

## TINJAUAN PUSTAKA

### **Terminologi, Komposisi Takson dan Klasifikasi Meiofauna Interstisial**

Istilah interstisial secara umum adalah ruang di antara partikel sedimen dan juga digunakan sebagai sinonim dari organisme yang hidup di dalamnya. Meiofauna merupakan istilah yang sering dipakai sebagai padanan kata interstisial atau *psammon*. Meiofauna adalah organisme yang hidup secara interstisial. Sinonimnya adalah meiobentos. Meiofauna dapat pula diartikan sebagai kelompok metazoa kecil yang berada di antara mikrofauna dan makrofauna (Higgins & Thiel 1988; Giere 1993; Coull 1999; Funch *et al.* 2002; Nybakken & Bertness 2005; Bartolomaeus & Schmidt-Rhaesa 2006). Meiofauna adalah kelompok hewan berukuran antara 63–1000  $\mu\text{m}$  atau hewan-hewan multiseluler yang lolos pada saringan 0.063–1 mm (Linhart *et al.* 2002) dan merupakan organisme yang melimpah pada komunitas dasar yang bersubstrat lunak atau pada sedimen laut mulai dari zona litoral atas sampai pada zona abisal (Funch *et al.* 2002). Istilah endobentik digunakan bagi meiofauna yang berpindah dalam sedimen. Meiofauna yang hidup dan berpindah dalam ruang interstisial disebut mesobentik, sedangkan meiofauna yang hidup pada batas antara sedimen dan air (*sediment-water interface*) disebut epibentik (Nybakken & Bertness 2005).

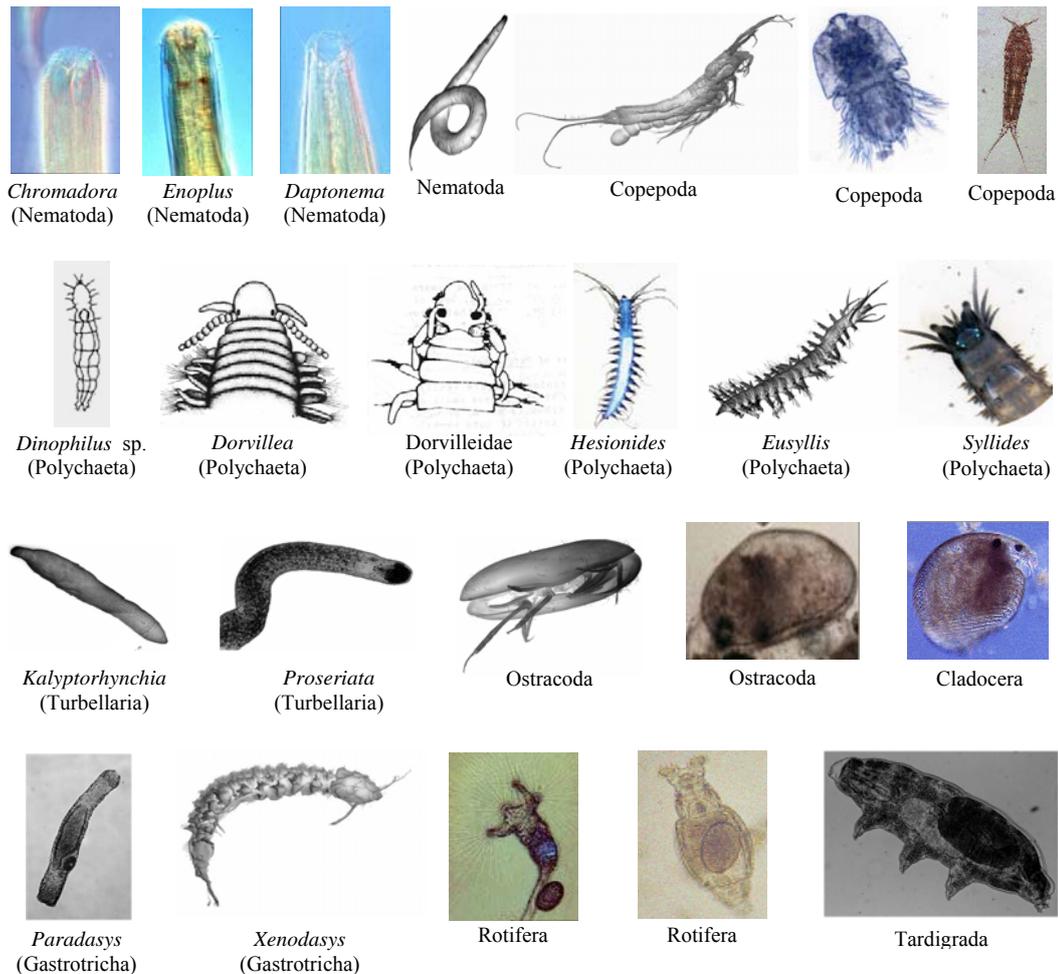
Ada sekitar 38 taksa meiofauna yang hidup di sedimen perairan payau dan laut (Higgins & Thiel 1988). Berdasarkan pada karakteristik hidupnya, meiofauna dapat dibagi ke dalam dua kelompok, yaitu (1) meiofauna yang bersifat permanen; dan (2) bersifat temporer. Meiofauna permanen adalah meiofauna sejati yang berukuran kecil sampai dewasa menghabiskan seluruh masa hidupnya di dalam ruangan antarbutiran sedimen atau sepanjang siklus hidupnya bersifat meiobentos, contohnya Nematoda, Gastrotricha, Tardigrada, Copepoda, Mystacocarida, Ciliophora, Archiannelida, Ostracoda, Rotifera, Kinorhyncha, dan Halacarida, beberapa kelompok Turbellaria, Oligochaeta, beberapa Polychaeta. Meiofauna temporer atau sementara merupakan larva makrofauna dan juvenil organisme yang baru saja menetap, contohnya Bryozoa, Hydrozoa, Gastropoda, Nemertina, Brachiopoda, Amphipoda, Aplacophora, Holothuroidea, dan Tunicata (Coull 1988; Kennish 1990; Aller & Aller 1992; Hentschel & Jumars 1994; Pati *et al.*

