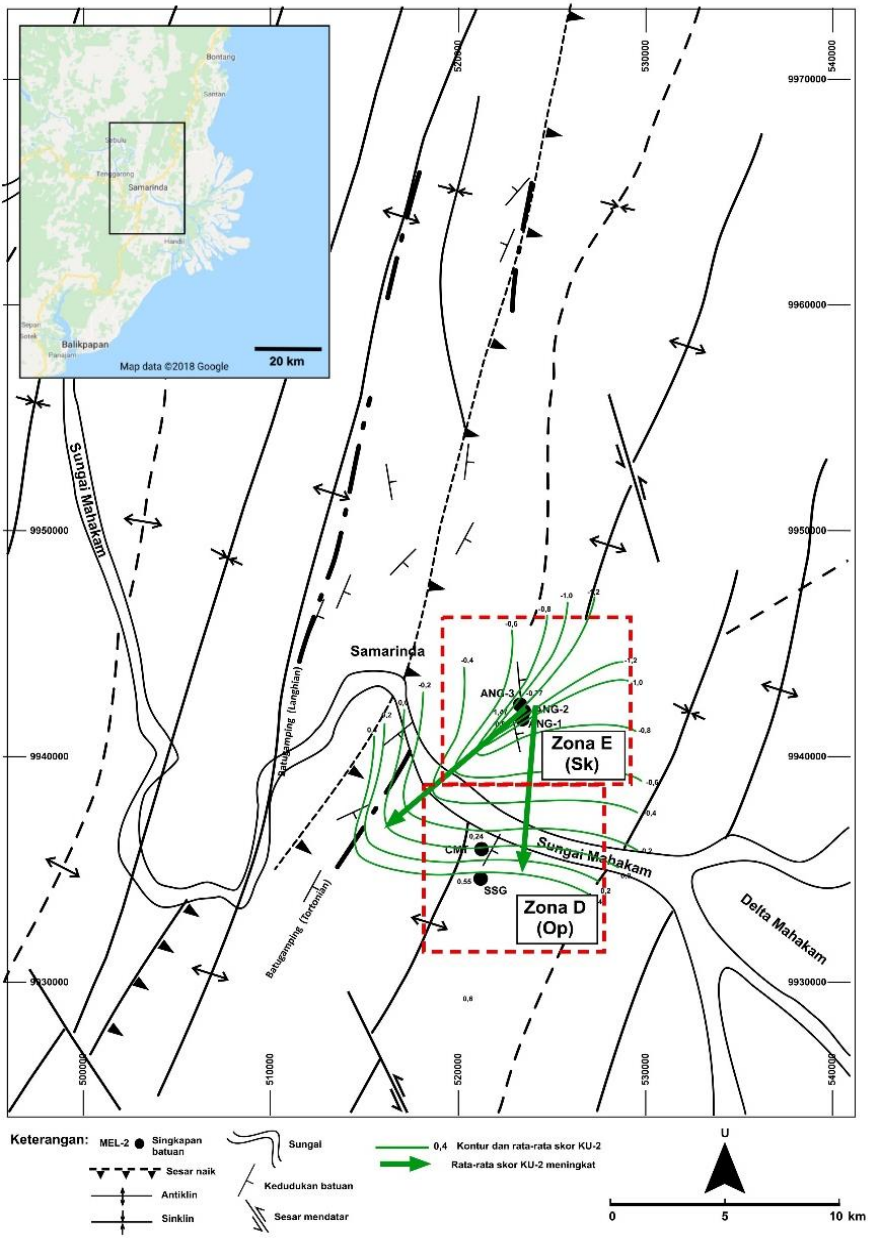
Gambar 4.20 Peta pola distribusi rata-rata skor KU-1 dan zonasi asosiasi iknofosil tertentu interval Serravallian. Rata-rata skor KU-1 meningkat searah dengan arah anak panah.



Gambar 4.21 Peta pola distribusi rata-rata skor KU-2 dan zonasi asosiasi iknofosil tertentu interval Serravallian.



Gambar 4.22 Peta pola distribusi rata-rata skor KU-1 dan zonasi asosiasi iknofosil tertentu Tortonian. Rata-rata skor KU-1 meningkat searah dengan arah anak panah biru.



Gambar 4.23 Peta pola distribusi rata-rata skor KU-2 dan zonasi asosiasi iknofosil tertentu. Rata-rata skor KU-2 meningkat searah anak panah hijau.

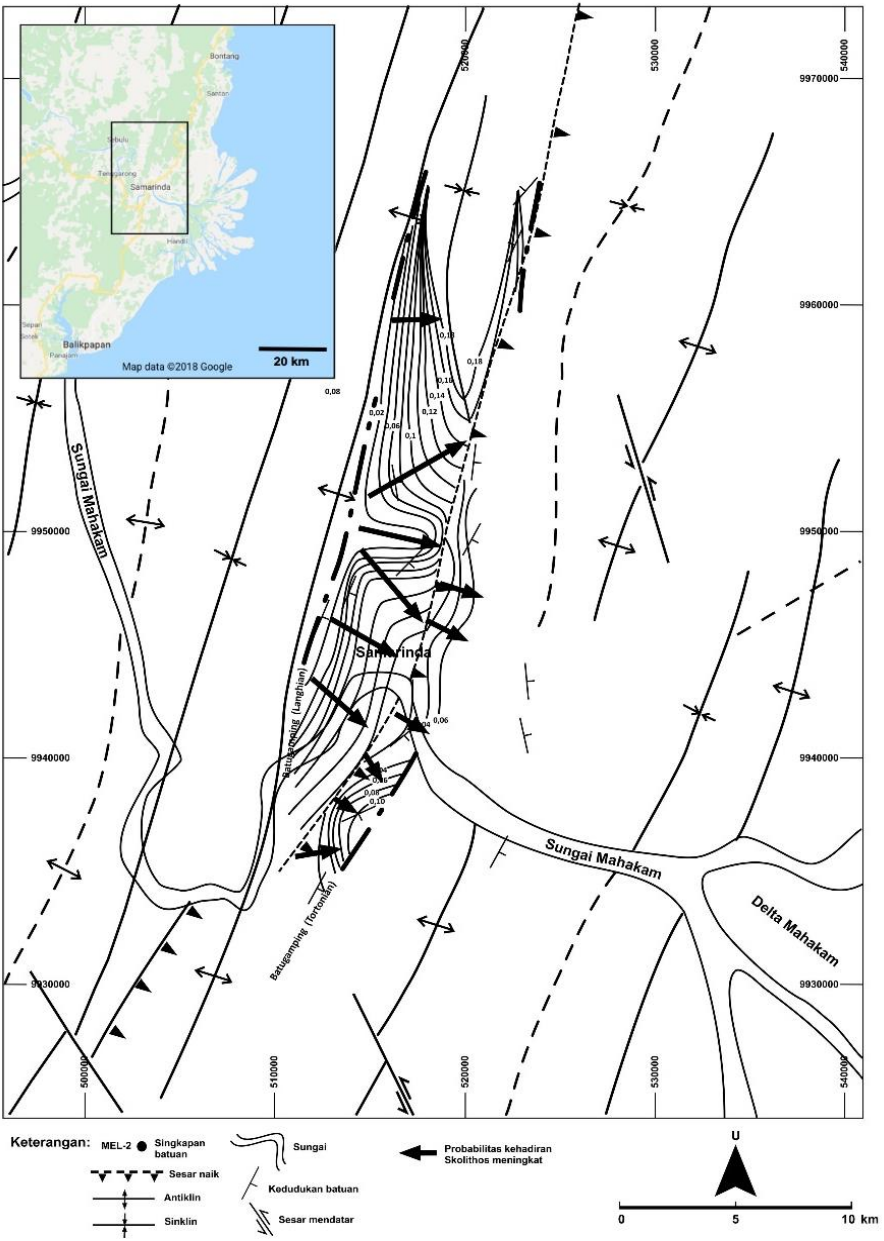
Pada interval Tortonian (Gambar 4.22 dan Gambar 4.23), kedua zona menunjukkan rata-rata skor KU-1 dan KU-2 yang semakin besar relatif ke arah barat. Gejala ini berkorelasi dengan pola umum arah arus purbanya. Asosiasi Ophiomorpha di dalam zona D dan asosiasi Skolithos di dalam zona E berubah dari yang bersifat monospesifik menjadi polispesifik relatif ke arah barat.

Distribusi Asosiasi Iknofosil

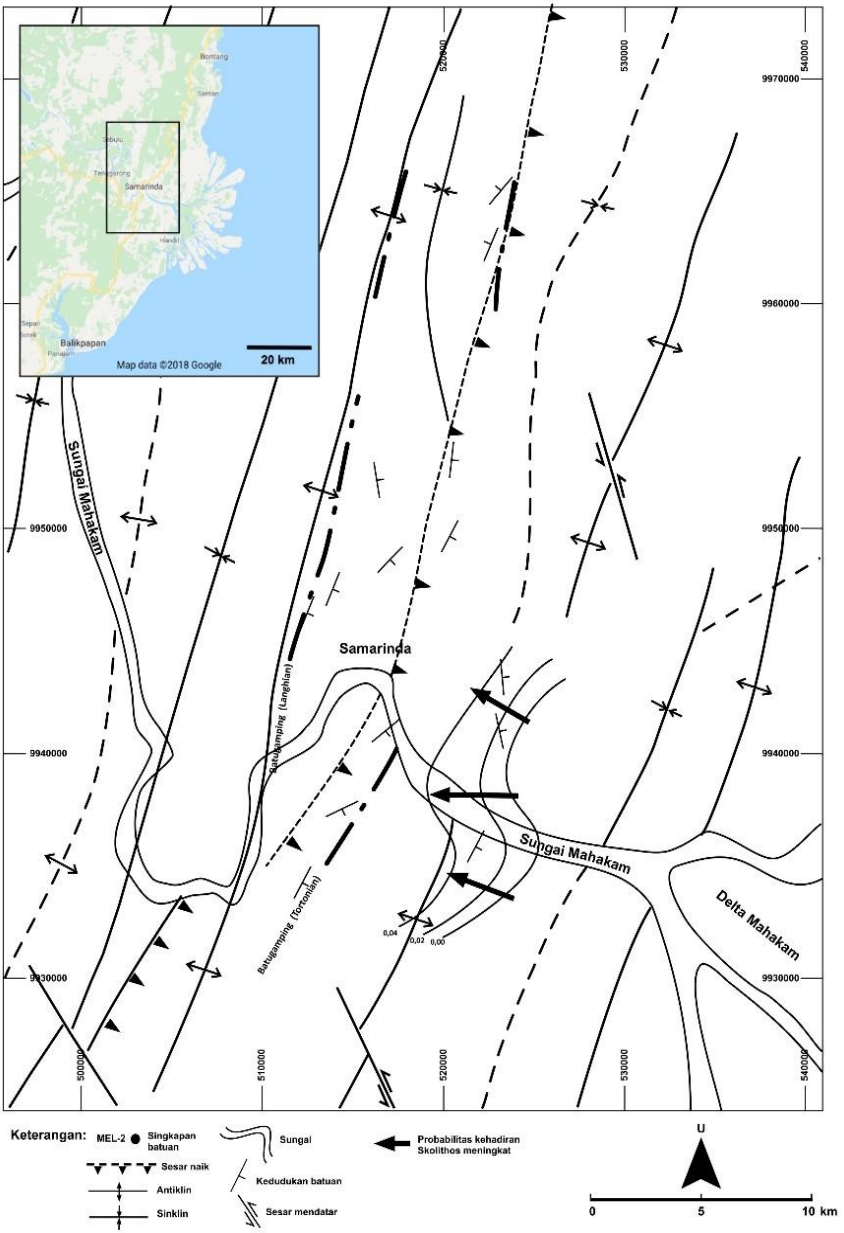
Pola distribusi asosiasi iknofosil yang dipilih adalah asosiasi iknofosil yang probabilitas kehadirannya paling dominan. Berdasarkan Gambar 4.20 dan Gambar 4.21, asosiasi *Skolithos* adalah asosiasi iknofosil dominan yang selalu muncul secara konsisten disetiap zona. Peta distribusi asosiasi *Skolithos* dalam Gambar 4.24 menunjukkan probabilitas kehadiran asosiasi *Skolithos* semakin meningkat ke arah timur pada sistem pengendapan interval Serravallian.

Probabilitas kehadiran asosiasi *Skolithos* pada interval Tortonian menunjukkan gejala yang bertolak belakang sebagaimana yang ditunjukkan pada interval Serravallian (Gambar 4.25).

Pada interval Serravallian, tren perkembangan asosiasi *Skolithos* ini tidak selaras dengan pola distribusi skor KU-1 dan KU-2. Bertolak belakang dengan asosiasi *Skolithos* yang justru selaras dengan pola distribusi skor KU-1 dan KU-2. Tren perkembangan asosiasi *Skolithos* lebih selaras dengan arah sedimentasi regional barat-timur di Cekungan Kutai.



Gambar 4.24 Peta distribusi asosiasi *Skolithos* pada interval Serravallian. Tren yang terlihat searah dengan arah umum sedimentasi regional barat-timur di Cekungan Kutai.



Gambar 4.25 Peta distribusi asosiasi *Skolithos* pada interval Tortonian. Tren yang terlihat berlawanan arah dengan arah umum sedimentasi regional barat-timur di Cekungan Kutai.

BAB 5

Rekonstruksi Sistem Pengendapan

Iknotaksa yang telah diidentifikasi, asosiasi iknofosil yang telah ditentukan beserta beserja jenis variannya (monospesifik dan polispesifik), variabel-variabel iknofabrik (IB, KI, JB, KP dan Dm) serta hasil pemetaan rata-rata skor KU-1 dan KU-2 digunakan dalam merekonstruksi sistem pengendapan. Penjelasan makna dari hasil-hasil tersebut di atas akan dijelaskan menjadi beberapa sub bab berikut ini.

Paleoekologi Asosiasi Iknofosil

Paleokologi yang kompleks sistem pengendapan yang di dalamnya terdapat interaksi proses fluvial dan proses asal laut mengakibatkan berkembangnya iknotaksa yang berasosiasi dengan laut dangkal hingga laut dalam. Dengan demikian sulit menjadikan iknotaksa tertentu sebagai indikator paleobatimetri dan lingkungan pengendapan tertentu. Hanya enam iknotaksa yang mendominasi dari 34 iknotaksa dan dominasi varian monospesifik adalah indikator penting sistem pengendapan yang di dalamnya terdapat interaksi proses fluvial dan proses asal laut. Merujuk pada Pemberton dan Wightman (1992); Gingras dkk. (1999); Gingras dan MacEachern (2012), gejala-gejala tersebut di atas berasosiasi dengan lingkungan brackish. Paleoekologi enam asosiasi iknofosil utama akan dijelaskan sebagai berikut.

1. Paleoekologi *Ophiomorpha*

Unit-unit iknofabrik monospesifik yang hanya tersusun oleh *Ophiomorpha* menunjukkan paleoekologi yang spesifik. Paleoekologi tersebut adalah *Ophiomorpha* sebagai indikator substrat yang bersifat *thixotrophic* (Bromley, 1996). *Thixotrophic* adalah termi-nologi kondisi sedimen ketika diterapkan suatu gaya, maka akan menurunkan kekuatannya dan menjadi lebih cair (Bromley, 1996).

Ophiomorpha mengindikasikan keterdapatan proses erosi dan pengendapan silih berganti (Howard dan Frey, 1975; Howard, 1978). Howard dan Frey (1975); Howard (1978) juga menjelaskan bahwa jika terjadi erosi pada *sediment water interface* (SWI), percabangan baru akan terbentuk pada *Ophimorpha*, sehingga pemanfaatan ruang cenderung berkembang secara lateral. Jika terjadi sedimentasi cepat yang mengakibatkan *tube burrow* tertimbun, maka fauna menerobos secara vertikal ke arah SWI dengan membentuk struktur baru.

Kondisi erosi dan pengendapan silih berganti juga ditandai dengan besarnya ratarata kedalaman penetrasi (KP) dan standar deviasi yang ditunjukan oleh *Ophiomorpha*. Adanya variasi KP dan percabangan di dalam unit iknofabrik diduga terkait dengan perbedaan tingkat kecepatan sedimentasi dan erosi yang berlangsung.

Ophiomorpha dibangun oleh fauna dengan cara menggali substrat lalu memperkuat dindingnya dengan *pellet* atau fragmen batuan (Bromley, 1996). Struktur kompleks *Ophiomorpha* memungkinkan fauna bergerak leluasa ke segala arah di dalam struktur. Struktur kompleks *Ophiomorpha* adalah indikator jendela kolonisasi yang lama (Pollard dkk., 1993) dan permanen (Miller, 2007). *Ophiomorpha* dipercaya dibuat oleh fauna yang bertindak sebagai *suspension feeder* dalam air jernih, misalnya *Callianasa major* (Bromley, 1967; Frey dkk., 1978). Indikasi aktifitas *suspension feeder* dan aktifitas ingesta oleh *deposit feeder,* menunjukkan *Ophiomorpha* tidak saja menun-jukkan *behavior domichnia* tapi juga *fodinichnia.*

Varian-varian asosiasi *Ophiomorpha* mengindikasikan modifikasi strategi untuk beradaptasi terhadap paleoekologi. Misalnya jika *Ophiomorpha* berasosiasi dengan *Paleophycus, Skolithos, Siponichnus, Cylindrichnus, Paleophycus* dan *Conichnus* atau iknofosil simpel lainnya maka mengindikasikan adanya variasi *behavior* dan paleoekologinya. Paling tidak variasi paleoekologi yang dimaksud misalnya terkait dengan kestabilan substrat dan/atau jenis fauna yang menghuninya. Varian *Ophiomorpha* yang berasosiasi dengan iknofosil

dengan *behavior Fugichnia* mengindikasikan proses pengendapan yang sangat cepat. Demikian juga dengan kehadiran *Siphonichnus* dalam asosiasi *Ophiomorpha* adalah contoh fauna yang tetap menjaga hubungannya terhadap SWI (Goldring, 1964).

Asosiasi *Ophiomorpha* dengan iknofosil lainnya seperti *Rhizocorallium, Tanadium, Scolicia, Rosselia, Thalassinoides, Macaronichnus, Asterosoma, Planolites, Teichichnus, Alcyonidiopsis* adalah paloekomunitas yang di dalamnya tidak hanya hidup *suspension feeder* tapi juga *deposit feeder*. Jika *deposit feeder* adalah indikator rezim aliran rendah (Purdy, 1964) dan berair keruh (Rhoads dan Young, 1970), maka gejala berkumpulnya *suspension feeder* dan *deposit feeder* mengindikasikan kondisi lingkungan dengan variasi-variasi rezim aliran dan kondisi kekeruhan air. Pickerill dan Narbonne (1995) juga menambahkan bahwa asosiasi *Ophiomorpha* dengan *Alcyonidiopsis* adalah indikator paleokomunitas yang di dalamnya terdapat *suspension feeder* dan *deposit feeder*.

Varian asosiasi *Ophiomorpha* yang berasosiasi dengan *Chondrites* mengindikasikan kondisi lingkungannya menunjukkan dinamika konsentrasi oksigen dalam peleohabitatnya (McIlroy, 2004). Dari segi faktor biologi asosiasi *Ophiomorpha* dan *Chondrites* juga dapat mengindikasikan adanya penggantian paloekomunitas (Bromley, 1996).

2. Paleoekologi *Skolithos*

Dominasi varian monospesifik, struktur simpel *Skolithos* dipercaya dibuat oleh *suspension feeder* (Buatois dan Mángano, 2004) dalam air jernih (Rhoads dan Young, 1970). Sejenis cacing, *crustaceans, holoturians* dan anemon laut yang membuat *Skolithos* hidup dengan menanamkan diri di dalam substrat lalu melakukan penetrasi dan kompresi mengikuti bentuk tubuh (Dashtgard dan Gingras, 2012).

Merujuk pada Miller (2003, 2007), kesederhanaan struktur *Skolithos* dikategorikan sebagai struktur insidental. Asosiasi *Skolithos* dengan *Conichnus, Bergaueria, behavior Fugichnia,* adalah paleokomunitas struktur insidental. Struktur laminasi di dalamnya diduga terkait *burrow* terbuka yang kemudian diisi oleh material sedimen.