1999; Funch *et al.* 2002; Arroyo *et al.* 2004; Nybakken & Bertness 2005; Bartolomaeus & Schmidt-Rhaesa 2006).

Berdasarkan pada tipe habitatnya, meiofauna dapat diklasifikasikan ke dalam tiga kelompok, yaitu (1) meiofauna yang hidup pada substrat kasar (pasir), seperti Copepoda, Ostracoda, Gastrotricha, Turbellaria, Oligochaeta, Tardigrada dan Archiannelida; (2) meiofauna yang hidup pada substrat lunak (lumpur), seperti Nematoda, Copepoda, Foraminifera, Ostracoda dan Annelida; dan (3) meiofauna yang hidup di lapisan sedimen yang miskin oksigen dan/atau tanpa oksigen, seperti Nematoda, Turbellaria, Ciliata, Rotifera, Gastrotricha, Gnathostomulida dan Zooflagellata (Mann 2000).

Berdasarkan morfologi dan cara makannya, meiofauna dapat dikelompokkan menjadi empat, yaitu (1) meiofauna pemakan deposit yang selektif (*selective deposit feeders*) dengan bentuk morfologi mulut yang sempit; (2) meiofauna pemakan deposit yang tidak selektif (*non-selective deposit feeders*) dengan bentuk morfologi mulut yang lebar; (3) meiofauna pemakan alga (*herbivorous feeders*); dan (4) meiofauna omnivora/predator (Heip *et al.* 1985; Gwyther & Fairweather 2002). Gwyther dan Fairweather (2002) juga mengelompokkan meiofauna ke dalam *deposit feeders*, *epigrowth feeders*, *omnivores/predators*. Gwyther (2003) mengelompokkan meiofauna ke dalam *bacteriovores*, *non-selective deposit feeders*, *epigrowth feeders*, *omnivores/predators*.

Kehidupan meiofauna sangat dipengaruhi oleh karakteristik sedimen. Berdasarkan pada hal ini, maka meiofauna dapat dibedakan menjadi dua kelompok, yaitu: (1) meiofauna penggali liang di dalam substrat lumpur, dan (2) meiofauna penghuni ruang interstisial yang hidupnya menetap di lapisan sedimen. Meiofauna yang termasuk kelompok penggali liang menembus sedimen dengan memindahkan partikel dalam pergerakannya dan bentuk tubuhnya cenderung lurus memanjang (*streamline*) sehingga memudahkan penggalian. Umumnya, komunitas meiofauna interstisial ini cenderung lebih beragam dibandingkan dengan meiofauna penggali liang (Funch *et al.* 2002). Beberapa contoh meiofauna interstisial disajikan pada Gambar 2. Sehubungan dengan kehidupannya, sejumlah topik penelitian meiofauna interstisial telah dilaksanakan oleh beberapa peneliti (Tabel 1).



Gambar 2. Beberapa contoh meiofauna interstitial (Soltwedel & Prena 2006).

### Habitat Meiofauna Interstitial

Jenis organisme yang membentuk komunitas meiofauna sangat banyak dari filum invertebrata, sebagian diwakili oleh sejumlah kecil genus saja, sedangkan yang lain jumlahnya melimpah baik dalam jumlah individu maupun genus. Filum invertebrata yang biasanya bertubuh kecil (meiofauna) sejak permulaan beradaptasi untuk dapat hidup di ruangan yang kecil antara butiran pasir dan lumpur, dan diwakili oleh banyak individu dan genus. Cacing dari filum Annelida yang bertubuh memanjang sesuai sekali dalam lingkungan yang demikian, sehingga terdapat dalam jumlah yang melimpah (Barnes & Hughes 2004; Nybakken & Bertness 2005). Pada komunitas alami, genus yang berukuran kecil (<1mm) memiliki ukuran populasi yang besar, laju penyebaran tinggi dan laju pemusnahan rendah, sifat habitat tersebut diperlukan untuk menjelaskan kehadiran organisme dan faktor historisnya (Fenchel & Finlay 2004).

Tabel 1. Sejumlah topik penelitian meiofauna yang telah dilaksanakan oleh beberapa peneliti.

No.	Topik	Referensi
1.	Biomassa, produksi sekunder dan transfer energi meiofauna.	Herman & Heip (1985) Danovaro <i>et al</i> (2002) Tita <i>et al</i> (2002) Stead <i>et al</i> (2005)
2.	Struktur komunitas meiofauna.	Susetiono (1994, 1995)
3.	Afinitas spesies endopsammon di zona intertidal.	Swasta (2006)
4.	Struktur dan hubungan trofik meiofauna dengan epifauna dan mikroalga.	Steyaert & Schrijvers (1993) Martin <i>et al</i> (2000) Danovaro & Gambi (2002) Pinckney <i>et al</i> (2003)
5.	Rekolonisasi komunitas meiofauna.	Guerrini <i>et al</i> (1998) Gwyther & Fairweather (2002) Wetzel <i>et al</i> (2002)
6.	Dampak pemangsaan makrofauna terhadap meiofauna.	Silence <i>et al</i> (1993) Schratzberger & Warwick (1999)
7.	Pengaruh makanan dan akumulasi detritus terhadap populasi meiofauna.	Marsh & Tenore (1990) Alongi & Christoffersen (1992)
8.	Pengaruh busukan daun mangrove terhadap meiofauna.	Gee & Somerfield (1997) Gwyther (2000, 2003)
9.	Dampak gangguan biologi (bioturbasi) terhadap meiofauna.	Thrush <i>et al</i> (1995) Warwick <i>et al</i> (1990a) Lindsay & Woodin (1996) Austen <i>et al</i> (1998)
10.	Hubungan fauna meiobentik dengan pengkayaan TOM.	Susetiono (1996)
11.	Pengaruh gangguan fisika terhadap meiofauna.	Hall (1994) Schratzberger & Warwick (1998b) Danovaro <i>et al</i> (2000a) Mistri <i>et al</i> (2002) Dernie <i>et al</i> (2003a, 2003b) Skilleter <i>et al</i> (2006)
12.	Dampak biodeposisi ikan dan remis yang dibudidaya terhadap meiofauna.	(Mazzola <i>et al</i> (1999) Mirto <i>et al</i> (2000, 2002b) Kovac <i>et al</i> (2001) Rosa <i>et al</i> (2001) Vezzulli <i>et al</i> (2003)
13.	Pengaruh pencemaran dan dampak aktivitas manusia terhadap meiofauna.	Warwick <i>et al</i> (1990b) Bridges <i>et al</i> (1994) Somerfield <i>et al</i> (1995) Carman & Todaro (1996) Carman <i>et al</i> (1997) Montagna <i>et al</i> (2002) Vanaverbeke <i>et al</i> (2003) Dalto <i>et al</i> (2006)
14.	Meiofauna sebagai bioindikator pencemaran dan kondisi lingkungan.	Herman & Heip (1988) Beier & Traunspurger (2001) Lee <i>et al</i> (2000)

Kebanyakan meiofauna hidup pada batas antara sedimen-air (*sediment-water interface*), dan yang lainnya di dalam sedimen membenamkan diri atau menempatkan dirinya terkubur di ruang-ruang interstisial di antara butiran-butiran sedimen melalui penekanan sebagian sedimen untuk membuat lubang atau ruang dalam proses perpindahannya (Heip *et al.* 1985; Nehring *et al.* 1990; Nybakken & Bertness 2005). Aktivitas ini dapat membentuk suatu lingkungan interstisial yang bersifat khas (Aller & Aller 1992; Mirto *et al.* 2000; Nybakken & Bertness 2005). Kekhasan sifat lingkungan interstisial ini ditentukan oleh beberapa variabel, yaitu sirkulasi air, ukuran butir sedimen, kandungan mineral dan oksigen dalam sedimen, suhu dan salinitas sedimen serta kekuatan ombak (Nybakken & Bertness 2005), pH sedimen, senyawa sulfida ( $H_2S$ ) dan bahan organik yang terjebak di dalam sedimen (Giere 1993; Mazzola *et al.* 1999; Mirto *et al.* 2000).