Asosiasi *Skolithos* juga ditafsirkan sebagai indikator paleohabitat rezim aliran tinggi (Pemberton dkk., 2001). Gejala ini di-tandai asosiasinya *Skolithos* dengan iknofosil lainnya seperti *Ophiomorpha,*

Monocraterion, iknofosil *behavior Fugichnia, Arenicolites, Cylindrichnus, Polykladichnus, Psilonichnus dan Paleophycus.* Asosiasinya dengan fauna dengan *behavior equilibrichnia* mengindikasikan fauna yang selalu menjaga posisinya untuk tetap kontak dengan SWI (Goldring, 1964).

Skolithos yang berasosiasi dengan *Rosselia, Scolicia, Asterosoma, Zoophycos, Planolites* mengindikasikan keterdapatan *deposit feeder* dalam asosiasi *Skolithos*. Karena *deposit feeder* sebagai indikator rezim aliran rendah dan kondisi air keruh (Rhoads dan Young, 1970), maka paleohabitat asosiasi *Skolithos* tersebut di atas ditafsirkan sebagai indikator modifikasi rezim aliran dan kekeruhan air yang. Rezim aliran tinggi yang dimodifikasi oleh rezim aliran rendah dan air yang relatif jernih diselingi oleh air yang keruh.

3. Paleoekologi *Paleophycus*

Sebagaimana asosiasi *Ophiomorpha* dan *Skolithos*, asosiasi *Paleophycus* didominasi oleh varian monospesifik, yaitu asosiasi yang hanya tersusun oleh *Paleophycus*. Asosiasi *Paleophycus* dikategorikan sebagai struktur insidental. Ketika *Paleophycus* berasosiasi dengan *Thalassinoides,* asosiasi *Paleophycus* menunjukkan paleokomunitas yang relatif lebih permanen.

Tidak ada struktur khusus di dalam *Paleophycus* menunjukkan pengisian material sedimen pada kondisi *burrow* yang terbuka. Keberadaan dinding pada *Paleophycus* merupakan strategi adaptasi fauna terhadap kondisi substrat yang bersifat *thixotrophic* sebagaimana dengan *Ophimorpha* dan *Schaubcylindrichnus.* Karena *Ophiomorpha* adalah struktur yang lebih permanen, maka asosiasi *Paleophycus* dengan *Ophiomorpha* menunjukkan paleokomunitas dengan struktur yang relatif lebih permanen.

Asosiasi *Paleophycus* dengan *Planolites, Asterosoma, Rhizocorallium, Teichichnus, Scolicia* dan *Thalassinoides* mengindikasikan modifikasi strategi mendapatkan makanan yaitu asosiasi *Paleophycus* yang di dalamnya terdapat *deposit feeder.* Bentuk asosiasi tersebut sekaligus pula menunjukkan paleohabitat yang di dalamnya terdapat variasi tipe substrat. Jika *Paleophycus* adalah indikator rezim aliran tinggi (Pemberton dkk., 2001), maka asosiasinya dengan iknofosil produk dari *deposit feeder* mengindikasikan paleohabitat yang di dalamnya terdapat variasi rezim aliran. Asosiasi *Paleophycus* dengan *Chondrites*, mengindikasikan paleohabitat yang di dalamnya terdapat

dinamika konsentrasi oksigen atau bukti adanya variasi fauna yang mendiami paleohabitat (Bromley, 1996).

4. Paleoekologi *Planolites*

Dominasi varian monospesifik dan sebagai struktur simpel *Planolites* dibuat dengan cara intrusi oleh fauna (Ekdale dkk., 1984). *Burrow fill* kontras dengan batuan sekitarnya adalah bukti aktifitas ingesta oleh fauna *deposit* dan/atau *detritus feeder* (Pemberton dan Frey, 1982) terkait *behavior fodinichnia* dan *paschichnia* (Ekdale, dkk., 1984; Ekdale dan Stinnesbeck, 1998) pada substrat *dilatancy* (Bromley, 1996). *Dilatancy* adalah terminologi kondisi sedimen ketika diterapkan suatu gaya, maka akan meningkatkan kekuatannya (Bromley, 1996). Kesederhanaan struktur yang diperlihatkannya dikategorikan sebagai struktur insidental yang dikategorikan sebagai struktur yang mengisyaratkan jendela kolonisasi yang singkat.

Asosiasi *Planolites* dengan *Teichichnus, Asterosoma, Teichichnus, Thalassinoides, Rhizocorallium* dan *Scolicia* ditafsirkan sebagai paleokomunitas *deposit* atau *detritus feeder*. Karena *deposit feeder* berasosiasi dengan kondisi air keruh (Rhoads dan Young, 1970), maka *Planolites* adalah indikator kondisi air keruh. *Planolites* juga sebagai indikator substrat yang kaya akan material organik karbon (Savrda dan Bottjer, 1989).

Planolites lebih banyak berasosiasi dengan *Chondrites*. Gejala tersebut diduga terkait dengan kondisi lingkungan yang miskin oksigen (Savrda dan Bottjer, 1986, 1989). Pendapat ini juga diper-kuat dengan hasil penelitian Rhoads dan Morse (1971); Pearson dan Rosenberg (1978) yang menunjukkan semakin kecil ukuran *burrow* maka kandungan oksigen di dalam substrat semakin sedikit. Karena probabilitas *Planolites* yang sedikit yaitu 0,10 dibandingkan asosiasi-asosiasi iknofosil lainnya, maka kondisi miskin oksigen tidak selalu menjadi gejala yang umum di daerah penelitian.

5. Paleoekologi *Thalassinoides*

Dominasi varian monospesifik dengan struktur yang kompleks, *Thalassinoides* dibuat oleh fauna pada substrat *dilatancy*. Fauna membuatnya dengan cara menggali substrat. Kompleksitas yang di-tunjukkan oleh *Thalassinoides* mengindikasikan struktur permanen dan indikator jendela kolonisasi yang lama.

Ketika *Thalassinoides* berasosiasi dengan *Paleophycus, Skolithos* dan *Ophiomorpha* maka mengindikasikan adanya variasi tipe substrat. Ketika *Thalassinoides* berasosiasi dengan *Asterosoma*, *Rhizocorallium, Planolites, Phycosiphon* dan *Helminthodinichnites*, maka unit iknofabrik merefleksikan paleokomunitas yang dihuni oleh *deposit feeder*. Struktur *meniscate backfill* mengisyaratkan pro-ses ingesta oleh *deposit feeder*. Gejala keberadaan struktur laminasi di dalam *Thalassinoides* adalah akibat pengisian sedimen ke dalam *burrow* (Bromley, 1996). Penafsiran ini menjadi petunjuk bahwa *Thalassiondes* dapat dibuat oleh *suspension feeder* seperti *Crustacea* (Bromley, 1967).

Thalassinoides adalah indikator kondisi lingkungan yang miskin oksigen dan hampir tidak ada suplai sedimen (Lindström, 1979 dalam Ekdale dan Bromley, 2003). Namun demikian, jika *Thalassinoides* ditafsirkan bukan sebagai produk *suspension feeder* sebagaimana telah diulas sebelumnya, maka *Thalassinoides* tidak selalu sebagai indikator kondisi lingkungan yang miskin oksigen.

6. Paleoekologi *Chondrites*

Sebagaimana asosiasi-asosiasi iknofosil sebelumnya, asosiasi *Chondrites* didominasi oleh varian monospesifik. Struktur *Chondrites* yang kompleks ditafsirkan sebagai struktur permanen sebagaimana dengan *Ophiomorpha* dan *Zoophycos*.

Perbedaan pendapat apakah *Chondrites* dihasilkan oleh *suspension feeder* atau *deposit feeder* masih mengemuka. Simpson (1956); Bromley dan Ekdale (1984) berpendapat bahwa *Chondrites* dihasilkan oleh *suspension feeder* sedangkan Kotake (1991) berpendapat *Chondrites* dihasilkan oleh *deposit feeder*. Jika pendapat Simpson, (1956); Bromley dan Ekdale, (1984) yang digunakan, maka pertanyaannya adalah bagaimana material berukuran lempung dapat masuk ke dalam struktur *Chondrites* yang rata-rata diameternya yaitu 0,43 cm dan dengan rata-rata kedalaman penetrasi mencapai 18,37 cm sebagaimana yang dijumpai di daerah penelitian.

Kotake (1991) berpendapat bahwa material di dalam *Chondrites* merupakan akibat dari sebagian anggota tubuh fauna yang terbenam di dalam substrat untuk ekskresi dan bagian anggota tubuh lainnya di SWI memakan substrat yang bersifat *detritus* mau-pun *deposit*. Penjelasan dari Kotake (1991) ini menegaskan bahwa *Chondrites* adalah produk dari *deposit feeder*.

Ukuran fauna cenderung kecil-kecil pada lingkungan anoksik (Rhoads dan Morse, 1971; Pearson dan Rosenberg, 1978). Ketika melakukan penetrasi, fauna akan mempertimbangkan kandungan oksigen yang semakin sedikit di dalam substrat sejalan dengan semakin dalamnya penetrasi ke dalam substrat (Pearson dan Rosenberg, 1978; Tyson dan Pearson, 1991). Berdasarkan kedua pernyataan tersebut, maka semakin dalam penetrasi maka ukuran fauna juga semakin kecil. Kesimpulan tersebut berbeda dengan fakta di lapangan.

Penetrasi terdalam tidak saja ditunjukkan oleh *Chondrites* dan *Planolites* tapi juga oleh *Ophiomorpha*. Disini terlihat bahwa semakin dalam penetrasi tidak selalu diikuti dengan semakin kecilnya ukuran iknofosil. Jika asumsi *Chondrites* adalah produk dari *deposit feeder* sebagaimana yang diasumsikan oleh Kotake (1991), maka gejala-gejala tersebut menunjukkan *Chondrites* tidak selalu menjadi indikator kondisi miskin oksigen. Penafsiran ini didukung oleh Savrda dan Bottjer (1991) yang berpendapat bahwa kondisi miskin oksigen tidak selalu dapat menjadi faktor lingkungan utama pada lingkungan laut dangkal. Analogi dengan sistem pengendapan modern, *Chondrites* banyak dijumpai pada sistem laut dangkal yang dipengaruhi oleh proses pasang surut (Goldring, 1995; Hertweck dkk., 2005, 2007).

Rangkuman paleoekologi asosiasi-asosiasi iknofosil utama disajikan dalam Tabel 5.1 Dari rangkuman tersebut, setiap asosiasi iknofosil merefleksikan paleoekologi tertentu, misalnya struktur paleokomunitas, bagaimana fauna mendapatkan makanannya, kondisi substrat, kekayaan material organik dan tingkat kekeruhan air. Ulasan paleoekologi asosiasi iknofosil pada sub bab sebelumnya mengarahkan bahwa gejala-gejala yang ditunjukkan oleh asosiasi iknofosil adalah indikator dari paleobatimetri laut dangkal, lingkungan *brackish* dan terindikasi pengaruh proses pasang surut.

Tabel 5.1 Rangkuman paleoekologi asosiasi-asosiasi iknofosil

Asosiasi	***Behavior***	**Paleoekologi**
Ophiomorpha	*domichnia, fodonichnia*	1. struktur permanen. 2. *deposit* dan *suspension feeder*. 3. substrat *thixotrophic*. 4. proses erosi dan pengendapan silih berganti kondisi air jernih.
Skolithos	*domichnia*	1. struktur insidental. 2. *suspension feeder*. 3. kondisi air jernih.
Paleophycus	*domichnia*	1. struktur insidental. 2. *suspension feeder*. 3. substrat *thixotrophic* 4. kondisi air jernih.
Planolites	*fodonichnia, pascichnia*	1. struktur insidental. 2. *deposit feeder*. 3. substrat *dilatancy.* 4. kondisi air keruh. 5. kondisi kaya material organik karbon.
Thalassinoides	*domichnia, fodonichnia*	1. struktur permanen. 2. *deposit* dan *suspension feeder*. 3. substrat *dilatancy*.
Chondrites	*agrichnia*	1. struktur permanen. 2. *deposit feeder*. 3. substrat *dilatancy*.

BAB 6

Strategi Paleokomunitas

Asosiasi iknofosil yang dijelaskan sebelumnya adalah strategi yang lingkupnya lebih kecil dari strategi paleokomunitas (Bromley, 1996). Asosiasi iknofosil tersingkap dengan variasi struktur bioturbasi yang berbeda-beda direfleksikan dengan nilai variabel-variabel IB, KI, JB, KP dan Dm. Semua aspek iknofosil yang tersingkap dalam unit iknofabrik mencakup asosiasi iknofosil dan variabel-variabel IB, KI, JB, KP dan Dm merupakan strategi paleokomunitas untuk bertahan hidup (Arifullah dkk., 2019).

Merujuk pada (Miller, 2007), nilai rata-rata variabel iknofabrik IB, KI dan JB yang "rendah" menunjukkan paleokomunitas yang insidental. Demikian juga jika merujuk pada Bush dkk. (2007), gejala KP yang umumnya dangkal Dm yang kecil menunjukkan paleokomunitas *infauna* dangkal berukuran kecil. Dengan demikian, paleokomunitas di daerah penelitian cenderung memiliki jendela kolonisasi yang singkat. Jendela kolonisasi yang singkat adalah paleokomunitas yang tidak memiliki kesempatan yang cukup untuk membangun struktur iknofosil yang permanen (Pollard dkk., 1993; Taylor dkk., 2003).

Merujuk pada Ekdale (1985); White dan Pickett (1985), jendela kolonisasi yang singkat merupakan bentuk strategi paleokomunitas terhadap kondisi lingkungan yang mudah berubah, terjadi berulang-ulang, cepat dan/atau intensitas daya rusaknya kuat dan tidak dapat diprediksi yang pada akhirnya berpotensi merombak paleokomunitas yang sudah ada.

Kecenderungan nilai-nilai IB, KI, JB, KP dan Dm yang kecil dan dominasi varian monospesifik adalah indikator umum kondisi lingkungan *brackish* (Pemberton dan Wightman, 1992; Gingras dkk.,

1999; Gingras dan MacEachern, 2012). Paleoekologi lingkungan *brackish* adalah lingkungan yang kompleks pada sistem pengendapan yang di dalamnya terdapat interaksi proses fluvial dan asal laut seperti estuaria, delta bahkan pada lingkungan paparan lainnya (Dalrymple dan Choi, 2007). Paleotemperatur, paleosalinitas, energi hidrodinamika yang selalu berubah-ubah dan tidak dapat diprediksi (Raffaelli dan Hawkins, 1996; Brenchley dan Harper, 1998). Gejala tersebut mengakibatkan paleokomunitas tidak memiliki kesempatan untuk membangun struktur iknofosil yang permanen.

Strategi paleokomunitas terhadap jendela kolonisasi yang singkat adalah strategi oportunis *(r-selected).* Strategi oportunis adalah fauna yang memiliki tingkat reproduksi dan pertumbuhan yang cepat, angka kematian yang tinggi, siklus hidup yang pendek, toleran terhadap segala lingkungan dan *trophic generalist* (Pianka, 1970; Gray dan Elliott, 2009). *Trophic generalist* adalah spesies yang dapat bertindak sebagai *suspension feeder* maupun *deposit/detritus feeder.* Spesies seperti ini cepat mengkoloni suatu lingkungan yang kompleks (Wignall, 1990).

Unit iknofabrik yang merupakan produk dari spesies oportunis *(r-selected)* dicirikan dengan ukurannya kecil, penetrasi dangkal, berstruktur simpel (misalnya *Paleophycus, Planolites* dan *Skolithos*) dan bervarian monospesifik (Ekdale, 1985; Gray dan Elliott, 2009). Dalam penelitian ini, unit iknofabrik produk dari spesies oportunis *(r-selected)* dicirikan nilai-nilai IB, KI, JB, KP dan Dm yang kecil dan dominasi varian monospesifik. Terkait dengan strategi oportunis *(rselected),* paleokomunitas pada zona A, B dan E cenderung menerapkan strategi ini.

Sejumlah strategi paleokomunitas dengan jendela kolonisasi yang lebih lama telah diidentifikasi. Strategi tersebut bukanlah strategi dominan. Strategi pertama adalah *infauna* dalam dan berukuran besar. Strategi kedua adalah paleokomunitas yang cenderung lebih permanen. Jendela kolonisasi yang lebih lama merupakan strategi paleokomunitas terhadap kondisi lingkungan yang lebih dapat ditolerir. Kondisi lingkungan tersebut cenderung lebih konstan dan intensitas daya rusaknya tidak terlalu kuat dan dapat diprediksi (Ekdale, 1985; Bromley, 1996). Spesies yang menerapkan strategi tersebut adalah spesies ekuilibrium *(K-selected)* yaitu fauna yang mempunyai tingkat reproduksi dan pertumbuhan yang lambat, angka kematian rendah, siklus hidup lebih panjang, hanya toleran terhadap

lingkungan yang khusus (Pianka, 1970; Gray dan Elliott, 2009).

Unit iknofabrik yang merupakan produk dari spesies ekuilibrium *(K-selected)* dicirikan dengan ukurannya besar, penetrasi dalam, bersturuktur lebih kompleks (misalnya *Ophiomorpha, Thalassinoides* dan *Chondrites*) dan lebih bersifat polispesifik. Unit iknofabrik produk dari strategi ekuilibrium *(K-selected)* dicirikan dengan nilai-nilai IB, KI, JB, KP dan Dm yang lebih besar dan dominasi varian polispesifik. Terkait dengan strategi ekuilibrium *(K-selected)*, paleokomunitas zona C dan D cenderung menerapkan strategi ini.

Sebagaimana yang telah dijelaskan bahwa KU-1 adalah fungsi dari IB, KI dan JB, sedangkan KU-2 adalah fungsi dari KP dan Dm. Makna KU-1 dan KU-2 sebagai strategi paleokomunitas akan dijelaskan sebagai berikut.

1. Iknodisparitas (ID)

Merujuk pada Buatois dan Mángano (2013), KU-1 adalah komponen iknodisparitas (ID). Iknodisparitas menggambarkan variasi desain arsitektur iknofosil di dalam unit iknofabrik yang menggam-barkan inovasi, mobilitas dan/ atau *behavior* fauna (Buatois dan Mángano, 2013).

Mengingat sumber makanan adalah faktor standar yang dipertimbangkan dalam analisis ekologi (Bambach, 1983), maka iknodisparitas merefleksikan faktor suplai makanan. Makanan disuplai ke dalam ekosistem (Bambach, 1983) oleh mekanisme tertentu dalam hal ini suplai dari darat dan suplai dari batimetri laut yang lebih dalam (Van Der Zwaan dan Jorissen, 1991; Brenchley dan Harper, 1998). Untuk di zona transisi, suplai makan paling dapat berasal dari darat (Van Der Zwaan dan Jorissen, 1991; Brenchley dan Harper, 1998) maupun laut (Brenchley dan Harper, 1998). Makanan disuplai dalam bentuk *seston* ataupun terikat dengan butiran sedimen (Brenchley dan Harper, 1998). Secara implisit arah sedimentasi berperanan penting dalam mensuplai makanan.

Penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Dapples (1942), Moore dan Scruton (1957), Van Straaten (1959), Allen (1965) pada sistem pengendapan delta menunjukkan bahwa nilai IB semakin besar ke arah laut. Gejala ini menunjukkan bahwa koloni fauna semakin intensif ke arah distal pada sistem delta. Akumulasi makan-an terbesar berada pada zona pertemuan sungai dan laut, karena pada zona ini suplai makanan berasal dari dua sumber yaitu dari darat dan

laut.

Jika suplai sedimen pada sistem pengendapan di Cekungan Kutai adalah relatif barat-timur tidak berubah sejak Miosen Awal (Allen dan Chambers, 1998; Bachtiar, 2004), maka semakin ke timur skor ID semakin besar. Agar makanan dapat disuplai jauh ke arah timur maka harus ada sungai yang mempunyai kapasitas dan kompetensi yang dapat mensuplai sedimen dan harus ada mekanisme proses di laut yang memungkinkan sedimen tersebut tersebar.