Di dalam sedimen lumpur biasanya lebih dari 90% meiofauna, terutama Nematoda, hidup pada kedalaman 5 cm di bawah permukaan sedimen (Heip *et al.* 1985; Riemann 1988; Funch *et al.* 2002). Meiofauna ini dapat hidup pada kedalaman beberapa desimeter di pantai berpasir dan pada hamparan pasir yang halus, kelimpahan tertinggi biasanya pada kedalaman  $\pm 10-20$  cm. Kebanyakan meiofauna ini tidak memerlukan oksigen dalam jumlah banyak dan kemungkinan secara fakultatif anaerob. Beberapa taksa meiofauna dapat hidup menetap pada permukaan sedimen yang mengandung sulfat, dan satu di antaranya merupakan organisme yang hidup pada kondisi tidak beroksigen, yaitu Nematoda. Secara umum, Nematoda mendominasi jumlah dari total meiofauna, kemudian biasanya diikuti oleh Copepoda dan Gastrotricha (Coull 1988; Higgins & Thiel 1988).

Terkait dengan habitatnya, meiofauna dapat dijumpai di berbagai tipe habitat baik habitat yang bervegetasi maupun yang tidak bervegetasi. Habitat bervegetasi (seperti alga, lamun dan mangrove) dan habitat yang tidak bervegetasi (seperti hamparan pasir pantai yang luas dan pantai berbatu) dapat menciptakan habitat tersendiri bagi meiofauna dan memiliki karakteristik yang khas yang berbeda satu dengan lainnya (Higgins & Thiel 1988; Giere 1993).

### **Habitat Bervegetasi Lamun**

Karakteristik yang khas dari habitat bervegetasi lamun adalah adanya meiofauna yang cukup melimpah dan beragam. Daun, rhizoma dan akar lamun

dapat menyediakan sejumlah habitat dan tempat perlindungan yang penting bagi meiofauna. Daun lamun yang memanjang seperti pita dan terjuntai ke bawah dapat berperan sebagai jalan bagi meiofauna dalam upayanya bermigrasi dari sedimen ke daun lamun (Giere 1993; Hall & Bell 1993). Habitat lamun ini mengandung sejumlah besar detritus yang berasal dari tumbuhan lamun dan mengandung fauna yang khas (Heip *et al.* 1985). Biasanya daun lamun banyak detritus yang terakumulasi dan merupakan tempat yang cocok bagi alga epifit dan meiofauna (Hall & Bell 1993). Hamparan lamun dapat dihuni oleh meiofauna yang kelimpahannya mencapai dua kali dibandingkan dengan kelimpahan meiofauna pada sedimen di dekatnya. Kelimpahan meiofauna di hamparan lamun dapat mencapai  $10^6$  individu/m<sup>2</sup> yang setara dengan 10% dari biomassa makrofauna yang hidup di habitat ini (Giere 1993).

Di habitat sedimen yang ditumbuhi oleh vegetasi lamun dengan tingkat deposit sedimen lumpur dan detritus yang tinggi, meiofauna Nematoda merupakan kelompok khas yang dominan, sedangkan pada perairan yang makrofitanya lebih bersih pada wilayah yang salinitasnya tinggi cenderung didominasi oleh taksa Copepoda dan Ostracoda (Arunachalam & Nair 1988). Sementara itu, keberadaan meiofauna di permukaan daun lamun lebih disebabkan oleh adanya pengadukan sedimen oleh arus. Meiofauna bersama dengan butiran sedimen terangkat dan akhirnya menempel pada daun lamun. Menurut Gooday (1988), sering meiofauna Foraminifera dijumpai di permukaan tumbuhan laut misalnya lamun dan makroalga. Meiofauna yang hidup di padang lamun dikelompokkan ke dalam dua kelompok hewan, yaitu meiofauna bersifat *infauna* (seperti Copepoda harpacticoid, Ostracoda, Nematoda, Polychaeta), dan meiofauna yang bersifat *mobile epifauna* (seperti Copepoda, Ostracoda, Nematoda, Rotifera). Di antara kelompok meiofauna, Copepoda umumnya melimpah di dalam ekosistem lamun dan merupakan organisme yang umum menempati permukaan daun (Hall & Bell 1993; De Troch *et al.* 2003).

Dinamika komunitas meiofauna di habitat yang bervegetasi lamun ini sangat bergantung pada musim dan siklus pertumbuhan serta pembusukan serasah dari vegetasi ini. Hal ini disebabkan oleh adanya keterkaitan antara struktur tubuh meiofauna, khususnya organ mulut dan alat pencernaan meiofauna, dengan jenis

vegetasi yang dimakan. Ketertarikan meiofauna terhadap jenis vegetasi tertentu disebabkan oleh adanya cairan atraktan yang dikeluarkan oleh lamun yang dapat menarik kedatangan meiofauna (Giere 1993).

### **Habitat Bervegetasi Mangrove**

Habitat yang bervegetasi mangrove juga dapat menciptakan karakteristik tersendiri bagi kehidupan meiofauna. Vegetasi mangrove merupakan tumbuhan yang sangat adaptif di daerah pasang surut. Terkait dengan kehidupan meiofauna, vegetasi mangrove ini memiliki dua sifat yang saling bertentangan (kontradiktif) bagi kehidupan meiofauna. Di satu sisi, sistem perakaran mangrove dan naungan kanopinya memberikan habitat dan tempat berlindung bagi meiofauna (Gwyther 2000). Hal ini tentunya bersifat positif bagi meiofauna. Sementara di sisi lain, senyawa tannin yang terkandung dalam serasah mangrove (busukan daun, busukan kulit batang dan akar) bersifat negatif menekan populasi dan kelimpahan meiofauna (Tietjen & Alongi 1990; Gee & Somerfield 1997; Gwyther 2000).

Terkait dengan kandungan tannin pada vegetasi mangrove, Lemmens dan Soetjipto (1992) melaporkan bahwa beberapa vegetasi mangrove yang mengandung tannin antara lain adalah *Bruguiera gymnorhiza* (20–43%), *Ceriops tagal* (20–40%), *Rhizophora mucronata* (8–40%), *Ceriops decandra* (25–37%), *Xylocarpus granatum* (20–34%), dan *Sonneratia caseolaris* (9–15%).

Keberadaan senyawa tannin dalam lapisan sedimen yang mengandung detritus mangrove, kadarnya bertambah tinggi sejalan dengan bertambahnya kedalaman sedimen (Boto *et al.* 1989, diacu dalam Dittmann 2001). Dalam kaitannya dengan kehidupan meiofauna di dalam lapisan sedimen, senyawa tannin mangrove berpengaruh negatif bagi kelimpahan meiofauna di sekitar akar mangrove (Nicholas *et al.* 1998, diacu dalam Gwyther 2000). Hal ini berarti bahwa penurunan jumlah meiofauna berhubungan dengan tannin mangrove yang mempunyai pengaruh negatif yang signifikan terhadap kelimpahan meiofauna (Tietjen & Alongi 1990; Coull 1999; Gwyther 2000) dan nilai nutrisi detritus mangrove yang sangat rendah (Alongi & Christoffersen 1992; Gwyther 2000).

Terkait dengan sifat negatif dari senyawa tannin mangrove ini, maka hasil percobaan Alongi (1989) diacu dalam Gee dan Somerfield (1997) di laboratorium

menunjukkan bahwa kepadatan populasi meiofauna dari kelompok Nematoda lebih tinggi terdapat pada serasah mangrove *Avicennia marina* (kadar tannin rendah) dibandingkan dengan serasah *Rhizophora stylosa* (kadar tannin tinggi). Ini berarti bahwa sedimen yang mempunyai kadar tannin rendah lebih cepat dikolonisasi oleh meiofauna kelompok Nematoda ini. Namun, hasil penelitian Dittmann (1999) di hamparan pantai yang bervegetasi mangrove *Avicennia* menemukan bahwa di lokasi ini kepadatan meiofauna sangat rendah.