Berdasarkan analisis fasies, zona A lebih didominasi oleh proses gelombang, zona B lebih didominasi oleh proses fluvial dan zona C didominasi oleh proses gelombang dan pasang surut. Proses-proses tersebut bertanggungjawab mengapa rata-rata skor ID paling besar dibandingkan dengan zona A dan B. Demikian juga mengapa rata-rata skor ID pada zona B lebih besar daripada zona A. Jika merujuk pada Allen dan Chambers (1998) yang menegaskan bahwa faktor-faktor penentu besarnya suplai sedimen adalah influks fluvial yang kuat dan tingginya simpangan antara pasang tinggi dan rendah, maka perbedaan besaran rata-rata skor ID zona A, B, C, D dan E adalah lebih dikontrol oleh besaran rentang pasang tertinggi dan terendah.

2. Pemanfaatan Ruang (PR)

Merujuk pada Levinton (1977) dan Reise (1979), KU-2 adalah komponen pemanfaatan ruang (PR) yang menggambarkan semakin besar ukuran fauna maka kedalaman penetrasinya semakin besar. Komponen pemanfaatan ruang merefleksikan faktor fluktuasi paleosalinitas dan paleotemperatur pada sistem pengendapan yang di dalamnya terdapat interaksi antara proses fluvial dan asal laut seperti di Cekungan Kutai. Salinitas dan temperatur yang ber-fluktuasi adalah kondisi umum pada lingkungan *brackish* (Dalrymple dan Choi, 2007; Buatois dan Mángano, 2011). Karena intensitas proses fluvial, pasang surut dan gelombang tidak selalu sama dalam ruang dan waktu, maka fluktuasi paleosalinitas dan paleotempe-raturpun juga akan berubah-ubah.

Zona *intertidal* menunjukkan salinitas dan temperatur yang paling berfluktuasi (Raffaelli dan Hawkins, 1996; Gray dan Elliott, 2009). Untuk bertahan hidup, komunitas *infauna* melakukan strategi optimal untuk mengatasi kondisi lingkungan salinitas dan temperatur yang berfluktuasi di SWI. Strategi tersebut adalah dengan cara melakukan penetrasi dengan kedalaman tertentu di dalam substrat

(Johnson, 1965; Sanders dkk., 1965; Gray dan Elliott, 2009). Pada kedalaman penetrasi tersebut salinitas dan temperaturnya relatif tidak berfluktuasi secara signifikan (Rhoads, 1975).

Levinton (1977) telah menunjukkan pula bahwa pada zona intertidal, *infauna* berukuran lebih besar cenderung melakukan penetrasi lebih dalam. Gejala ini sesuai temuan dalam penelitian dengan mengkorelasikan positif antara variabel KP dan Dm. Gejala tersebut juga menunjukkan hanya *infauna* berukuran besar sajalah yang ber-potensi melakukan penetrasi lebih dalam untuk bertahan hidup (Arifullah dkk., 2017, 2018).

Faktor penentu besarnya fluktuasi paleosalinitas dan paleotemperatur adalah besaran rentang pasang tinggi dan rendah (Johnson, 1965; Sanders dkk., 1965), maka tidak signifikannya perbedaan besaran rata-rata skor PR pada zona A, B dan C menunjukkan komponen PR tidak mempengaruhi secara signifikan sistem pengendapan pada interval Serravallian. Perbedaan yang cukup besar rata-rata skor PR pada zona D dan E menunjukkan komponen PR mempengaruhi secara signifikan sistem pengendapan pada interval Tortonian.

Paleogeografi

Sistem pengendapan di daerah penelitian menunjukkan batas-batas paleoekologi. Batas-batas tersebut membagi sistem pengendapan menjadi zona-zona paleoekologi yang khas, dicirikan dengan aspek proses fisika, kimia dan biologi tertentu (Miller, 2001b). Definisi batas paleoekologi tersebut sama dengan definisi lingkungan pengendapan dalam pengertian geomorfik sebagaimana yang diformulasikan oleh Boggs (1987). Dengan demikian, batas-batas paleoekologi tersebut merefleksikan batas elemen-elemen pengendapan.

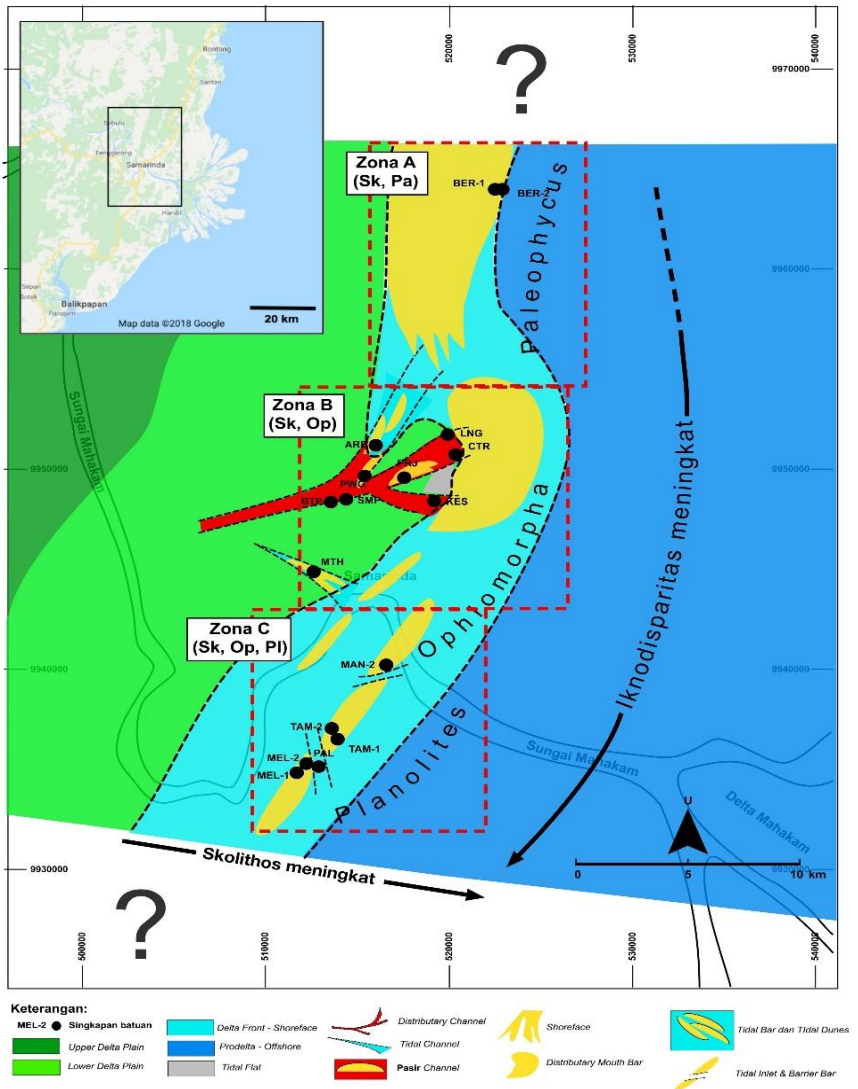
Pada interval Serravallian, batas zona-zona paleoekologi yang tidak terlalu kentara (lihat Gambar 4.13). Penafsiran adalah paleoekologi zona-zona tersebut tidak jauh berbeda walaupun mungkin elemen paleogeomorfiknya berbeda. Gejala tersebut diduga terkait dengan sistem delta yang di dalamnya terdapat elemenelemen pengendapan yang paleoekologinya tidak jauh berbeda satu sama lain. Batas zona-zona paleoekologi pada interval Tortonian (Gambar 4.14) relatif menunjukkan batas yang lebih tegas bila dibandingkan yang ditunjukkan batas paleoekologi interval Serravalian. Gejala batas-

batas paleoekologi yang ditunjukkan oleh interval Tortonian mengindikasikan paleoekologi kedua zona relatif lebih berbeda satu sama lain.

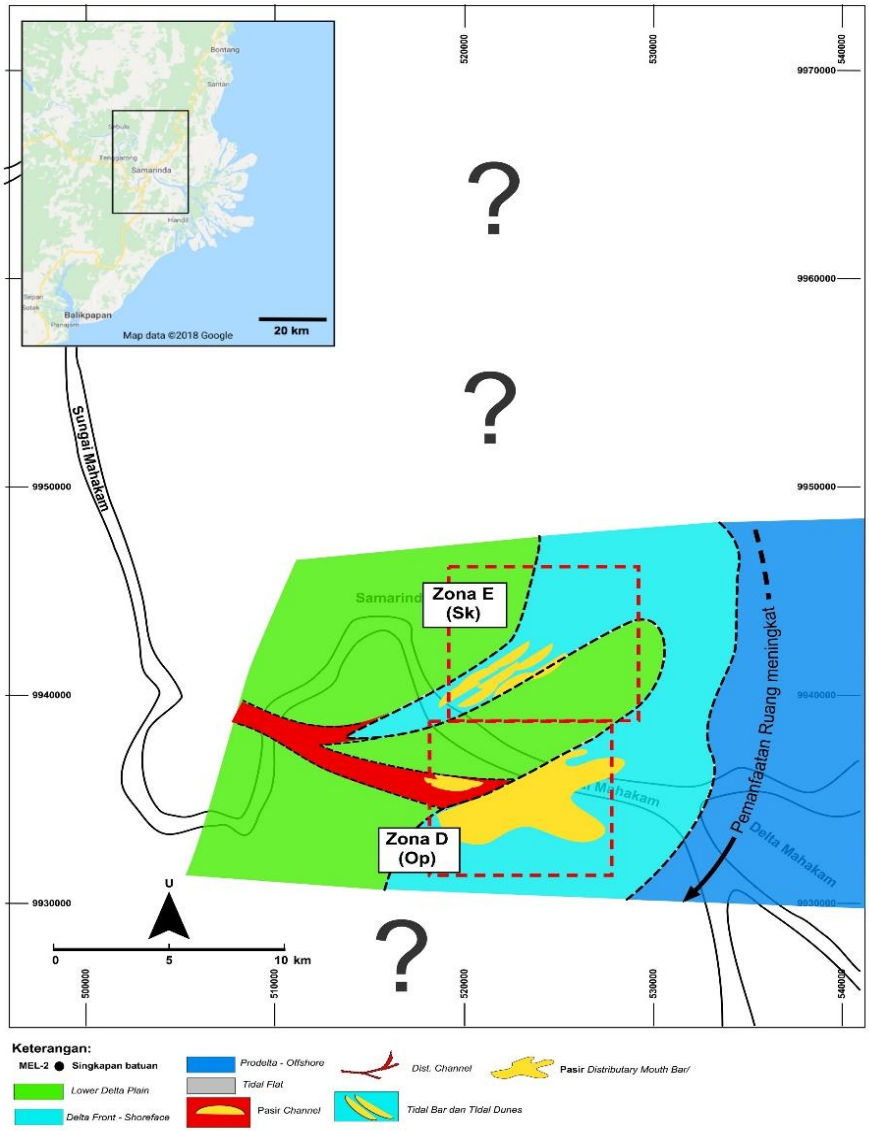
Paleogeografi interval Serravallian sebagaimana yang disajikan dalam Gambar 6.1 menunjukkan zona A yang lebih didominasi oleh proses gelombang ditafsirkan sebagai sistem pantai *dominasi gelombang*. Zona B yang merupakan dominasi proses fluvial dan intensitas proses pasang surut yang semakin meningkat ditafsirkan sebagai sistem delta dengan jaringan *distributary* seperti kaki burung dan *distributary mouth bar*. Singkapan-singkapan yang mengindikasikan proses fluvial di zona ini telah dipelajari oleh Allen dan Chambers (1998); Bachtiar (2004) dan Arifullah (2005). Semakin besarnya proses pasang surut dan berkembangnya proses gelombang yang cukup signifikan pada zona C direkonstruksi sebagai sistem pantai kombinasi gelombang-pasang surut.

Paleogeografi interval Tortonian disajikan dalam Gambar 6.2. Paleogeografi yang dihasilkan hanya terkonsentrasi di bagian selatan peta. Secara umum arah pengendapan tidak ada perubahan sejak Serravallian. Paleogeografi interval Tortonian terkesan menunjukkan kemenerusan dari sistem pengendapan zona selatan interval Serravallian.

Jaringan *distributary* seperti kaki burung masih terlihat yang merupakan karakter delta dominasi fluvial. Namun demikian perbedaan morfologi zona E dan D menunjukkan perbedaan proses sedimentasi yang berlangsung. Proses sedimentasi di zona E menunjukkan dominasi proses pasang surut. Gejala ini menunjukkan perbedaan intensitas pasang surut antara zona E dan D. Merujuk pada Arifullah (2005) dan Allen dan Chambers (1998), gejala di zona E ini dapat dianalogikan dengan zona utara delta Mahakam Modern yang sudah tidak aktif lagi yang membentuk morfologi estuaria.



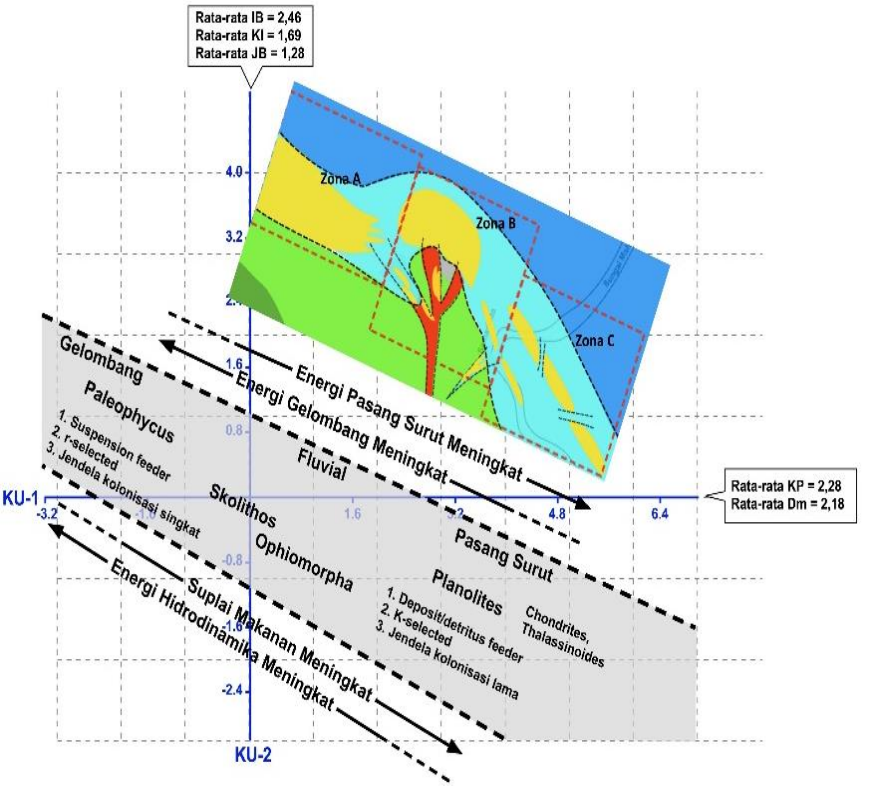
Gambar 6.1 Peta Paleogeografi interval Serravallian. Terdapat tiga sistem pengendapan yaitu sistem pantai dominasi gelombang (zona A) dengan *Paleophycus* sebagai iknofosil pencirinya, sistem delta dominasi fluvial (zona B) dan sistem pantai camupuran gelombang-pasang surut (zona C) dengan *Planolites* sebagai iknofosil pencirinya. Iknodisparitas meningkat ke arah selatan.



Gambar 6.2 Peta Paleogeografi interval Tortonian. Terdapat tiga sistem pengendapan yaitu sistem delta dominasi fluvial dan gelombang (zona D) dengan *Ophiomorpha* sebagai iknofosil pencirinya dan sistem estuaria (zona E) dengan *Skolithos* sebagai iknofosil pencirinya. Pemanfaatan ruang meningkat ke arah selatan.

Model Paleoekologi

Area berwarna abu-abu pada Gambar 6.3 spektrum Planolites dan Paleophycus. Spektrum tersebut merupakan strategi optimum yang diterapkan oleh palekomunitas fauna yang direpresentasikan oleh orientasi area yang berwarna abu-abu. Orientasinya relatif sejajar dengan sumbu komponen ID yang menunjukkan distribusi data unit iknofabrik dikontrol oleh komponen ID. Gejala ini menunjukkan komponen yang paling menentukan pada sistem pengendapan interval Serravallian adalah komponen ID yang merupakan indikator faktor suplai makanan dan energi hidrodinamika sebagai akibat dari pengaruh influks fluvial. Komponen PR atau faktor fluktuasi paleosalinitas dan paleotemperatur tidak berpengaruh dalam sistem pengendapan dengan kata lain fluktuasi paleosalinitas dan paleotemperatur di semua tempat pada sistem pengendapan tidak jauh berbeda.



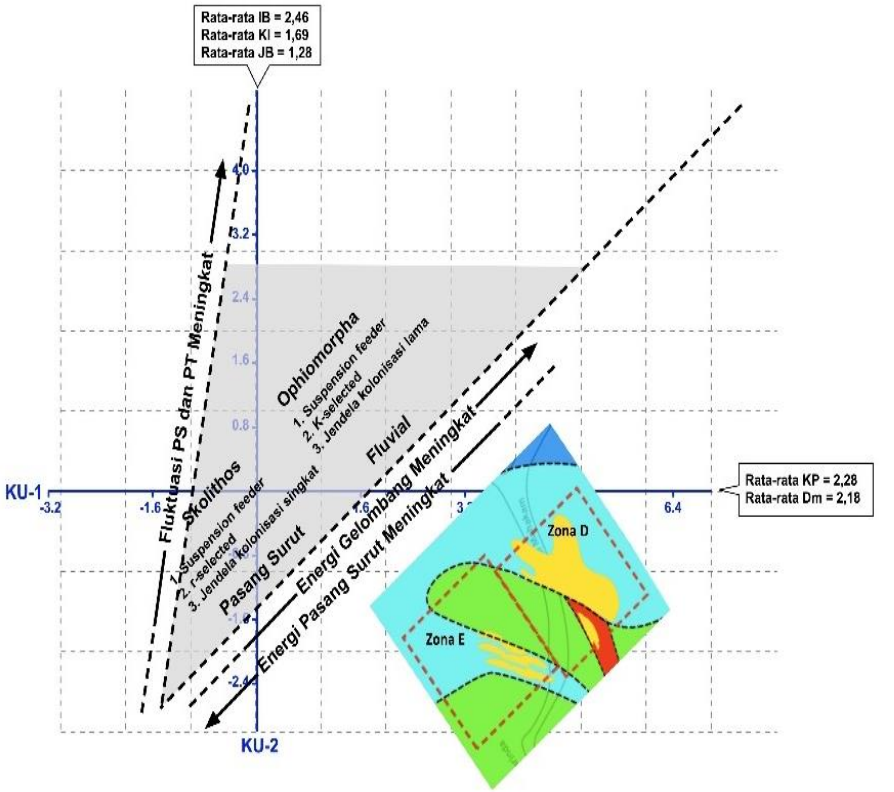
Gambar 6.3 Model Paleoekologi interval Serravallian yang didominasi oleh

faktor influks fluvial. Area berwarna abu-abu adalah area sebagian besar data skor komponen ID dan PR unit iknofabrik (68 % data) interval Serravallian berada. Orientasi area berwarna abu-abu menunjukkan distribusi data unit iknofabrik dikontrol oleh komponen ID. Semakin ke arah titik *Planolites* (zona C), jumlah *Planolites* meningkat, skor ID semakin meningkat dan asosiasi iknofosil semakin bersifat monospesifik, IB dan JB semakin meningkat. Menuju titik *Paleophycus* (zona A), jumlah *Paleophycus* meningkat, skor ID semakin berkurang, konsekuensinya asosiasi ikonofosil semakin bersifat polispesifik, IB dan JB semakin menurun. *Skolithos* dan *Ophiomorpha* berkembang dominan di semua area spektrum, namun bukanlah menjadi penciri yang unik.

Kehadiran asosiasi *Paleophycus* menurun pada zona *Planolites*. Demikian juga sebaliknya, kehadiran asosiasi *Planolites* menurun pada zona *Paleophycus*. Asosiasi *Ophiomorpha* dan *Skolithos* selalu hadir pada spektrum *Planolites* dan *Paleophycus*. Asosiasi *Planolites* diasosiasikan dengan interaksi proses gelombang dan pasang surut sedangkan asosiasi *Paleophycus* diasosiasikan dengan proses gelombang yang lebih dominan.

Asosiasi *Planolites* sebagai *deposit/detritus feeder* adalah strategi paleokomunitas yang cenderung bersifat *K-selected* yang mengindikasikan jendela kolonisasi yang lama. Pada zona ini, semua asosiasi iknofosil yang berkembang lebih kompleks dan bersifat polispesifik. Dengan demikian wajarlah jika di zona *Planolites* dijumpai asosiasi *Chondrites* dan *Thalassinoides* lebih banyak daripada zona lainnya.

Zona asosiasi *Paleophycus* berasosiasi dengan *suspension feeder*, strategi paleokomunitas cenderung *r-selected* dan jendela kolonisasi yang lebih singkat. Pada zona ini, semua asosiasi iknofosil yang berkembang lebih sederhana dan bersifat monospesifik. Semakin ke zona ini kehadiran *Chondrites* dan *Thalassinoides* sangat sedikit.



Gambar 6.4 Model Paleoekologi interval Tortonian yang dipengaruhi oleh fluktuasi paleosalinitas dan paleotemperatur. Area berwarna abuabu adalah area sebagian besar data skor komponen ID dan PR unit iknofabrik (68 % data) interval Tortonian berada. Orientasi area berwarna abu-abu menunjukkan distribusi data unit iknofabrik dikontrol oleh komponen PR. Zona D dicirikan dengan *Ophiomorpha*, sedangkan zona E dicirikan dengan *Skolithos*.

Pada interval Tortonian, area berwarna abu-abu pada Gambar 6.4 menunjukkan spektrum *Ophiomorpha* dan *Skolithos* sebagai strategi optimum yang diterapkan oleh palekomunitas fauna. Strategi tersebut ditunjukkan dengan orientasi area berwarna abu-abu yang cenderung pada sumbu komponen PR. Dengan demikian, komponen yang paling menentukan adalah komponen PR yang merupakan fungsi fluktuasi paleosalinitas dan paleotemperatur. Komponen ID atau

faktor suplai makanan dan energi hidrodinamika relatif tidak menentukan dalam sistem pengendapan dengan kata lain suplai makanan dan energi hidrodinamika di semua tempat pada sistem pengendapan tidak jauh berbeda.

Spektrum asosiasi *Ophimorpha* dan *Skolithos* menunjukkan jumlah asosiasi *Skolithos* menurun pada zona *Ophiomorpha*. Demikian juga sebaliknya, jumlah asosiasi *Ophiomorpha* menurun pada zona *Skolithos*. Tidak terlihat ada asosiasi peralihan di antara kedua ujung spektrum *Skolithos* dan *Ophiomorpha*. Dominasi kehadiran asosiasi *Ophiomorpha* dan *Skolitos* ini berasosiasi dengan dominasi proses fluvial sebagaimana gejala yang sama telah hadir pada interval Serravallian (Gambar 6.3).

Asosiasi *Ophiomorpha* berasosiasi dengan *suspension feeder*, strategi paleokomunitas cenderung *K-selected* dan jendela kolonisasi yang lebih lama. Batas ujung lainnya adalah asosiasi *Skolithos* yang berasosiasi dengan *suspension feeder*, strategi paleokomunitas cenderung *r-selected* dan jendela kolonisasi yang singkat. Semua asosiasi iknofosil yang berkembang pada spektrum ini lebih sederhana dan bersifat polispesifik. Dengan demikian asosiasi iknofosil yang kompleks pada interval Tortonian sangat sedikit sekali dijumpai.

Sumbu ID dan PR pada Gambar 6.4 adalah nilai rata-rata IB, KI, JB, KP dan Dm yang ditempati oleh *Skolithos* dan *Ophiomorpha*. Gejala ini menegaskan bahwa strategi yang paling optimum yang diterapkan oleh paleokomunitas direpresentasikan dengan nilai rata-rata IB, KI, JB, KP dan Dm diwakili oleh *Skolithos* dan *Ophiomorpha.*

Merujuk pada Bromley (1996), orientasi spektrum Planolites-Paleophycus pada interval Serravallian dan spektrum Ophiomorpha-Skolithos interval Tortonian (Gambar 6.3 dan Gambar 6.4) menunjukkan tidak ada paleokomunitas yang benar-benar r-selected atau K-selected. Konsekuensinya semua asosiasi ikonofosil Tabel 6.2 Elemen-elemen pengendapan yang diidentifikasi di setiap singkapan batuan dapat hadir bersama pada sistem pengendapan yang berbeda khususnya pada sistem pengendapan yang di dalamnya terdapat interaksi proses fluvial, pasang surut dan gelombang.

Tabel 6.1 Elemen-elemen pengendapan yang diidentifikasi di setiap singkapan batuan

Umur	Zona	Nama singkapan	Elemen-elemen Pengendapan
Serravallian	A	BER---1	*Mudflat, Sandflat, Beach, Marsh, Upper-Lower*
		BER---2	*Beach, Upper-Lower Shoreface, Offshore*
	B	BTP	*Delta Plain, Distributary Channel*
		SMP	*Crevasse Splay*
		ARD	*Estuaria, Tidal Bar---Channel Base*
		LNG	*Distributary Channel, Mouth Bar, Prodelta*
		CTR	*Delta Plain, Distributary Channel, Mouth Bar, Prodelta*
		MTH**	
		PRJ***	*Tidal Bar, Tidal Dunes*
		KES**	*Distributary Channel*
		PWG**	*Marsh,Delta Plain, Distributary Channel, Mouth Bar, Prodelta Marsh, Distributary Channel, Tidal Flat, Tidal Bar*
	C	PAL	*Laguna, Tidal Dunes, Tidal Inlet*
		TAM---1	*Delta Plain, Distributary Mouth Bar*
		TAM---2	*Delta Plain, Mouth Bar, Prodelta*
		MAN	*Laguna, Tidal Inlet, Upper-Lower Shoreface, Offshore*
		MEL---2**	
		MEL---1**	*Laguna, Upper-Lower Shoreface, Offshore Marsh, Delta Plain, Tidal Flat, Tidal Dunes, Offshore*
Tortonian	D	CMT	*Delta Plain, Distributary Channel, Mouth Bar*
		SSG	*Mouth Bar*
	E	ANG---1	Estuaria, *Tidal Bar, Tidal Dunes*
		ANG---2	Estuaria, *Tidal Bar-Channel Base, Tidal Dunes*
		ANG---3	Estuaria, *Tidal Bar-Channel Base, Tidal Dunes*

Keterangan:
*) Penampang stratigrafi seluruh singkapan (kecuali yang bertanda bintang)
**) Arifullah (2005)
***) Bachtiar (2004)

BAB 7

Model Sekuen Vertikal Elemen Pengendapan

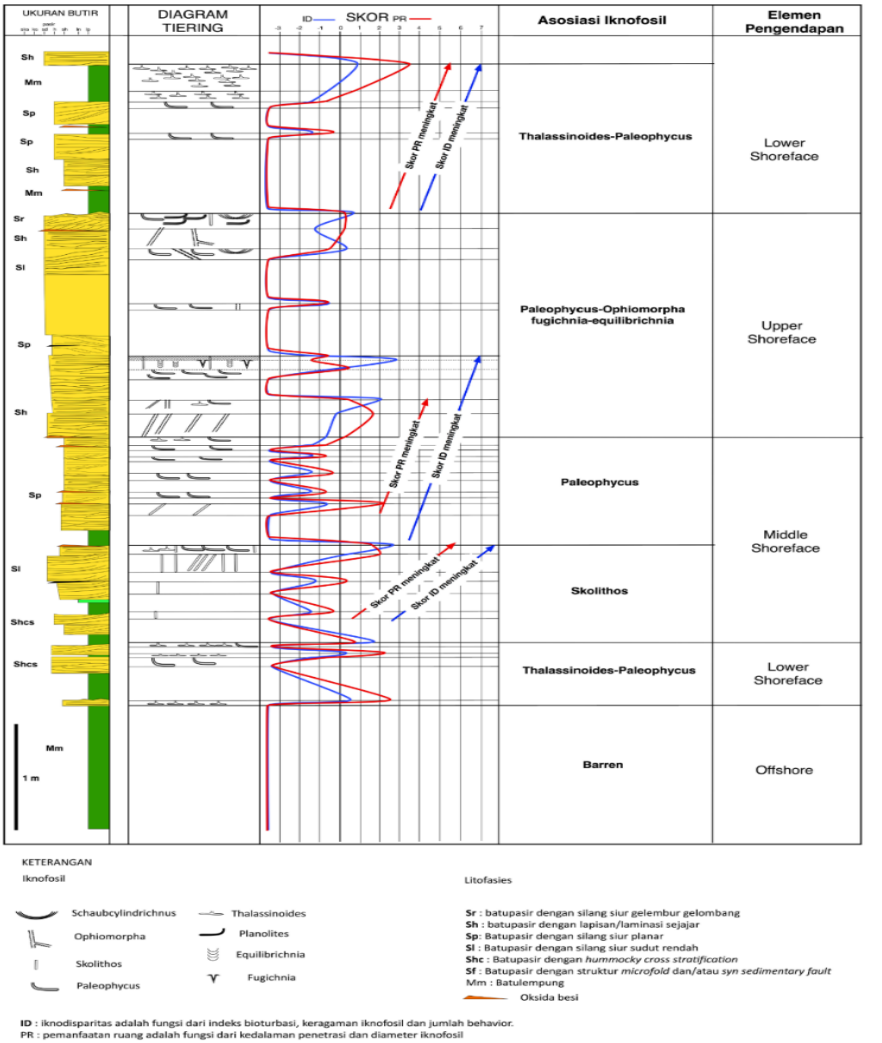
Setelah paleogeografi direkonstruksi, model sekuen vertikal elemen-elemen pengendapan di dalamnya dapat dibuat. Tabel 6.1 adalah elemen-elemen pengendapan yang telah diidentifikasi di setiap singkapan yang mencakup sistem pantai dominasi gelombang, delta dominasi fluvial, pantai kombinasi gelombangpasang surut, *distributary channel*, estuaria dan *tidal inlet*.

Model-model yang disajikan dilengkapi dengan diagram *tiering*, kurva skor ID dan PR serta asosiasi iknofosilnya. Diagram *tiering* yang tersaji dalam model berfungsi menunjukkan hubungan antara satu *tier* dengan *tier* di atas dan dibawahnya apakah saling potong atau tidak. Diagram *tier* juga dapat melihat perbandingan IB, KI dan KP. Skor ID dan PR setiap unit iknofabrik dalam urutan stratigrafi dapat digambarkan kurva-kurvanya, apakah berpola *out of phase* atau *in phase* (Arifullah dkk., 2017, 2018). Pola *out of phase* adalah pola kurva ID dan PR bergerak relatif berlawanan, dengan kata lain ketika kurva ID cenderung meningkat sementara kurva PR cenderung menurun. Pola *in phase* adalah pola kurva ID dan PR bergerak relatif selaras (Arifullah dkk., 2018).

Pantai Dominasi Gelombang

Model sistem pengendapan *shoreface* yang disajikan dalam Gambar 7.1 menunjukkan kurva-kurva ID dan PR relatif berada di sebelah kiri nilai 0. Dengan kata lain, rata-rata skor ID dan PR di bawah rata-rata. Kurva-kurvanya menunjukkan pola *in phase*. Gejala tersebut

mengindikasikan jendela kolonisasi yang relatif singkat. Namun demikian bentuk kurva yang fluktuatif mengindikasikan lamanya jendela kolonisasi yang selalu dengan berjalannya waktu. Kurva-kurva ID dan PR berfluktuatif sebagai konsekuensi dari suplai sedimen yang berubah-ubah dan fluktuasi paleosalinitas dan peleo-temperatur yang berubah-ubah pula.



Gambar 7.1 Model pantai dominasi gelombang yang berasal dari singkapan BER-2 (interval 2190-2930) Serravallian.

Dominasi asosiasi *Paleophycus* dan *Skolithos* sebagai struktur simpel baik pada *lower-, middle-* dan *upper shoreface* mengindikasikan jendela kolonisasi yang singkat akibat dari substrat yang relatif labil. Gejala ini didukung dengan perkembangan struktur *fugichnia* dan *equilibrichnia.*

Kelabilan substrat ini merupakan akibat kegiatan gelombang yang relatif aktif. Konsekuensinya hanya *seston* yang tersedia sehingga hanya *suspension feeder* yang paling mungkin bertahan hidup. Dampaknya adalah iknofosil *deposit feeder* tidak dapat berkembang dan konsekuensinya menurunkan ID secara umum.

Kehadiran Ophiomorpha bersama-sama dengan Paleophycus dan struktur fugichnia dan equilibrichnia di upper shoreface adalah indikator paleokomunitas jendela kolonisasi yang lebih lama walaupun pada lingkungan yang energi gelombangnya kuat. Secara umum asosiasi iknofosil yang berkembang adalah asosiasi Thalassinoides-Paleophycus, Paleophycus-Ophiomorpha, Paleophycus, Skolithos dan Thalassinoides-Paleophycus.

Jika dibandingkan antara model shoreface yang diusulkan dan model shoreface sedimen berumur Kapur di Amerika Utara dari Pemberton dkk. (2001), maka terdapat kesamaan dalam hal etologi. Semakin ke arah upper shoreface maka suspension feeder meningkat dan semakin ke arah lower shoreface demikian juga deposit feeder meningkat. Perbedaan terletak pada asosiasi iknofosilnya.

Model Pemberton dkk. (2001) menunjukkan asosiasi iknofosil yang berkembang lebih kompleks daripada model *shoreface* yang diusulkan ini. Perbedaan tersebut merupakan akibat kondisi paleoekologi yang berbeda meliputi suplai makanan yang terkait langsung dengan suplai sedimen serta faktor fluktuasi paleosalinitas dan paleotemperatur. Model *shoreface* yang diusulkan ini adalah *shoreface* yang masih mendapat pengaruh dari aktifitas perkem-bangan delta di sekitarnya atau merupakan bagian dari sistem delta Mahakam Miosen.

Delta Dominasi Fluvial

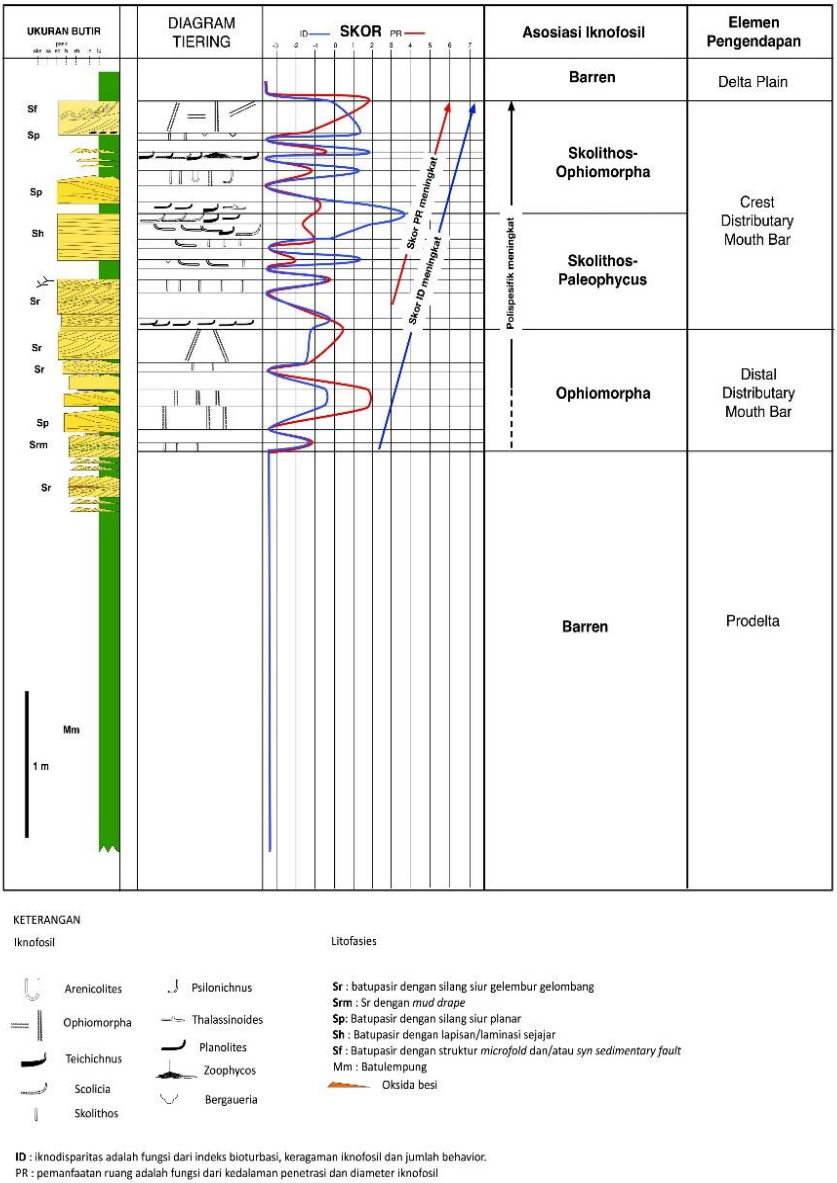
Model sistem pengendapan delta dominasi fluvial disajikan dalam Gambar 7.2 dan Gambar 7.3. Model yang disajikan oleh Gambar 7.4 adalah delta dominasi fluvial interval Serravallian yang lebih dipengaruhi oleh faktor suplai makanan dan energi hidro-dinamika, sedangkan model yang disajikan oleh Gambar 7.5 adalah delta interval Tortonian yang lebih dipengaruhi oleh faktor fluktuasi paleosalinitas

dan paleotemperatur.

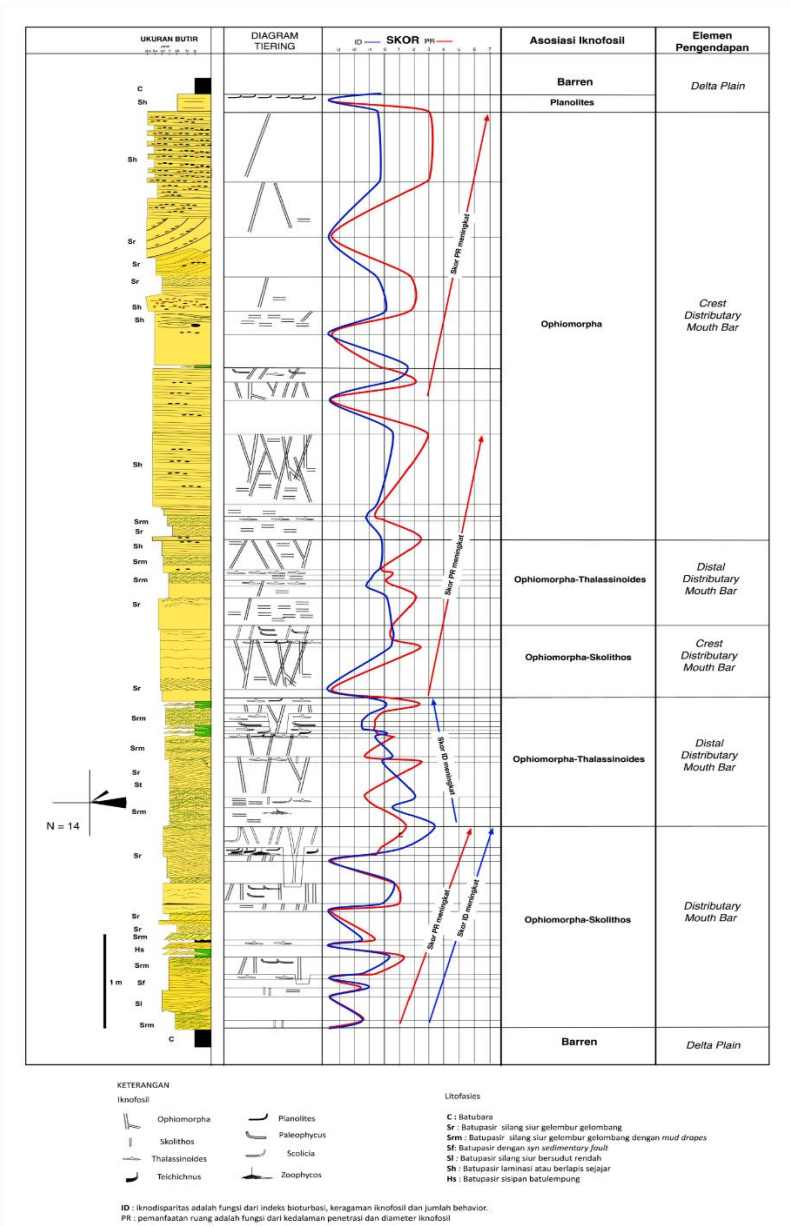
Delta dominasi fluvial pada interval Serravallian (Gambar 7.2) menunjukkan kurva PR relatif berada di sebelah kiri nilai 0 yang berarti rata-rata skor PR relatif rendah. Sedangkan kurva ID relatif berada di sebelah kanan nilai 0 yang berarti skor ID relatif lebih tinggi dibandingkan dengan rata-rata skor PR. Kurva-kurvanya menunjukkan pola in phase. Gejala-gejala tersebut mengindikasikan faktor suplai makanan dan energi hidrodinamika memegang peranan penting.