### **Habitat Tanpa Vegetasi (*Bare Area*)**

Habitat yang tidak bervegetasi biasanya terdapat di daerah intertidal yang merupakan wilayah pantai terbuka yang terletak antara titik pasang tertinggi dan titik surut terendah, atau disebut juga dengan zona pasang surut. Zona ini merupakan zona yang paling dinamis karena di zona ini terjadi fenomena pasang surut air laut dan adanya energi gelombang yang besar (Nybakken & Bertness 2005). Dengan adanya fenomena ini, habitat di daerah ini memiliki beberapa sifat yang khas, yaitu: 1) sedimen mengalami pergantian kondisi terekspos (terdedah) dan terendam secara periodik sejalan dengan siklus pasang surut yang terjadi; 2) sedimen mengalami dinamika yang cukup hebat sebagai konsekuensi dari turbulensi air laut yang dapat meresuspensi, mendeposisi dan mengagitasi sedimen; dan 3) sedimen mengalami tekanan faktor-faktor daratan sebagai konsekuensi dari posisinya yang berbatasan langsung dengan daerah teresterial (De Deckere *et al.* 2001). Karakteristik habitat yang khas ini dapat mempengaruhi kehidupan organisme benthik pada umumnya, dan khususnya sangat berpengaruh terhadap keberadaan meiofauna di daerah ini (Mann & Lazier 1991; Hall 1994; McLachlan & Turner 1994; Valiela 1995; Mann 2000; Rodríguez *et al.* 2001; Rodríguez 2004; Nybakken & Bertness 2005; Skilleter 2006).

Sifat habitat yang khas ini dapat menciptakan karakteristik meiofauna yang hidup di habitat tersebut. Meiofauna yang hidup di habitat pantai terbuka ini juga akan mengalami kondisi terekspos (terdedah) dan terendam. Pada kondisi terekspos (terdedah) di saat panas sangat terik, suhu sedimen meningkat dan pengaliran air ke dalam ruang-ruang interstisial menjadi terhenti. Hal ini menyebabkan meiofauna terancam kekeringan sehingga dapat menekan

kehidupan meiofauna yang sifat mobilitasnya lamban. Dalam menghadapi kondisi yang demikian, meiofauna dapat beradaptasi yaitu dengan mengembangkan kemampuan migrasi vertikal untuk mencegah kekeringan tubuhnya (Coull 1988; Higgins & Thiel 1988; Giere 1993; Rodríguez *et al.* 2001; Rodríguez 2004).

Dinamika sedimen yang diakibatkan oleh turbulensi air laut yang kuat, kemungkinannya akan menyebabkan: 1) struktur dan kondisi habitat meiofauna di daerah ini menjadi tidak stabil, sehingga berakibat fatal bagi larva-larva meiofauna yang masih lemah (Snelgrove & Butman 1994; Arroyo *et al.* 2004); 2) meiofauna yang ada di permukaan sedimen akan terangkat dan tersuspensi ke kolom air sehingga mudah dimangsa oleh predator yang bersifat pemakan suspensi (Boström & Bonsdorff 2000; Aarnio 2000; Rodríguez 2004); 3) meiofauna akan disebarkan oleh arus ke tempat yang baru dan membentuk kolonisasi pada substrat yang lain (Kurdziel & Bell 1992; De Troch *et al.* 2003); dan 4) meiofauna dapat bertahan hidup di habitatnya dengan mengembangkan mekanisme pelekatan tubuh pada sedimen dan mekanisme perlindungan tubuh untuk mencegah terhempasnya dan cederanya tubuh meiofauna oleh hampasan air laut yang kuat (Giere 1993; Nybakken & Bertness 2005).

Adanya tekanan faktor-faktor daratan sebagai konsekuensi dari posisinya yang berbatasan langsung dengan daerah teresterial, dapat bersifat positif (menguntungkan) dan bersifat negatif (merugikan) bagi kehidupan meiofauna di daerah ini. Bersifat positif apabila masukan unsur-unsur (seperti: busukan sampah organik, organisme yang mati) dari daratan dapat menjadi sumber makanan bagi meiofauna, sedangkan bersifat negatif apabila masukan unsur-unsur kimia (polutan) dari daratan bersifat toksik dan mengancam kehidupan meiofauna (Coull & Chandler 1992; Bridges *et al.* 1994; Carman *et al.* 1997; Lee *et al.* 2000; Mann 2000; Dinet *et al.* 2006; Soltwedel & Prena 2006).

### **Zonasi dan Distribusi Meiofauna Interstisial**

Distribusi meiofauna interstisial dipengaruhi oleh faktor fisika, kimia dan biologi (Guerrini *et al.* 1998; Arroyo *et al.* 2004; Rodríguez 2004). Faktor-faktor ini bergantung pada total area permukaan partikel dan ukuran pori sedimen, dimana hal ini penting untuk kolonisasi meiofauna. Pola kolonisasi meiofauna

dipengaruhi oleh kondisi habitat (Guerrini *et al.* 1998; Boström & Bonsdorff 2000; De Troch *et al.* 2001a, 2001b; Prathep *et al.* 2003; Arroyo *et al.* 2004).