Kolom stratigrafi model yang ditunjukkan dalam Gambar 7.2 menunjukkan skor ID relatif meningkat ke atas yang mengindikasikan suplai makanan yang meningkat pada area *crest distributary mouth bar* atau bagian puncak dari *mouth bar.* Gejala peningkatan skor ID tersebut telah dibuktikan oleh Arifullah (2005) di *mouth bar* Muara Bujit delta Mahakam modern.

Secara umum kurva ID menunjukkan tingkat fluktuasi yang lebih tinggi dibandingkan dengan kurva PR. Kurva-kurva ID yang berfluktuatif sebagai konsekuensi dari suplai sedimen yang selalu berubah-ubah selama proses pengendapan delta. Kurva ID yang relatif lebih berfluktuasi di zona *crest distributary mouth* bar bila dibandingkan dengan zona distal *distributary mouth bar* merupakan konsekuensinya dekat dengan mulut sungai.



Gambar 7.2 Model delta dominasi fluvial yang berasal dari singkapan CTR (interval 1040-1560) interval Serravallian.



Gambar 7.3 Model delta dominasi fluvial yang berasal dari singkapan SSG interval Tortonian.

Asosiasi iknofosil yang berkembang relatif tidak variatif. Asosiasi iknofosil yang berkembang adalah *Skolithos-Ophiomorha, Skolithos-Palephycus* dan *Ophiomorpha*. Dari aspek asosiasi iknofosil, perbedaan asosiasi iknofosil yang berkembang pada delta dominasi fluvial relatif tidak mencolok bila dibandingkan dengan sistem *shoreface*. Pembeda kedua sistem tersebut adalah komponen ID nya, sehingga asosiasi iknofosil delta dominasi fluvial lebih bersifat polispesifik bila dibandingkan dengan sistem *shoreface*.

Gejala yang menarik lainnya adalah, iknofosil tidak terlihat pada sedimen delta plain dan prodelta. Struktur masif yang selalu ditunjukkan oleh sedimen prodelta kemungkinan akibat proses pengacakan oleh infauna pada substrat yang labil sehingga iknofosil tidak dapat terpreservasi (Bromley, 1996). Iknofosil yang tidak terlihat pada sedimen *delta plain*, kemungkinan terkait dengan kondisi lingkungan yang tidak mendukung hidup fauna akibat fluktuasi temperatur yang ekstrim (Raffaelli dan Hawkins, 1996).

Delta dominasi fluvial interval Tortonian (Gambar 7.3) menunjukkan delta yang didominasi oleh batupasir berukuran sedang hingga bersifat kerikilan. Kurvakurva yang tersajikan menunjukkan pola *in phase*. Secara umum kurva PR lebih berfluktuasi bila di-bandingkan dengan kurva ID. Dengan demikian faktor fluktuasi paleosalinitas dan paleotemperatur lebih berpengaruh bila diban-dingkan faktor suplai makanan dan energi hidrodinamika.

Kolom stratigrafi model yang ditunjukkan dalam Gambar 7.3 menunjukkan skor PR relatif meningkat ke atas yang mengindikasikan fluktuasi paleosalinitas dan paleotemperatur yang meningkat pada area *crest distributary mouth bar* atau bagian puncak dari *mouth bar.*

Kurva-kurva PR yang berfluktuatif sebagai konsekuensi dari fluktuasi paleosalinitas dan paleotemperatur yang selalu berubah-ubah selama proses pengendapan delta. Namun demikian bukan berarti suplai makanan juga tidak berfluktuasi. Hal ini disebabkan kurva ID juga menunjukkan pola fluktuatif juga.

Asosiasi iknofosil yang berkembang adalah asosiasi *Ophiomorpha, Ophiomorpha-Thalassinoides* dan *Ophiomorpha-Skolithos*. Terlihat bahwa *Ophiomorpha* mendominasi semua unit iknofabrik. Gejala ini sangat kontras dengan delta dominasi fluvial pada interval Serravallian. Dominasi *Ophiomorpha* yang umumnya monospesifik adalah adalah indikator penting delta dominasi fluvial yang lebih

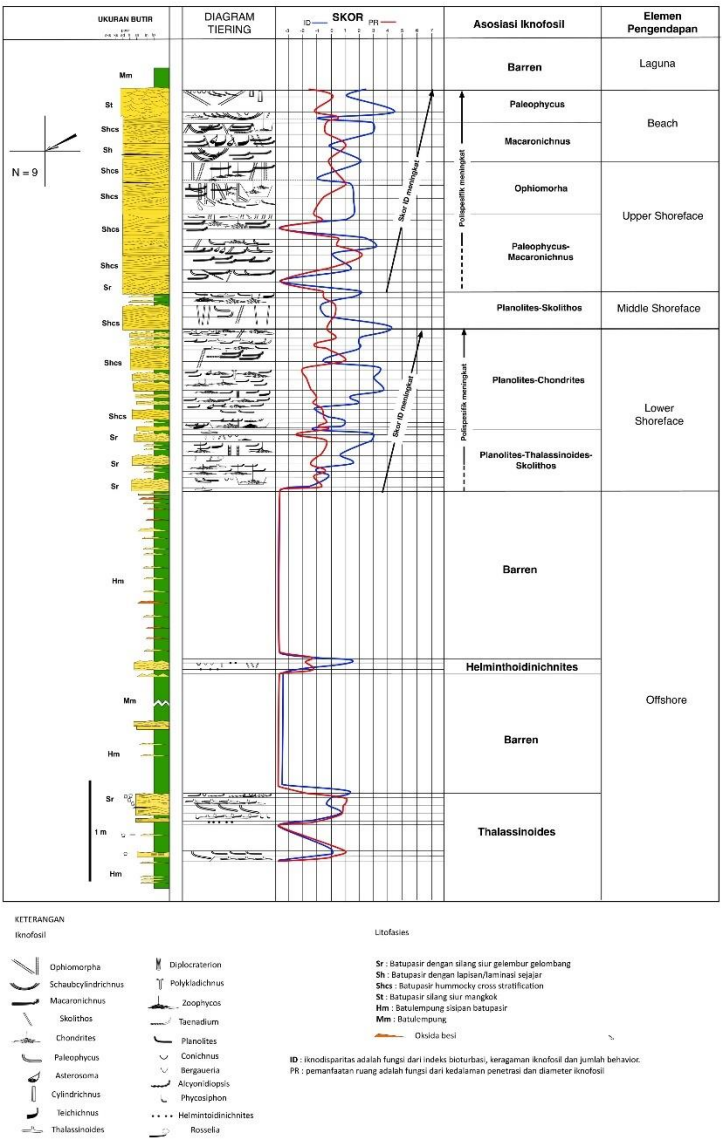
dipengaruhi oleh faktor fluktuasi paleosalinitas dan paleo-temperatur.

Pantai Campuran Gelombang-Pasang Surut

Model sistem pantai kombinasi gelombang-pasang surut disajikan dalam Gambar 7.4. Sistem ini dipengaruhi oleh paleoekologi yang lebih dipengaruhi oleh suplai makanan dan energi hidrodinamika. Model sistem pantai kombinasi gelombangpasang surut menunjukkan kurva ID dan PR relatif berada baik di sebelah kiri ataupun di sebelah kanan nilai 0. Pola yang dibentuk oleh kedua kurva tersebut adalah pola *out of phase* (Arifullah dkk., 2018). Secara umum rata-rata skor ID berada jauh lebih besar dibandingkan dengan rata-rata skor PR.

Dua siklus skor ID yang meningkat ke atas dapat dikenali dalam sekuen vertikal model sistem pantai kombinasi gelombang-pasang surut. Secara umum kurva ID menunjukkan tingkat fluktuasi yang lebih tinggi dibandingkan dengan kurva PR. Kurva-kurva ID sangat berfluktuatsi baik pada zona *upper* hingga *lower shoreface*. Kurva-kurva ID yang berfluktuatif sebagai konsekuensi dari suplai sedimen yang selalu berubah-ubah.

Asosiasi iknofosil yang berkembang sangat bervariasi dibandingkan dengan sistem delta dominasi fluvial dan sistem *shoreface* yang telah dibahas sebelumnya. Asosiasi-asosiasi iknofosil yang berkembang adalah *Paleophycus, Macaronichnus, Ophiomorpha, Paleophycus-Macaronichnus, PlanolitesSkolithos, PlanoliteS-Chondrites, Planolites-Thalassinoides-Skolithos, Helminthoidinichnites,* dan *Thalassinoides.* Ciri lainnya yang penting adalah iknofosil penyerta-nya yang sangat bervariasi dapat dijumpai pada sistem pantai kombinasi gelombang-pasang surut ini. Dengan demikian asosiasi iknofosil pada sistem pantai kombinasi gelombang-pasang surut lebih bersifat polispesifik dibandingkan dengan sistem-sistem pengendapan yang telah dibahas sebelumnya. Diagram *tiering* juga menunjukkan unit-unit iknofabrik memotong unit iknofabrik di bawahnya. Gejala ini menunjukkan tingkat struktur paleokomunitas yang lebih permanen sebagai konsekuensi dari suplai makanan yang berlimpah.



Gambar 7.4 Model pantai kombinasi gelombang-pasang surut yang berasal dari singkapan TAM-2 (interval 1160-2210) interval Serravallian.

Estuaria

Merujuk pada Dalrymple (2006), estuaria adalah lingkungan pantai transgresi di mulut sungai yang mendapatkan pasokan sedimen baik dari fluvial dan laut, dan di dalamnya terdapat fasies yang dipengaruhi oleh proses pasang surut, gelombang dan fluvial. Estuaria membentang dari batas akhir ke arah darat *(head)* fasies pasang surut sampai batas akhir ke arah laut dari fasies pantai di muaranya.

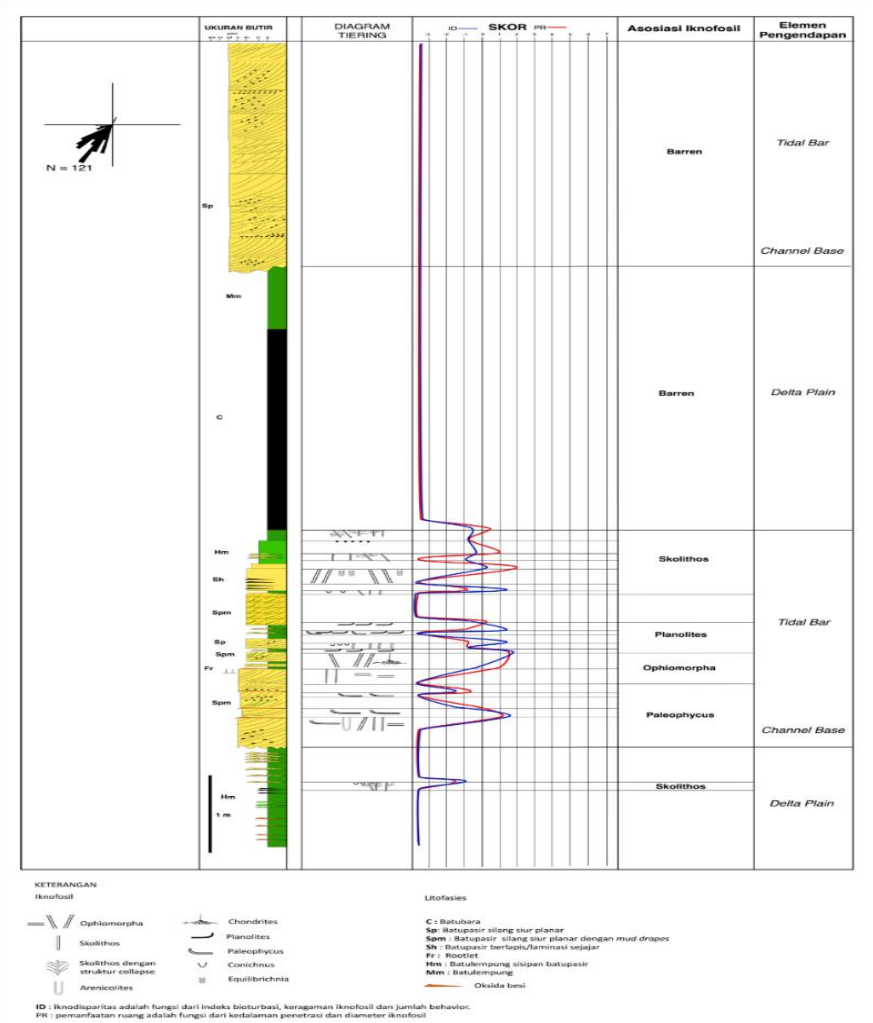
Dalrymple (2006) menjelaskan bahwa definisi di atas berlaku juga untuk *distributary channel* yang sudah tidak aktif lagi. Misalnya saja seperti yang terjadi di sebelah utara delta Mahakam modern (Allen dan Chambers, 1998; Arifullah, 2005). Gejala yang terjadi adalah *distributary channel* yang seharusnya *export dominated* menjadi *import dominated*.

Untuk mengidentifikasi *export dominated* ataupun *import dominated* maka peran pemetaan rata-rata skor ID dan arah umum arus purba menjadi penting (lihat pola distribusi skor ID pada singkapan ARD Gambar 4.9 dan skor ID pada singkapan ANG-1, ANG-2, ANG-3 Gambar 4.11). Arah umum arus purba yang diidentifikasi pada singkapan-singkapan tersebut menunjukkan arah yang berlawanan dengan arah umum suplai sedimen dalam konteks regional di daerah penelitian. Terdapat dua model estuaria diajukan dalam penelitian ini yaitu model sistem estuaria interval Serravallian yang berasosiasi dengan delta dominasi fluvial (Gambar 7.5) dan estuaria interval Tortonian yang berasosiasi dengan delta dominasi fluvial (Gambar 7.6).

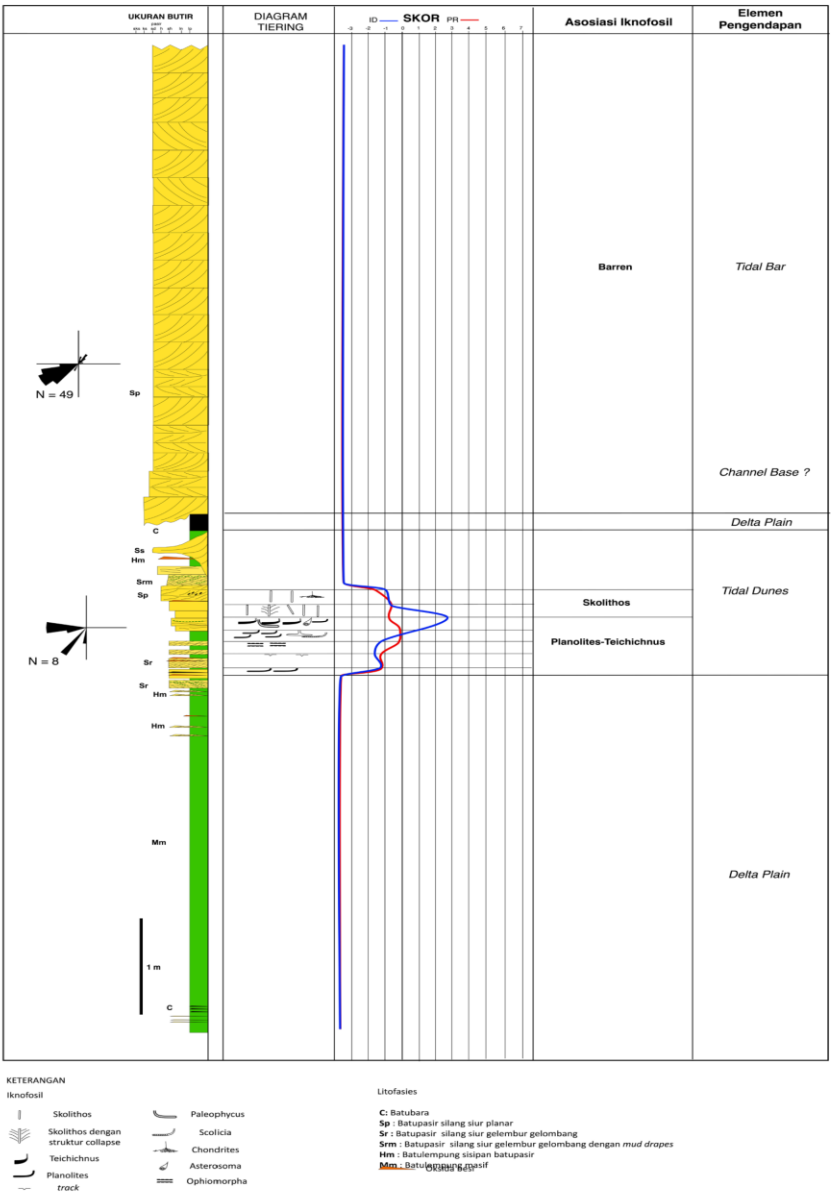
Estuaria yang berasosiasi dengan delta dominasi fluvial interval Serravallian (Gambar 7.5) menunjukkan kurva ID dan PR sewaktu-waktu dapat berada di sebelah kanan atau kiri skor 0 atau bergerak selaras. Dengan demikian faktor paleoekologi suplai makanan dan energi hidrodinamika di satu sisi dan faktor fluktuasi paleosalinitas dan paleotemperatur di sisi lain saling mendominasi silih berganti. Asosiasi iknofosil yang berkembang terdiri dari *Skolithos, Ophiomorpha, Planolites* dan *Paleophycus.* Iknofosil penyertanyapun tidak bervariasi, tidak jauh berbeda dengan delta dominasi fluvial (lihat Gambar 7.1).

Estuaria dalam Gambar 7.6 menunjukkan sedikit sekali kehadiran iknofosil. Kurva-kurva skor ID dan PR tidak cukup untuk menilai faktor yang paling mempengaruhi sistem estuaria ini. Data yang paling mendukung adalah pola arah umum arus purbanya yang berarah

barat, berlawanan dengan pola umum suplai sedimen ke arah timur sebagaimana lazimnya di Cekungan Kutai. Asosiasi ikonofosil yang berkembang tidaklah bervariasi, hanya sebatas *Skolithos* dan *Planolites-Teichichnus.* Iknofosil penyertanya sangat sedikit dijumpai.



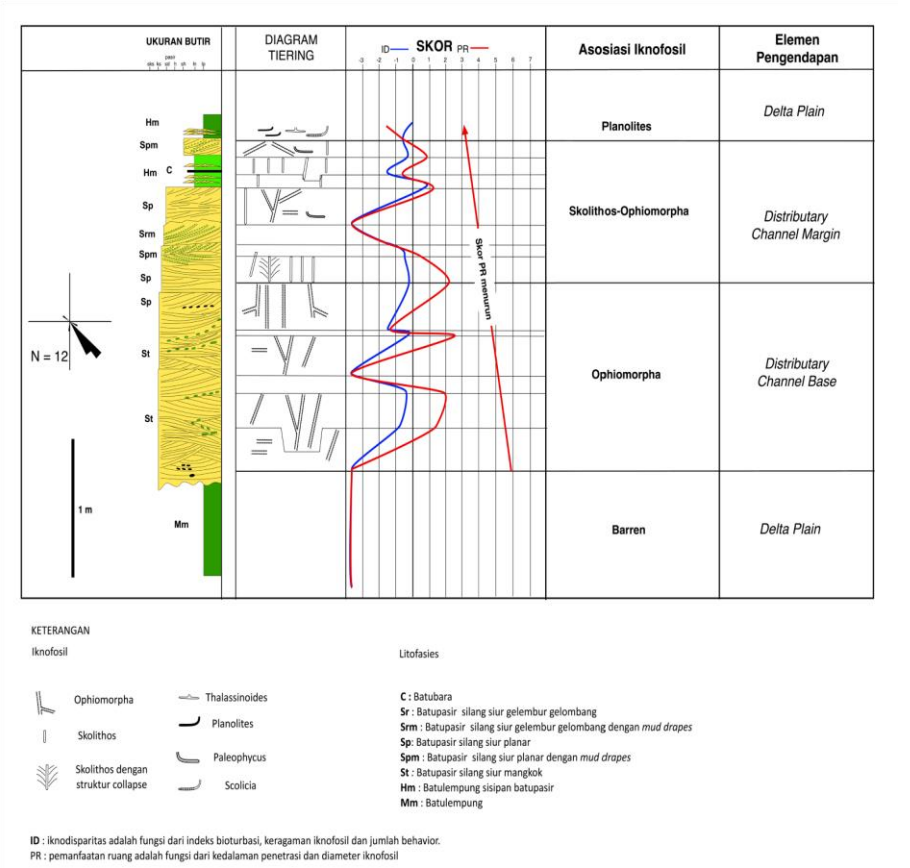
Gambar 7.5 Model estuaria yang berasal dari singkapan ARD yang berasosiasi dengan sistem delta dominasi fluvial interval Serravallian.



Gambar 7.6 Model estuaria yang berasal dari singkapan ANG-1 berasosiasi dengan sistem delta dominasi fluvial interval Tortonian.

Distributary Channel

Model *distributary channel* yang disajikan dalam Gambar 7.7 merupakan *distributary channel* dari delta dominasi fluvial interval Serravallian. Secara umum kedua kurva menunjukkan pola *in phase*. Asosiasi iknofosil yang berkembang terdiri dari *Planolites, Skolithos-Ophimorpha,* dan *Ophiomorpha.* Asosiasi iknofosil tersebut umumnya bersifat monospesifik. Namun di bagian *distributary channel margin* asosiasi iknofosil cenderung lebih beragam. Gejala-gejala yang dijumpai tidak jauh berbeda dengan model iknofosil *distributary channel* telah diajukan sebelumnya oleh Arifullah (2005).



Gambar 7.7 Model *distributary channel* yang berasal dari singkapan LNG (interval 890-1220) interval Serravallian.

Kurva-kurva ID dan PR berfluktuatif adalah konsekuensi dari suplai makanan yang berubah-ubah dan fluktuasi paleosalinitas dan peleotemperatur yang berubah-ubah pula. Namun, terlihat kurva PR lebih berfluktuasi dibandingkan dengan kurva ID yang mengindikasikan pengaruh komponen PR lebih besar untuk model *distributary channel* yang diajukan ini. Gejala ketika komponen menjadi lebih berpengaruh adalah akibat pengaruh fluktuasi paleosalinitas dan paleotemperatur yang semakin besar pada lingkungan *lower delta plain*.

Tidal Inlet

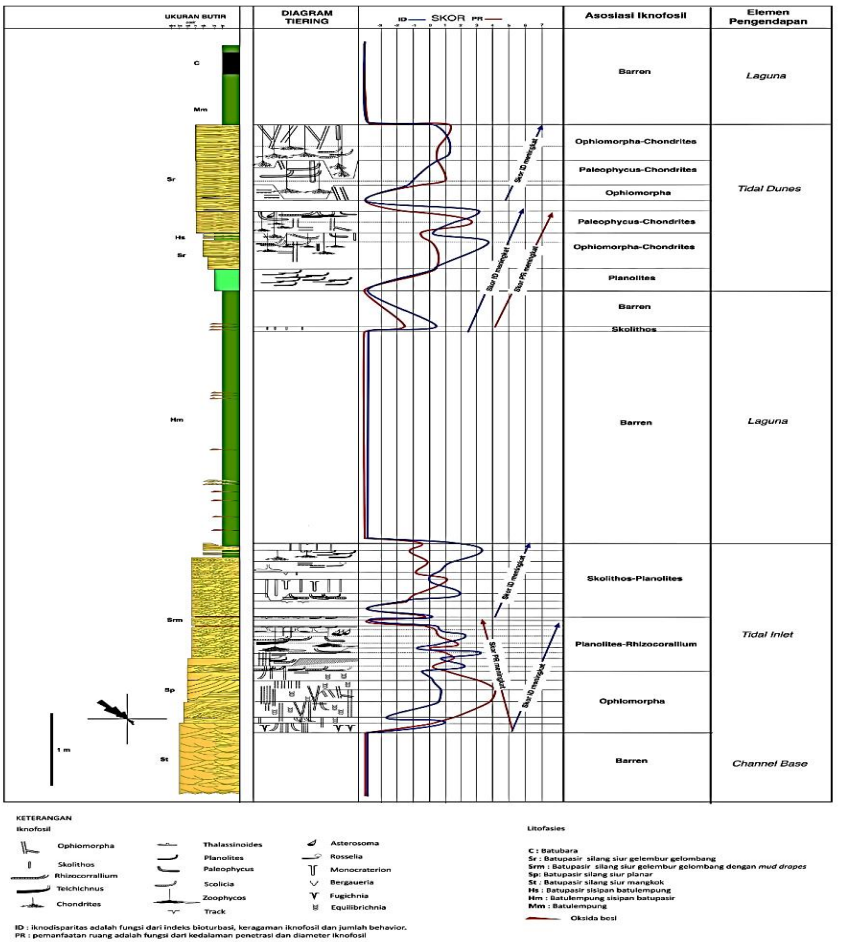
Salah satu hasil dari efek pasang surut pada pantai kombinasi gelombang-pasang surut adalah tidal inlet yang menoreh dan membagi pantai *barrier*. *Tidal inlet* menunjukkan gejala erosi yang memungkinkan arus pasang surut mengalir masuk dan keluar dari laguna. Dua model tidal inlet diajukan dalam penelitian yaitu; Model pertama (Gambar 7.8) tersusun oleh batupasir yang lebih halus dibandingkan dengan model kedua (Gambar 7.9) yang tersusun oleh batupasir yang lebih kasar.

Tidal inlet tipe pertama menunjukkan pergerakan pola kurva ID dan PR cenderung *out of phase* hampir menyerupai dengan gejala pola pergerakan kurva model pantai kombinasi gelombang-pasang surut (lihat Gambar 7.4). Secara umum faktor suplai makanan dan energi hidrodinamika lebih mendominasi dibandingkan faktor fluktuasi paleosalinitas dan paleotemperatur. Asosiasi ikonofosil yang berkembang yang terdiri dari *Ophiomorpha, PlanolitesRhizocorallium, SkolithosPlanolites, Ophiomorpha-Chondrites, PaleophycusChondrites. Ophi-omorpha* berkembang cukup signifikan pada *channel base* nya. Diagram *tiering* menunjukkan unit-unit iknofabrik dapat memotong unit iknofabrik di bawahnya yang merupakan tipikal umum pada pantai kombinasi gelombang-pasang surut (lihat Gambar 7.4).

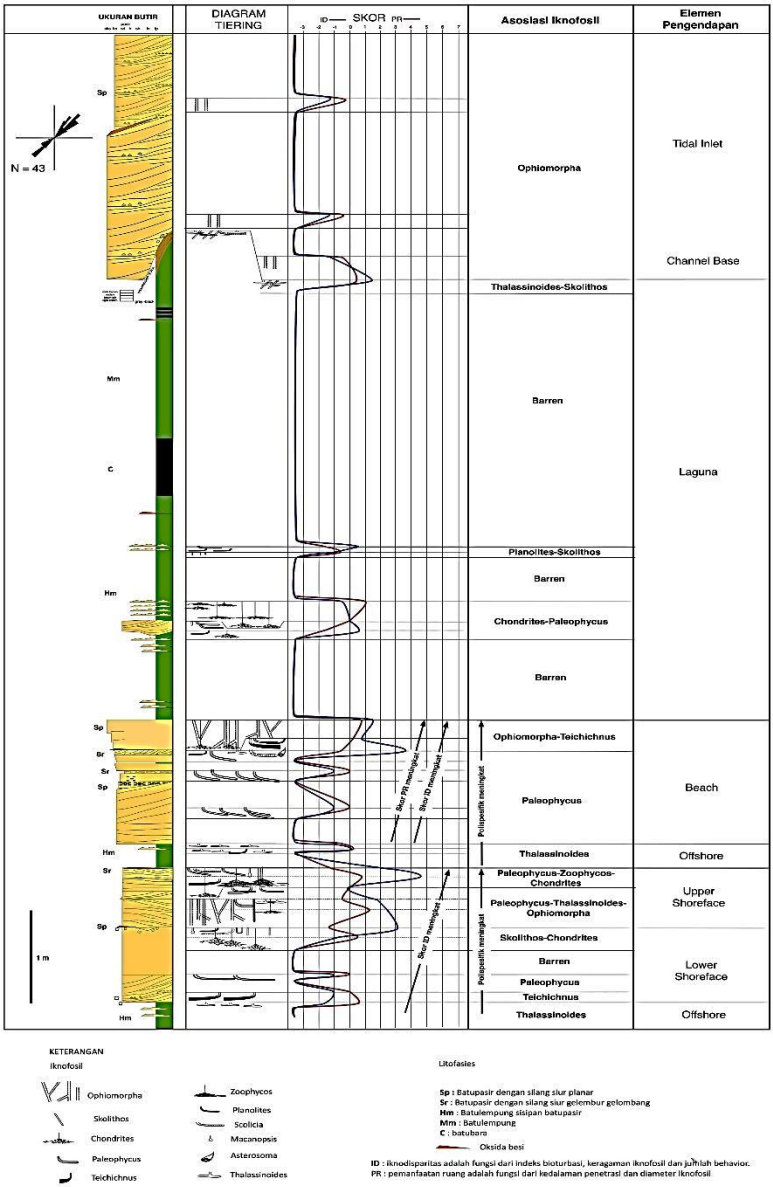
Model *tidal inlet* tipe pertama merupakan sekuen vertikal dari *tidal inlet*, laguna dan tidal dunes. Torehannya terhadap sedimen *beach* dan *shoreface* tidak teridentifikasi.

Tidal inlet tipe kedua menunjukkan pergerakan pola kurva ID dan PR cenderung in phase yang berbeda dengan model pantai kombinasi gelombang-pasang surut pada umumnya (lihat Gambar 7.4). Terlihat faktor suplai makanan dan energi hidrodinamika di satu sisi serta faktor fluktuasi paleosalinitas dan paleotemperatur di sisi lain-

nya saling mempengaruhi. Namun demikian, terlihat faktor ID lebih fluktuatif dibandingkan faktor PR. Asosiasi iknofosil yang berkembang juga bervariasi seperti *tidal inlet* model pertama. Sejumlah asosiasi iknofosil yang diidentifikasi adalah *Skolithos-Teic-hichnus-Thalassin-oides*, *Ophiomorpha* hadir setempat-setempat pada *channel base* nya.



Gambar 7.8 Model *tidal inlet* yang berasal dari singkapan PAL yang berasosiasi dengan sistem pantai kombinasi gelombang pasang surut interval Serravallian.



Gambar 7.9 Model tidal inlet yang berasal dari singkapan MAN yang berasosiasi dengan sistem pantai kombinasi gelombang-pasang surut interval Serravallian.

Model *tidal inlet* tipe kedua merupakan sekuen vertikal dari *offshore*, *lower-upper shoreface, beach*, laguna dan *tidal inlet*. Torehannya pada sedimen *beach* dan *shoreface* dapat diidentifikasi.

Kurva-kurva yang disajikan dalam setiap model sekuen vertikal menunjukkan fenomena yang sama yakni kurva yang berfluktuasi. Kurva-kurva tersebut memberikan petunjuk yang bahwa faktor paleokologi selama proses sedimentasi selalu berubah-ubah dengan berjalannya waktu (Arifullah dkk., 2018).

Rangkuman model penampang stratigrafi sistem pengendapan disajikan dalam Tabel 7.1 sampai Tabel 7.3. Tabel 7.1 khusus menyajikan model untuk pantai dominasi gelombang, delta dominasi fluvial dan pantai kombinasi gelombangpasang surut. Tabel 7.2 khusus menyajikan model *distributary channel* dan *estuaria* dan Tabel 7.3 khusus menyajikan model *tidal inlet*.

Tabel 7.1 Rangkuman model sistem pengengendapan pantai dominasi gelombang, delta dominasi fluvial dan pantai campuran gelombang pasang surut

Pantai Dominasi Gelombang				Delta Dominasi Fluvial					Pantai Campuran Gelombang-Pasang Surut		
Elemen Pengendapan		ID & PR	Asosiasi Iknofosil	Elemen Pengendapan			ID & PR	Asosiasi Iknofosil	Elemen Pengendapan	ID & PR	Asosiasi Iknofosil
Beach			*Barren*	*Delta Plain*				*Barren*	Laguna		*Barren*
Upper Shoreface			*Paleophycus-Ophiomorpha*	*Delta Front*	*Crest Mouth Bar*	*Upper*		*Skolithos-Ophiomorpha*	*Beach*		*Paleophycus-Macaronichnus-*
						Lower		*Skolithos-Paleophycus*	*Upper Shoreface*		*Ophiomorpha-Paleophycus-Macaronichnus*
Middle Shoreface	*Proximal*		*Paleophycus*		*Distal Mouth Bar*			*Ophiomorpha-Thalassinoides*	*Middle Shoreface*		*Planolites-Skolithos*
	Distal		*Skolithos*						*Lower Shoreface*		*Planolites-Chondrites-Thalassinoides-Skolithos*
Lower Shoreface			*Thalassinoides-Paleophycus*	*Prodelta*				*Barren*	*Offshore*		Cenderung *barren*, namun dapat hadir pula *Helminthoidinichnites-Thalassinoides* setempat-setempat
Offshore			*Barren*	*Offshore*				*Barren*			

KETERANGAN

→ Peningkatan skor iknodisparitas (ID) adalah fungsi dari IB, KI dan JB

→ Peningkatan skor pemanfaatan Ruang (ID) adalah fungsi dari KP dan Dm

Tabel 7.2 Rangkuman model elemen pengendapan *distributary* channel dan estuaria.

Distributary Channel				Estuaria tipe 1		Estuaria tipe 2		
Elemen Pengendapan		ID & PR	Asosiasi Iknofosil	Elemen Pengendapan	Asosiasi Iknofosil	Elemen Pengendapan		Asosiasi Iknofosil
Delta Plain			*Barren*	*Delta Plain*	*Barren*	*Delta Plain*		*Barren*
Distributary	*Channel Margin*		*Skolithos-Ophiomorpha*	*Tidal Bar*	*Skolithos-Planolites-Ophiomorpha*	*Tidal Bar*		
	Channel Base		*Ophiomorpha*	*Channel Base*	*Paleophycus*	*Channel Base*		
						Tidal Dunes	*Crest*	*Skolithos*
							Distal	*Planolites-Teichichnus*

KETERANGAN

→ Peningkatan skor iknodisparitas (ID) adalah fungsi dari IB, KI dan JB

→ Peningkatan skor pemanfaatan Ruang (ID) adalah fungsi dari KP dan Dm

Estuaria tipe 1 termasuk dalam sistem delta dominasi fluvial.
Estuaria tipe 2 termasuk dalam sistem delta dominasi fluvial yang berasosiasi dengan paleoekologi lebih dipengaruhi oleh fluktuasi paleosalinitas dan paleotemperatur.

Tabel 7.3 Rangkuman model elemen pengendapan tidal inlet.

Tidal Inlet tipe 1				Tidal Inlet tipe 2			
Elemen Pengendapan		ID & PR	Asosiasi Iknofosil	Elemen Pengendapan		ID & PR	Asosiasi Iknofosil
Laguna			*Barren*	Tidak tersingkap			
Tidal Dunes	*Crest*		*Ophiomorpha-Paleophycus-Chondrites*				
	Distal		*Paleophycus-Ophiomorpha-Chondrites-Planolites*				
Laguna			*Barren*, namun dapat pula hadir *Skolithos* setempat-setempat				
Tidal Inlet	*Margin*		*Skolithos-Planolites-Rhizocorralium*	*Tidal Inlet*	*Margin*		*Skolithos-Teichichnus-Thalassinoides*
	Channel Base		*Ophiomorpha*		*Channel Base*		*Barren*, namun dapat pula hadir *Ophiomorpha* setempat-setempat
			Barren				
Tidak tersingkap				*Laguna*			*Barren*, namun dapat pula hadir *Planolites, Skolithos, Chondrites* dan *Paleophycus* setempat-setempat
				Beach			*Ophiomorpha-Teichnichnus-Paleophycus*
				Offshore			*Thalassinoides*
				Upper Shoreface			*Paleophycus-Zoophycos-Chondrites-Thalassinoides-Ophiomorpha*
				Lower Shoreface			*Skolithos-Chondrites-Paleophycus-Teichichnus*
				Offshore			*Thalassinoides*

KETERANGAN

→ Peningkatan skor iknodisparitas (ID) adalah fungsi dari IB, KI dan JB

→ Peningkatan skor pemanfaatan Ruang (ID) adalah fungsi dari KP dan Dm

Dalam tabel 7.1 menunjukkan kecenderungan yang sama yaitu ke arah darat menunjukkan peningkatan komponen ID dan PR, hanya pada sistem pantai kombinasi gelombang-pasang surut yang relatif tidak menunjukkan pola peningkatan komponen PR. Secara umum asosiasi iknofosil yang berkembang pada elemen-elemen pengendapan ke arah darat lebih didominasi oleh *Ophiomorpha, Paleophycus* dan *Skolithos* sedangkan elemen-elemen pengendapan ke arah laut mulai berkembang *Thalassinoides* dan *Planolites*. Secara lateral, *Planolites* dan komponen ID meningkat ke arah pantai kombinasi gelombang-pasang surut dan sebaliknya *Paleophycus* meningkat ke arah pantai dominasi gelombang.

Dalam Tabel 7.2 menunjukkan model *distributary channel* dan estuaria. Secara umum estuaria tipe 1 lebih dipengaruhi oleh faktor suplai sedimen dan tipe 2 lebih dipengaruhi oleh faktor fluktuasi paleosalinitas dan paleotemperatur, keduanya menunjukkan variasi iknofosil yang tidak terlalu banyak.

Gejala sedikitnya asosiasi iknofosil juga ditunjukkan oleh *distributary channel*. Hanya *Skolithos* dan *Ophiomorpha* yang berkembang. Komponen ID meningkat ke arah *channel margin* yang secara hidrodinamika berenergi rendah bila dibandingkan dengan *channel base.* Komponen PR meningkat ke arah channel base yang bermakna *Ophiomorpha* berukuran besar dan penetrasinya dalam dapat ditafsirkan fluktuasi paleosalinitas dan paleotemperatur terbesar terjadi pada *channel base*.

BAB 8

Penutup

Studi iknofosil dengan optimalisasi aspek-aspek iknofosil yang mencakup iknotaksa, indeks bioturbasi, keragaman iknofosil, jumlah behavior, kedalaman penetrasi dan diameter iknofosil telah memberikan kontribusi dalam merekonstruksi sistem pengendapan di daerah Samarinda dan sekitarnya di Cekungan Kutai Kalimantan Timur.

Metode yang diterapkan berhasil mengenali sistem pantai dominasi gelombang, delta dominasi fluvial, pantai campuran gelombang-pasang surut, estuaria, distributary channel dan tidal inlet secara lebih baik. Untuk sistem pengendapan yang lebih dipengaruhi oleh proses gelombang dicirikan dengan dominasi Paleophycus bersama-sama dengan Skolithos, sedangkan untuk sistem pengendapan pengaruh proses pasang surut mulai meningkat ditandai dengan dominasi Planolites bersama-sama dengan Skolithos dan Ophiomorpha. Untuk sistem pengendapan yang dipengaruhi oleh proses fluvial ditandai dengan dominasi asosiasi Skolithos dan Ophiomorpha.