Di perairan laut dangkal, meiofauna menunjukkan pola zonasi dan distribusi yang khas baik secara vertikal maupun horizontal (Coull 1988; Higgins & Thiel 1988; Gambi *et al.* 1998; Arroyo *et al.* 2004). Zonasi dan distribusi vertikal meiofauna ini terutama dikontrol oleh tingkat diskontinuitas potensial redoks (RPD) sedimen, yaitu batas antara sedimen aerob dan sedimen anaerob (Silence *et al.* 1993; Marinelli dan Woodin 2002; Arroyo *et al.* 2004). Sementara itu, zonasi dan distribusi horizontal meiofauna lebih ditentukan oleh gradien salinitas yang terjadi pada meiofauna yang hidup di dasar estuaria, dan juga ditentukan oleh gradien kedalaman air yang terjadi pada meiofauna yang hidup di antara perairan paparan benua dan laut dalam (Coull 1988; Higgins & Thiel 1988).

Komposisi dan kepadatan meiofauna bervariasi dalam sedimen baik secara vertikal maupun horizontal. Faktor yang membentuk zonasi ini adalah perbedaan ukuran butiran dan faktor fisika-kimia, seperti suhu, salinitas, kandungan oksigen, arus dan gelombang. Pola khas komunitas meiofauna berhubungan dengan parameter tersebut (Gourbault & Mornant 1990; Silence *et al.* 1993; Coull 1999; De Troch 2001; Funch *et al.* 2002; De Troch *et al.* 2003; Nybakken & Bertness 2005). Meiofauna dalam komunitas bentik dapat melimpah karena adanya sumbangan detritus dari serasah tumbuhan, seperti serasah lamun (De Troch *et al.* 2001a; Danovaro & Fraschetti 2002; Jędrzejczak 2002) dan serasah mangrove (Hodda & Nicholas 1985; Tietjen & Alongi 1990; Alongi & Christoffersen 1992; Faust & Gullledge 1996; Gee & Somerfield 1997; Zhou 2001; Gwyther 2000).

Sebagian besar genus meiofauna cenderung untuk menempati lapisan sedimen atas atau pada lapisan di bawah permukaan yang beroksigen, dan jumlahnya menurun dengan meningkatnya kedalaman dan kompaksi sedimen serta berkurangnya suplai oksigen (Gambi *et al.* 1998; Rodríguez 2004). Sedimen yang terkompaksi tinggi (sedimen padat) mempunyai kandungan sedimen halus (fraksi lumpur) dan bahan organik yang tinggi, potensial redoks yang rendah, dan meiofauna interstisial yang berasosiasi sebagian besar terdiri atas genus yang bersifat oportunistik (Palacín *et al.* 1991; Martin *et al.* 1993, 2000; Mistri *et al.* 2002). Beberapa meiofauna seperti Nematoda dan Polychaeta, mampu hidup

dengan meningkatnya kedalaman sedimen, karena meiofauna ini mempunyai toleransi yang besar terhadap konsentrasi oksigen yang rendah. Sebaliknya, meiofauna akan terdistribusi secara seragam pada kedalaman sedimen 15 cm, hal ini berhubungan dengan rendahnya kandungan sedimen halus, kandungan bahan organik yang rendah, oksigen yang tinggi dan kompaksi (kepadatan) sedimen yang rendah (Palacín *et al.* 1991; Martin *et al.* 1993, 2000).

### **Adaptasi Meiofauna Interstisial**

Meiofauna interstisial dapat memberikan respon terhadap lingkungan dalam beberapa cara, yaitu: 1) melalui perkembangan hidupnya; 2) respon fisiologi (ekofisiologi dan ekotoksikologi); 3) pergerakan; 4) tingkah laku yang lain (seperti tingkah laku dengan isyarat); dan 5) kemahiran dalam mendapatkan makanan (Bentley & Pacey 1992). Interaksi ini sebagai konsekuensi dari meiofauna interstisial untuk mempertahankan hidupnya. Meiofauna interstisial pemakan deposit (*deposit feeder*) akan dipengaruhi oleh ukuran partikel dalam lingkungan, sedangkan meiofauna interstisial pemakan suspensi (*suspension feeder*) dapat dipengaruhi oleh proses hidrodinamika lokal dan proses-proses fisika lainnya dalam kolom air (Rodríguez *et al.* 2001). Untuk dapat mempertahankan hidupnya terhadap kondisi lingkungan, maka meiofauna interstisial memiliki beberapa adaptasi, yaitu: 1) adaptasi morfologi; 2) adaptasi fisiologi; 3) adaptasi perilaku (*behavior*); dan 4) adaptasi ekologi.