Dari 34 iknotaksa yang diidentifikasi, hanya enam iknotaksa yang paling umum dijumpainya dengan probabilitas keseluruhannya mencapai 91,06%. Keenam asosiasi iknofosil tersebut adalah Ophiomorpha, Skolithos, Paleophycus, Planolites, Thalassinoides dan Chondrites yang umumnya hadir dalam bentuk varian monospesifik. Keenam iknotaksa tersebut kemudian dijadikan dasar dalam penamaan asosiasi iknofosil. Demikian juga dengan nilai rata-rata indeks bio-turbasi (IB), keragaman iknofosil (KI), jumlah behavior (JB), kedalaman penetrasi (KP) dan diameter iknofosil (Dm) termasuk

dalam kategori "rendah" adalah ciri-ciri kunci sistem pengendapan di daerah penelitian. Membandingkan data kedalaman penetrasi (KP) dan diameter iknofosil (Dm) Chondrites, Planolites dan Ophiomorpha telah menegaskan bahwa Chondrites pada sistem pengendapan laut dangkal tidak selalu menjadi indikator kondisi anoksik sebagaimana yang umum dipahami selama ini.

Iknodisparitas (ID) dan pemanfaatan ruang (PR) adalah komponen baru yang dihasilkan dari analisis komponen utama (PCA). Iknodisparitas (ID) adalah fungsi dari IB, KI dan JB dan komponen pemanfaatan ruang (PR) adalah fungsi dari KP dan Dm. Kedua komponen tersebut dapat ditafsirkan faktor paleoekologi utama yang mempengaruhinya. Pemetaan skor ID dan PR menjadi dasar dalam merekonstruksi peta paleogeografi dan model paleoekologi. Skor ID dan PR yang digambarkan dalam bentuk kurva-kurva yang menyertai profil sekuen vertikal membuktikan adanya dinamika paleoekologi dalam sistem pengendapan yang merupakan ciri sistem pengendapan yang dipengaruhi oleh proses pasang surut.

Faktor suplai makanan dan energi hidrodinamika adalah faktor paleokologi yang mempengaruhi komponen ID. Komponen PR dipengaruhi oleh faktor fluktuasi paleosalinitas dan paleotemperatur. Secara paleoekologi, sistem pengendapan interval Serravallian lebih dipengaruhi oleh faktor suplai makanan dan energi hidrodinamika yang berasosiasi dengan kontrol influks fluvial, sedangkan sistem pengendapan interval Tortonian lebih dipengaruhi oleh faktor fluktuasi paleosalinitas dan paleotemperatur yang terkait dengan kontrol muka air laut relatif. Perbedaan pengaruh paleoekologi tersebut juga ditunjukkan dengan tren perkembangan asosiasi Skolithos. Secara stratigrafi, probabilitas ditemukannya asosiasi Skolithos semakin meningkat pada interval Serravallian, sedangkan pada interval Tortonian menunjukkan sebaliknya.

Daftar Pustaka

Abad, M. R. (2006). Escape and equilibrium trace fossils in association with Conichnus conicus as indicators of variable sedimentation rates in Tortonian littoral environments of SW Spain, 39, 1-11.

Allen, G. d. (1998). Sedimentation in the Modern and Miocene Mahakam Delta.

Allen, J. R. (1965). Late Quarternary Niger Delta, and adjacent areas: sedimentary environments and lithofacies, Bulletin of The American Association of Petroleum Geologist. *49(5), 547-600, 49*, 547-600.

Arifullah, E. (2005). Karakteristik ichnologi dan sistem pengendapan delta, studi sasus: Delta Mahakam Modern dan Miosen Cekungan Kutai Kalimantan Timur, Tesis Program Magister, Institut Teknologi Bandung.

Arifullah, E., Zaim, Y., Aswan, A., dan Djuhaeni, D. (2017a). Ichnofabric of tidal deposit in Balikpapan Formation, Kutai Basin (Indonesia), Abstract Volume of 14th International Ichnofabric Workshop, Taipei, Taiwan, vol.6

Arifullah, E., Zaim, Y., Aswan, A., dan Djuhaeni, D. (2017b). Transformation of ichnofabric variables and its generated curves: the ichnological modus operandi in paleoenvironmental analysis, Joint Convention Malang

Arifullah, E., Zaim, Y., Aswan, A., dan Djuhaeni, D. (2018). Ichnofabric oscillatory curves reveal the tide-dominated depositional system in Samarinda, Kutai Basin (Indonesia), Proceeding of Regional Seminar Past & Present Sedimentation in Tropical Region, Yogyakarta.

Arifullah, E. (2019). *Studi iknofosil untuk rekonstruksi model sistem pengendapan sedimen berumur Miosen Cekungan Kutai, Samarinda dan sekitarnya, Kalimantan Timur.* Bandung: Ph.D Disertation, Institut Teknologi Bandung.

Arifullah, E., Zaim, Y., Aswan, A., dan Djuhaeni, D. (2019). Tiering style and its interpretation: ichnofabric study in Balikpapan Formation, Kutai Basin, Indonesia, Journal of Mathematical and Fundamental Science, 51(1), 90-102.

ArifullahE., Zaim, Y., Aswan, A., & Djuhaeni, D. (2021). Basin-Scale Paleocology: Using SEmi-Quantitative Analysis of the Ichnofabric whitin Kutai Basin (Indonesia). J. Math. Fund. Sci, 53, 286-305.

Bachtiar, A. (2004). Kerangka stratigrafi sekuen dan karakter batuan induk Miosen Awal di Cekungan Kutai Hilir, Kalimantan Timur, Disertasi Program Doktor, Institut Teknologi Bandung.

Bambach, R. (1983). Ecospace utilization and guilds in marine communities through the Phanerozoic, M. J, 719-746 dalam Tevesz dan P. L. McCall., ed., Biotic interactions in recent and fossil benthic communities, Topics in Geobiology, Springer Science+Business Media, LLC.

Beynon, B.M. dan Pemberton, G. S. (1992). Ichnological signature of a brackish water deposit: an example from the Lower Cretaceous Grand Rapids Formation, Cold Lake Oil Sands area, Alberta, Applications of Ichnology to Petroleum Exploration, A Core Workshop, SEPM Core Workshop, 17, 199-221.

Bhattacharya, J. P. dan Giosan, L. (2003). Wave-influenced deltas: geomorphological implications for facies reconstruction, Sedimentology, 50, 187-210.

Bischoff, B. (1968). Zoophycos, a polychæte annelid, Eocene of Greece, Journal of Paleontology, 42, 1439-1443.

Bjerstedt, T. W. dan Erickson, J. M. (1989). Trace fossils and bioturbation in peritidal facies of the Potsdam-Theresa Formations (Cambrian-Ordovician), Northwest Adirondacks, Palaios, 4(3), 203-224

Bottjer, D. J. (2016). *Paleoecology: past, present, and future, Chichester*, West Sussex; Hoboken, NJ: Wiley.

Boggs, S. (1987). Principles of sedimentology and stratigraphy, Merrill Publishing Company, 305- 309.

Bottjer, D. J. dan Droser, M. L. (1991). Ichnofabric and basin analysis, Palaios, 6, 199-25.
Boyd, R., Dalrymple, R. W., dan Zaitlin, B. A. (1992). Classification of clastic coastal depositional environments, Sedimentary Geology, 80, 139-150.
Brenchley, P. J. dan Harper, D. A. T. (1998). Paleoecology: ecosystems, environments and evolution, 1st ed., London: Chapman & Hall, 50-54.
Bromley, R. G. (1967). Some observations on burrows of thalassinidean Crustacea in chalk hardgrounds, Quarterly Journal of the Geological Society, 123, 157-177. 166
Bromley, R. G. (1975). Trace fossils at omission surfaces, 399-428 dalam Frey, R. W., ed., The study 122 of trace fossils: a synthesis of principles, problems and procedures in ichnology, Springer - Verlag.
Bromley, R. G. dan Ekdale, A. A. (1984). Chondrites: a trace fossil indicator of anoxia in sediments, Science, 224, 872-874.
Bromley, R. G. dan Ekdale, A. A. (1986). Composite ichnofabrics and tiering of burrows, Geology Magazine, 123(1), 59-65.
Bromley, R. G. (1996). *Trace fossils: biology, taphonomy and applications*, Second edition, Springer Science+Business Media B.V.
Buatois, L. A., Mangáno, G. M., dan Maples, C. (1997). The paradox of nonmarine ichnofaunas in tidal rhythmites: integrating sedimentologic and ichnologic data from teh Late Carboniferous of Eastern Kansas, USA, Palaios, 12, 467-481.
Buatois, L. A. dan Mángano, G. M. (2011). *Ichnology: organism-substrate interactions in space and time*, Cambridge University Press.
Buatois, L. A. dan Mángano, G. M. (2012). An Early Cambrian shallow-marine ichnofauna from the Puncoviscana Formation of NorthWest Argentina: the interplay between sophisticated feeding behaviors, matgrounds and sealevel changes, Journal of Paleontology, 86(1), 7-18.
Buatois, L. A. dan Mángano, G. M. (2013). Ichnodiversity and ichnodisparity: significance and caveats, Lethaia, 46, 281-292.
Buckman, J.O. (1996). Heimdallia from the Lower Carboniferous of Ireland: H. mullaghmori a new ichnospecies, and re-evaluation of the threedimensional format of the ichnogenus, Ichnos, 5(1),

43-51.
Bush, A. M., Bambach, R. K., dan Daley, G. M. (2007). Changes in theoretical ecospace utilization in marine fossil assemblages between the midPaleozoic and late Cenozoic, Paleobiology, 33(1), 76-97.
Byers, C. W. (1982). Geological significance of marine biogenic sedimentary structures, 221–256 dalam McCall, P. L. dan Tevesz, M. J. S., ed., Animalsediment relation: *the biogenic alteration of sediments*, Topics in geobiology, 2, Springer Science+Business Media New York.
Callow, R. H. T., McIlroy, D., Kneller, B., dan Dykstra, M. (2013). Ichnology of Late Cretaceous Turbidites from the Rosario Formation, Baja California, Mexico, Ichnos, 20, 1-14.
Carmona, N. B., Buatois, L. A., Mangano, G. M., dan Bromley, R. G. (2008). Ichnology of the Lower Miocene Chenque Formation, Patagonia, Argentina: animal - substrate interactions and the modern evolutionary fauna, Ameghiniana, 49(1), 93-122.
Chamberlain, C. K. (1971). Morphology and ethology of trace fossils from the Ouachita Mountains, Southeast Oklahoma, Journal of Paleontology, 45(2), 212-246.
Chambers, J. L., Allen, G. P., Suprapto, A., dan Atkinson, C. (1992). *Indonesian Petroleum Association Post Convention Field Trip*, East Kalimantan Guide Book
Chambers, J.L. dan Daley, T.E. (1997). A Tectonic model for the onshore Kutei Basin, East Kalimantan, based on integrated geological and geophysical interpretation. Indonesian Petroleum Association 24th Annual Convention & Exhibition, Jakarta: Indonesian Petroleum Association, 111-128.
D"Allessandro, A. dan Bromley, R. G. (1987). Meniscate trace fossils and the Muensteria-Taenidium problem, Paleontology, 30, 743-763.
Dalrymple, R. W., Zaitlin, B. A., dan Boyd, R. (1992). Estuarine facies models: conceptual basis and stratigraphic implications, Journal of Sedimentary Petrology, 62(6), 1130-1146.
Dalrymple, R. W. (2006). Incised valleys in time and space: an introduction to the volume and an examination of the controls on valley formation and filling, Incised Valleys in Time and Space, SEPM Special Publication, 85, 5-12, SEPM (Society for Sedimentary Geology).

Dalrymple, R. W. dan Choi, K. (2007). Morphologic and facies trends through the fluvial–marine transition in tide-dominated depositional systems: a schematic framework for environmental and sequence-stratigraphic interpretation, Earth Science Review, 81, 135-174

Dapples, E. (1942). The effect of macro-organisms upon near-shore marine sediments, Journal of Sedimentary Petrology, 12(3), 118-126.

Dashtgard, S. E., Pemberton, G. S., dan Gingras, M. K. (2009). Brackish-water ichnological trends in a microtidal barrier island-embayment system, Kouchibouguac National Park, New Brunswick, Canada, Palaios, 24(8), 478-496.

Dashtgard, S. E., Gingras, M. K., dan Pemberton, G. S. (2008). Grain-size controls on the occurrence of bioturbation, Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 257, 224-243.

Dashtgard, S. E. dan Gingras, M. K. (2012). Marine invertebrate neoichnology, Trace fossil as indicators of sedimentary environments, Developments in Sedimentology, 64, 273-295, Elsevier B.V.

Di Martino, E., Taylor, P. D., dan Johnson, K. G. (2015). Bryozoan diversity in the Miocene Miocene of the Kutai Basin, East Kalimantan, Indonesia, Palaios, 30 (1), 109-115.

Doust, H. dan Noble, R. A. (2008). Petroleum systems of Indonesia, Marine and Petroleum Geology, 25, 103-129.

Droser, M. L. dan Bottjer, D. J. (1986). A semiquantitative field classification of ichnofabric, Journal of Sedimentary Petrology, 56, 558-559. 168

Droser, M. L. dan Bottjer, D. J. (1989). Ichnofabric of sandstones deposited in high-energy nearshore environments: measurement and utilization, Palaios, 4(6), 598-604.

Droser, M. L. (1991). Ichnofabric of the Paleozoic Skolithos ichnofacies and the nature and distribution of Skolithos piperock, Palaios, 6(3), 316–325.

Droser, M. L., Hughes, N. C., dan Jell, P. A. (1994). Infaunal communities and tiering in Early Palaeozoic nearshore clastic environments: trace-fossil evidence from the Cambro-Ordovician of New South Wales, Lethaia, 27, 273-283.

Ekdale, A. A. dan Bromley, R. G. (1984). Trace fossils and ichnofabric in the Kjølby Gaard Marl, uppermost Cretaceous, Denmark,

Bulletin of the Geological Society of Denmark, 31, 107-119
Ekdale, A. A. (1988). Pitfalls of paleobathymetric interpretations based on trace fossil assemblages, Palaios, 3(5), 464–472.
Ekdale, A. A. dan Bromley, R. G. (1991). Analysis of composite ichnofabrics: an example in Uppermost Cretaceous Chalk of Denmark, Palaios, 6(3), 232-249.
Ekdale, A. A., Bromley, R. G., dan Pemberton, G. S. (1984). *Ichnology: the use of trace fossils in sedimentology and stratigraphy*, SEPM Short Course, Tulsa, Oklahoma: Society of Economic Paleontologists and Mineralogists.
Ekdale, A. A. dan Stinnesbeck, W. (1998). Trace fossils in Cretaceous-Tertiary (KT) boundary beds in Northeastern Mexico: Implications for sedimentation during the KT boundary event, Palaios, 13(6), 593-602.
Farrow, G. E. (1966). Bathymetric zonation of Jurassic trace fossils from the coast of Yorkshire, England, Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2, 103-151.
Frey, R. W. (1975). The realm of ichnology, its strengths and limitations, 15–38 dalam R. W. Frey., ed., *The study of trace fossils: a synthesis of principles, problems and procedures in ichnology*, Springer - Verlag.
Frey, R. W., Howard, J. D., dan Pryor, W. A. (1978). Ophiomorpha: its morphologic, taxonomic, and environmental significance, Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 23, 199-229.
Frey, R. W. dan Pemberton, G. S. (1987). The Psilonichnus ichnocoenose, and its relationship to adjacent marine and nonmarine ichnocoenoses along the Georgia Coast, Bulletin of Canadian Petroleum Geology, 35(3), 333-357.
Frey, R. W., Pemberton, G. S., dan Saunders, T. D. (1990). Ichnofacies and bathymetry: a passive relationship, Journal of Paleontology, 64(1), 155-158.
Frey, R. W. (1990). Trace fossils and hummocky cross-stratification, Upper Cretaceous of Utah, Palaios, 5(3), 203-218.
Fürsich, F. T. (1974). Corallian (Upper Jurassic) trace fossils from England and Normandy, Stuttgarter Beiträge zur Naturkunde Serie B (Geologie und Paläontologie), 13, 1-52.
Galloway, W. E. (1989). Genetic stratigraphic sequences in basin analysis I: architecture and genesis of flooding-surface bounded

depositional units, The American of Petroleum Geologist Bulletin, 73(2), 125-142.
Galloway, W. E. dan Hobday, D.K. (1996). Terrigenous clastic depositional systems, SpringerVerlag, Heidelberg, 91-92.
Gingras, M. K., Pemberton, G. S., Saunders, T., dan Clifton, E. (1999). The ichnology of modern and Pleistocene brackish-water deposits at Willapa Bay, Washington: variability in estuarine settings, Palaios, 14(4), 352-374. 170
Gingras, M. K., Räsänen, M. E., Pemberton, G. S., dan Romero, L. P. (2002). Ichnology and sedimentology reveal depositional characteristics of baymargin parasequences in the Miocene 124 Amazonian foreland basin, Journal of Sedimentary Research, 72(6), 871-883.
Gingras, M. K., MacEachern, J. A., dan Dashtgard, S. E. (2011). Process ichnology and the elucidation of physico-chemical stress, Sedimentary Geology, vol. 237, 115-134.
Gingras, M. K., MacEachern, J., dan Dashtgard, S. E. (2012). Estuaries, D. Knaust dan R. G. Bromley (Ed.), Trace fossils as indicators of sedimentary environments, Developments in Sedimentology, vol. 64, 463-505,
Gingras, M. K. dan MacEachern, J. A. (2012). Tidal ichnology of shallow water setting, 57-77 dalam Davis, R.A. dan Dalrymple, R. W., ed., *Principles of Tidal Sedimentology*, Springer Science+Business Media B.V
Goldring, R. (1964). Trace fossil and the sedimentary surface in shallow water marine sediments, 136-143 dalam L. M. J. Van Straaten., ed., Deltaic and Shallow Marine Deposits, Developments in Sedimentology, Vol. 1-1, Elsevier Publishing Company Ltd.
Goldring, R. (1993). Ichnofacies and facies interpretation, Palaios, vol.8, 403-405.
Goldring, R. (1995). Organisms and the substrate: response and effect, Geological Society, London, Special Publications, 83(1), 151-180.
Gray, J. S. dan Elliott, M. (2009). *Ecology of marine sediments: from science to management, 2nd ed*, Oxford; New York: Oxford University Press.
Hasiotis, S. T. and Bourke, M. C. (2006). Continental trace fossils and museum exhibits: displaying organism behaviour frozen in time,

The Geological Curator, 8(5): 211-226

Hertweck, G., Wehrmann, A., Liebezeit, G., dan Steffin, M. (2005). Ichnofabric zonation in modern tidal flats: paleoenvironmental and palaeotrophic implications, Senckenbergiana maritima, 35(2), 189-201.

Hertweck, G., Wehrmann, A., dan Liebezeit, G. (2007). Bioturbation structures of polychaetes in modern shallow marine environments and their analogues to Chondrites group traces, Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 245(3-4), 382-389.

Howard, J. D. dan Frey, R. W. (1975). Regional animal-sediment characteristics of Georgia estuaries, Seckenbergiana marit., 7, 33-103.

Howard, J. D. (1978). Sedimentology and trace fossils, 13-45 dalam P. B. Basan., ed., *Trace fossil concepts*, SEPM Short Course, 5, SEPM (Society for Sedimentary Geology).

Hubbard, S. M. dan Shultz, M. R. (2008). Deep burrows in submarine fan channel deposits of the Cerro Toro Formation (Cretaceous), Chilean Patagonia: implication for firmground development and colonization in the the deep sea., Palaios, 23(4), 223-232.

Hubbard, S. M., MacEachern, J. A., dan Bann, K. L. (2012). Slopes, 607-642 dalam D. Knaust dan R. G. Bromley., ed., Trace fossils as indicators of sedimentary environments, Developments in Sedimentology, 64., Elsevier B.V.

Imbrie, J. dan Newell, N. (1964). The viewpoint of paleoecology, 1-7 dalam J. Imbrie dan N. Newell.,ed., Approaches to Paleoecology,, John Wiley and Sons, Inc. Johnson, R. (1965): Temperature variation in the infaunal environment of a sand flat, Limnology and Oceanography, 10, 114-120.

Jolliffe, I. (2002). Principal component analysis, Second edition, Springer, 112-131.

Kaiser, H. F. (1960). The application of electronic computers to factor analysis, Educ. Psychol. Meas, 20(1), 141-151.

Kappeler, P. M. (2012). *Verhaltensbiologie*, 3rd ed., Springer, Heidelberg.

Keho, Y. (2012). The basics of linear principal component analysis, P. Sanguansat (Ed.), Principal component analysis, 181-206, InTech.

Knaust, D. (2009). Characterisation of a Campanian deep-sea fan system in the Norwegian Sea by means of ichnofabrics, Marine and Petroleum Geology, 26, 1199-1211.
Knaust, D. (2012). Trace-fossil systematics, 79-101 dalam Knaust, D., ed., *Trace fossil as indicators of sedimentary environments*, Developments in Sedimentology, 65, Elsevier B.V.
Knaust, D. (2013). The ichnogenus Rhizocorallium: classification, trace makers, palaeoenvironments and evolution, Earth Science Review, 126, 1-47.
Knaust, D. (2015). Siphonichnidae (new ichnofamily) attributed to the burrowing activity of bivalves: 125 ichnotaxonomy, behaviour and palaeoenvironmental implications, Earth Science Review, 150, 497-519
Knaust, D. (2017). At*las of trace fossils in well core: appearance, taxonomy dan interpretation*, Springer.
Koch, R. (2013). *The 80/20 principle and 92 other power laws of nature*, London. Boston: Nicholas Brealey Publishing.
Kotake, N. (1992). Deep-sea echiurans: possible producers of Zoophycos, Lethaia, 25(3), 311-316.
Kotake, N. (1993). Tiering of trace fossil assemblages in Plio-Pleistocene bathyal deposits of Boso Peninsula, Japan, Palaios, 8, 544–553. Książkiewicz, M. (1977): Trace fossils in the flysch of the Polish Carpathians, Paleontologia Polonica, 36, 544-553.
Land, D. H. dan Jones, C. M. (1987). Coal geology and exploration of part of the Tertiary Kutei Basin in East Kalimantan, Indonesia, 32(1), 235-255 dalam A. C. Scott., ed., *Coal and Coal-bearing Strata: Recent Advances*, Geological Society Special Publication, 32, Geological Society of London.
Levinton, J. S. (1977). Ecology of shallow water deposit-feeding communities, Quisset Harbor, Massachusetts, 191-227 dalam B. C. Coull., ed., *Ecology of Marine Benthos*, Univ. South Carolina Press.
Liu, C. W., Lin, K. H., dan Kuo, Y. M. (2003). Application of factor analysis in the assessment of groundwater quality in blackfoot deases area in Taiwan, The Science of the Total Environment, 313(1-3), 77-89.
Lindström, M. (1979). Diagenesis of Lower Ordovician hardgrounds in Sweden, Geol. Palaeontol, 13, 9-30.

Locklair, R. E. dan Savrda, C. E. (1998). Ichnofossil tiering analysis of a rhythmically bedded chalkmarl sequence in the Upper Cretaceous of Alabama, Lethaia, 31(4), 311-321.

Löwemark, L. dan Nara, M. (2010). Morphology, ethology and taxonomy of the ichnogenus Schaubcylindrichnus: notes for clarification, Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 297(1), 184-187.

Mángano, G. M. dan Buatois, L. A. (2012). A multifaceted approach to ichnology, Ichnos, 19(3), 121-126.

MacEachern, J. A. dan Gingras, M. K. (2007). Recognition of brackish-water trace-fossil suites in the Cretaceous Western Interior Seaway of Alberta, Canada, 149–193 dalam R. G. Bromley, L. A. Buatois, dan G. Mángano., ed., *Sediment-organism interactions: a multifaceted ichnology*, SEPM Special Publication, 88.

McIlroy, D. (2004). Ichnofabric and sedimentary facies of a tide-dominated delta: Jurassic Ile Formation of Kristin Field, Haltenbanken, offshore MidNorway London, 228(1), 237-272 dalam D. McIlroy., ed., *The application of ichnology to paleoenvironmental and stratigraphic analysis*., Geological Society Special Publication, 228.

Miall, A. (1985). Architectural-element analysis: a new method of facies analysis applied to fluvial deposits, Earth Science Review, 22(4), 261-308.

Miller, W. III. (2001a). Thalassinoides-Phycodes compound burrow systems in Paleocene deep-water limestone, Southern Alps of Italy, Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 170(1-2), 149-156.

Miller, W. III. (2001b). What‟s in a name? ecologic entities and the marine paleoecologic record, 15– 34, dalam W. D. Allmon dan D. J. Bottjer., ed., E*volutionary paleoecology: the ecological context of macroevolutionary change* Columbia University Press.

Miller, W. III. (2003). Paleobiology of complex trace fossils, Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 192(1-4), 3-14.

Miller, W. III. (2007). Complex trace fossils, 458-465, dalam Miller III, W., ed., *Trace fossils: concepts, problems, prospects*, Elsevier B.V.

Monaco, P., Caracuel, J. E., dan Giannetti, A. (2009). Thalassinoides and Ophiomorpha as crossfacies trace fossils of crustaceans from shallow-todeep-water environments: Mesozoic and Tertiary

examples from Italy and Spain, 35, 23-25 dalam A. Garassion, R. M. Feldmann, dan G. Teruzzi., ed., 35, Dipresentasikan pada 3rd Symposium on Mesozoic and Cenozoic Decapod Crustaceans.

Moore, D. dan Scruton, P. (1957). Minor internal structures of some recent unconsolidated sediments, 126 Bulletin of The American Association of Petroleum Geologist, 41(12), 2723-2751.

Morenco, K. N. dan Bottjer, D. J. (2011). Quantifying bioturbation in Ediacaran and Cambrian rocks, 36, 135–160 dalam Laflamme, M., Schiffbauer, J. D. dan Dornbos, S. Q., ed., *Quantifying the Evolution of Early Life, Topics in Geobiology*, 36, Springer Science+Business Media B.V.

Moss, S. dan Chambers, J. (1999). Tertiary facies architecture in the Kutai Basin, Kalimantan Indonesia, Journal of Asian Earth Sciences, 17(1-2), 157-181.

Nara, M. (2002). Crowded Rosselia socialis in Pleistocene inner shelf deposits: benthic paleoecology during rapid sea-level rise, Palaios, 17(3), 268-276.

Nara, M. dan Seike, K. (2004). Macaronichnus segregatis-like traces found in the modern foreshore sediments of the Kujukurihama Coast, Japan, Journal Geological Society of Japan, 110(9), 545–551.

Netto, R. G. (2007). Skolithos-dominated piperock in nonmarine environments: an example from the Triassic Caturrita Formation, Southern Brazil, Sedimentorganism interactions: a multifaceted ichnology, SEPM Special Publication, 88, 109-121.

Netto, R. G., Buatois, L. A., Mangano, G. M., dan Balistieri, P. (2007). Gyrolithes as a multipurpose burrow: an ethologic approach, Revista Brasileira de Paleontologia, 10(3), 157-168.

Pearson, T. dan Rosenberg, R. (1978). Macrobenthic succession in relation to organic enrichnment and pollution of the marine environment, Oceanogr. Mar. Biol. Ann. Rev, 16, 229-311.

Pearson, N. J. dan Gingras, M. K. (2006). An ichnological and sedimentological facies model for muddy point-bar deposits, Journal of Sedimentary Research, 76(5), 771-782.

Pemberton, G. S., Spila, M., Pulham, A. J., Saunders, T., MacEachern, J. A., Robbins, D., dan Sinclair, I. K. (2001). Ichnology & sedimentology of shallow to marginal marine systems, Short Course Notes, 15, 343 Edmonton: Geological Association of Canada, 105-136.

Pemberton, G. S., MacEachern, J.A., dan Dashtgard, S. E. (2012). Shorefaces, 563–606 dalam D. Knaust dan R. G. Bromley., ed., Trace fossil as indicators of sedimentary environments, Developments in Sedimentology, 64, Elsevier B.V.

Pemberton, G. S. dan Wightman, D. (1992). Ichnological characteristics of brackish water deposits, 141–167 dalam Pemberton, G. S., ed., Applications of Ichnology to Petroleum Exploration, A Core Workshop, SEPM Core Workshop, 17.

Pettijohn, F. J. dan Potter, P. E. (1964). Atlas dan glossary of primary sedimentary structures, Springer - Verlag, Berlin, Göttingen, Heidelberg, New York, 3-9.

Pickerill, R. K. dan Narbonne, G. M. (1995). Composite and compound ichnotaxa: a case example from the Ordovician of Quebec, Eastern Canada, Ichnos, 4(1), 53–69.

Pollard, J. E., Goldring, R., dan Buck, S. G. (1993). Ichnofabrics containing Ophiomorpha: significance in shallow-water facies interpretation, Journal of the Geological Society, London, 150, 149–164.

Purdy, E. G. (1964). Sediments as substrates, 238–271 dalam Imbrie, J. dan Newell, N., ed., Approaches to paleoecology, John Wiley and Sons, Inc. 175

Raffaelli, D. G. dan Hawkins, S. J. (1996). Intertidal ecology, 1st ed, London; New York, NY: Chapman & Hall, 1-35.

Reineck, H. E. (1958). Wühlbau-Gefüge in Abhängigkeit von Sediment Umlagerungen, Senckenb Lethaea, 39, 1–23, 54–56.

Reise, K. (1979): Spatial configurations generated by motile benthic polychaetes, Helgoländer wiss. Meeresunters., 32(1), 55–72.

Rhoads, D. C. dan Morse, J. W. (1971). Evolutionary and ecologic significance of oxygen-deficient marine basins, Lethaia, 4, 413–428.

Rhoads, D. C. (1975). The paleoecological and environmental significance of trace fossils, 147–160 dalam Frey, R. W., ed., *The study of trace fossils: a synthesis of principles, problems and procedures in ichnology*, Springer - Verlag.

Rhoads, D. C. dan Young, D. K. (1970). The influence of deposit-feeding organisms on sediment stability and community trophic structure, Journal of Marine Research, 28, 150–178.

Rodríguez-Tovar, F., Alcalá, L., dan Cobos, A. (2016). Taenidium at the lower Barremian El Hoyo dinosaur tracksite (Teruel, Spain):

assessing palaeoenvironmental conditions for the invertebrate community, Cretaceous Research, 65, 48-58.
Sanders, H. L., Mangelsdorf, P. C., dan Hampson, G. R. (1965). Salinity and faunal distribution in the Pocasset River, Massachusetts, Limnology and Oceanography, 10, 216-229.
Samuel, L. dan Muchsin, S. (1975). Stratigraphy and sedimentation in the Kutai Basin, Kalimantan, Indonesian Petroleum Association 4th Annual Convention, 27-43, Jakarta: Indonesian Petroleum Association.
Savrda, C. E. dan Bottjer, D. J. (1989). Trace fossil model for reconstructing oxygenation histories of ancient marine bottom waters: application to Upper Cretaceous Niobrara Formation, Colorado, Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 74(1-2), 49-74.
Savrda, C. E., Krawinkel, H., McCarthy, F. M. G., McHugh, C. M. G., Olson, H. C., dan Mountain, G. (2001). Ichnofabrics of a Pleistocene slope succession, New Jersey margin: relations to climate and sea-level dynamics, Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 171(1-2,) 41-61
Savrda, C. E. (2007). Taphonomy of trace fossils, 92–109 dalam W. Miller III., ed., Trace fossils: concepts, problems, prospects, 92-109, Elsevier B.V.
Savrda, C. E. dan Bottjer, D. J. (1991). Oxygen-related biofacies in marine strata: an overview and update, 58(1), 201–219 dalam Tyson, R. dan Pearson, T., ed., *Modern and ancient continental shelf anoxia, Geological Society Special Publication,* 58, Geological Society of London.
Savrda, C. E. dan Bottjer, D. J. (1987). The exaerobic zone, a new oxygen deficient marine biofacies, Nature, 327(6117), 54–56.
Schlirf, M. dan Uchman, A. (2005). Revision of the ichnogenus Sabellarifex Richter, 1921 and its relationship to Skolithos Haldeman, 1840 and Polykladichnus Fürsich, 1981, Journal of Systematic Paleontology, 3(2), 115– 131.
Seike, K., Yanagishima, S., dan Nara, M. (2011). Large Macaronichnus in modern shoreface sediments: Identification of the producer, the mode of formation, and paleoenvironmental implications, Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 311(3-4), 224–229.

Seilacher, A. (1964). Biogenic sedimentary structures, 296–316 dalam J. Imbrie dan N. Newell., ed., *Approaches to paleoecology*, John Wiley and Sons, Inc.

Seilacher, A. (1967). Bathymetry of trace fossils, Marine Geology, 5(5-6), 413–428.

Septama, E., Putra, C. M. E., Suseno, P., Rizky Andy, A. M., Hasani, N., Putra, G., Iswanto, F., dan Novantyono, S. (2018). How did channel system survive the transgressive period? new sedimentological insight from outcrop, modern analog and subsurface data in the lower Kutai Basin, Indonesian Petroleum Association 42th Annual Convention & Exhibition, Jakarta: Indonesian Petroleum Association.

Simpson, S. (1956). On the trace-fossil Chondrites, Quarterly Journal of the Geological Society, 112(1-4), 475–499.

Smith, J. J. (2007). *Ichnofossils of the Paleogene Willwood Formation and the Paleocene-Eocene thermal maximum (PETM): response of an ancient soil ecosystem to transient global warming* (Disertasi), University of Kansas.

Sobeca Limited (2010). *Achieve more with Pareto‟s law*, Sobeca Limited.

Sullivan III, M. (2018). *Statistics, informed decisions using data, 5th ed*., Pearson Education Limited.

Supriatna, S., Sukardi., dan Rustandi, E. (1995). *Peta Geologi Lembar Samarinda.* Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi.

Taylor, A., Goldring, R., dan Gowland, S. (2003). Analysis and application of ichnofabrics, Earth Science Review, 60 (3-4), 227–259.

Tonkin, N. S. (2012). Deltas, 507–528 dalam D. Knaust dan R. G. Bromley., ed., *Trace fossils as indicators of sedimentary environments*, Developments in Sedimentology, 64, Elsevier B.V.

Tyson, R. dan Pearson, T. (1991). Modern and ancient continental shelf anoxia: an overview, 58(1), 1–24 dalam Tyson, R. dan Pearson, T., ed., Modern and ancient continental shelf anoxia, Geological Society Special Publication, 58, Geological Society of London. 177

Uchman, A. (1991). “Shallow water” trace fossils in Paleogene flysch of the southern part of the Magura Nappe, Polish Outer Carpathians, Annales Societatis Geologorum Poloniae, 61(1-2), 61-75.

Uchman, A. (2009). The Ophiomorpha rudis ichnosubfacies of the Nereites ichnofacies: characteristics and constraints, Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 276(1-4), 107-119

Uchman, A. dan Wetzel, A. (2012). Deep-sea fans, 64, 643–671 dalam D. Knaust dan R. G. Bromley., ed., *Trace fossils as indicators of sedimentary environments*, Developments in Sedimentology, 64, Elsevier B.V

Vallon, L. H., Rindsberg, A. K., dan Bromley, R. G. (2015). An updated classification of animal behaviour preserved in substrates, Geodinamica Acta, 28(1-2), 1-17.

Van de Weerd, A. dan Armin, R. A. (1992). Origin and evolution of the Tertiary hydrocarbon bearing basins in Kalimantan (Borneo), Indonesia, AAPG Bulletin, 76(11), 1778-1803.

Van Der Zwaan, G. J. dan Jorissen, F. J. (1991). Biofacial patterns in riverinduced shelf anoxia, 58(1), 65– 82 dalam R. V. Tyson dan T. H. Pearson., ed., *Modern and ancient continental shelf anoxia,* Geological Society Special Publication, 58, Geological Society of London.

Van Straaten, L. M. J. (1959). Minor structures of some Recent littoral and neritic sediments, Geol. Mijnbouw, 21, 197-216.

Virtasalo, J. J., Leipe, T., Moros, M., dan Kotilainen, A. T. (2011). Physicochemical and biological influences on sedimentary-fabric formation in a salinity and oxygen-restricted semi-enclosed sea: Gotland Deep, Baltic Sea, Sedimentology, 58(2), 352-375.

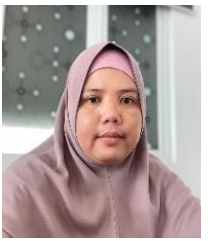
Virtasalo, J. J., Ryabchuk, D., Kotilainen, A. T., Zhamoida, V., Grigoriev, A., Sivkov, V., dan Dorokhova, E. (2014). Middle Holocene to present sedimentary environment in the easternmost Gulf of Finland (Baltic Sea) and the birth of the Neva River, Marine Geology, 350, 84-96.

Wetzel, A. dan Uchman, A. (2012). Hemipelagic and pelagic basin plains, 673– 701 dalam D. Knaust dan R. G. Bromley., ed., Trace fossil as indicators of sedimentary environments, Developments in Sedimentology, 64, 673-701, Elsevier B.V.

White, P. S. dan Pickett, S. T. (1985). Natural disturbance and patch dynamics: an introduction, 3–13 dalam S. T. Pickett dan P. S. White., ed., The ecology of natural disturbance and patch dynamics, Orlando, AP Academic Press

Profil Penulis

Ery Arifullah adalah ahli geologi dengan spesialisasi *ichnology*, *sedimentology* dan *paleoecology*. Hasratnya dengan spesialisasi tersebut tumbuh sejak kuliah di jurusan Teknik Geologi Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Yogyakarta tahun 1993. Hasratnya semakin tersalurkan sejak menempuh pendidikan S2 dan S3 di Program Studi Teknik Geologi Institut Teknologi Bandung. ia aktif dalam dunia akademik dengan menjadi dosen geologi di Universitas Muhammadiyah Kalimantan Timur, Universitas Mulawarman serta dosen undangan di Universitas Indonesia, Universitas Pertamina dan Universitas Teknologi Petronas di Malaysia. Di luar itu semua, ia juga sebagai aparatur sipil negara di Pemerintah Provinsi Kalimantan Timur. Sampai buku ini diterbitkan, ia telah menghasilkan setidaknya 19 karya tulis ilmiah geologi dalam bentuk jurnal dan prosiding dan telah memberikan sejumlah presentasi oral dan poster di seminar dan konvensi geologi berskala nasional maupun internasional. Sejak dua tahun terakhir, ia aktif menjadi *reviewer* untuk sejumlah jurnal ilmiah geologi baik di dalam maupun di luar negeri.



Syamsidar Sutan merupakan lulusan S1 Teknik Geologi IST "Akprind" Yogyakarta, 2006 dan S2 Teknik Pertambangan Universitas Pembangunan Nasional Veteran Yogyakarta, 2014. Saat ini bekerja sebagai dosen tetap Teknik Geologi di Universitas Muhammadiyah Kalimantan Timur (UMKT). Mengampu mata kuliah Geologi Dasar, Sedimentologi dan Geologi Teknik. Di Fakultas Sains dan Teknologi menjabat sebagai Sekretaris Program Studi Teknik Geologi periode 2021 hingga 2025. Sangat tertantang sebagai asisten untuk membantu menulis buku tentang iknologi bagian dari pengembangan ilmu geologi untuk buku ajar mahasiswa. Selama menjadi dosen telah mengerjakan *project* dibidang geologi dan pertambangan salah satunya yaitu, membantu Dinas Perumahan dan Kawasan Permukiman (Perkim) 2022 dan Perusahaan Daerah Air Minum (PDAM) 2022 dalam menyelesaikan permasalahan longsor wilayah pemakaman dan penanggulangan kekeringan air. Aktif di organisasi Ikatan Ahli Geologi Indonesia IAGI sebagai Pengurus Pusat di bidang Pendidikan dan kursus. Beberapa jurnal telah diterbitkan sebagai bagian dari tridarma perguruan tinggi persembahan untuk mahasiswa.