#### **Adaptasi Morfologi**

Masing-masing genus meiofauna memiliki kisaran toleransi tertentu terhadap kondisi ekologi sejalan dengan seberapa jauh keberhasilannya mengembangkan mekanisme adaptasi. Hal tersebut memungkinkan faktor-faktor ekologi mengatur komposisi dan ukuran komunitas meiofauna. Dalam menghadapi perubahan kondisi lingkungan di habitatnya, meiofauna telah mengembangkan berbagai bentuk adaptasi morfologi. Adaptasi morfologi yang dimaksud adalah adaptasi ukuran tubuh, adaptasi bentuk tubuh, penyederhanaan organ dan memperkuat dinding tubuh serta mengembangkan alat pelekak

(Riemann 1988; Webber & Thurman 1991; Giere 1993; Chen *et al.* 2004; Nybakken & Bertness 2005).

Semua organisme meiofauna berukuran sangat kecil. Adaptasi yang sangat nyata terhadap lingkungan dinamis adalah ukuran dan bentuk tubuh. Ukuran tubuh meiofauna interstisial berkisar 0.63–1 mm (63–1.000  $\mu\text{m}$ ). Kebanyakan organisme meiofauna mempunyai bentuk tubuh memanjang atau seperti plat, dan ada juga berbentuk silinder. Umumnya meiofauna melakukan pelangsingan tubuh dan meningkatkan fleksibilitas tubuh. Bentuk tubuh seperti flat, organisme meiofauna dapat melekatkan dirinya pada ruang yang sempit pada butiran sedimen. Adaptasi ini agar meiofauna dapat tetap tinggal dalam ruang sedimen yang sempit, sehingga terbebas dari pengaruh selama proses suspensi kembali (resuspensi) ke atas. Dalam lingkungan sedimen yang gelap, meiofauna melakukan adaptasi dengan mereduksi mata dan pigmen tubuhnya (Webber & Thurman 1991; Nybakken & Bertness 2005; Castro & Huber 2007).

Adaptasi yang dikembangkan meiofauna dalam perkembangbiakan adalah menghasilkan sedikit gamet tetapi mempunyai ukuran yang besar. Pada kondisi tertentu, meiofauna melakukan pembiakan secara hermafrodit dan partenogenesis (Higgins & Thiel 1988; Chen *et al.* 2004; Nybakken & Bertness 2005).

### **Adaptasi Fisiologi**

Meiofauna mampu mengembangkan adaptasi fisiologi terhadap kondisi lingkungan benthik untuk kelangsungan hidupnya di bawah kondisi yang kurang oksigen. Adaptasi fisiologi genus meiofauna terhadap kandungan oksigen yang rendah adalah dengan cara: 1) mengurangi (mereduksi) aktivitas dan metabolisme, 2) mengembangkan pigmen darah dengan mengikat oksigen yang sangat tinggi, dan 3) respirasi anaerob dengan menghasilkan dan mengeluarkan hasil akhir pernafasan. Kondisi lingkungan benthik yang kurang oksigen ini berkaitan dengan keberadaan senyawa sulfida ( $\text{H}_2\text{S}$ ) dalam sedimen (Wetzel *et al.* 2002).

Terkait dengan adaptasi meiofauna pada sedimen yang mengandung  $\text{H}_2\text{S}$  dengan kondisi oksigen yang rendah, maka meiofauna mempunyai hubungan simbiotik yang berkembang sehingga dapat beradaptasi terhadap kondisi tersebut. Meiofauna yang toleran terhadap  $\text{H}_2\text{S}$  dan mampu hidup pada kadar oksigen yang

rendah atau miskin oksigen disebut dengan *thiobios*. Beberapa meiofauna yang mampu hidup pada kondisi yang demikian adalah Nematoda, Ciliata, Platyhelminthes, Gnathostomulida, Gastrotricha, Oligochaeta dan Aschelminthes (Heip *et al.* 1985; Giere 1993; Coull 1999).

Meiofauna interstisial permanen memiliki ukuran tubuh yang sangat kecil, sehingga gamet yang dihasilkannya pada suatu waktu terbatas jumlahnya. Produksi telur yang dihasilkan meiofauna hampir selalu kurang dari 100 per individu dan biasanya antara satu dan sepuluh telur (Nybakken & Bertness 2005). Karena jumlah telur yang dihasilkan sangat sedikit, maka suatu genus tak boleh kehilangan banyak telur agar dapat menghasilkan generasi penerusnya. Untuk dapat menjamin kelangsungan hidup generasinya, maka meiofauna telah mempunyai berbagai strategi adaptasi, yaitu: 1) adaptasi yang menjamin terjadinya fertilisasi dengan cara: (i) berkopulasi, dalam hal ini terjadi pemindahan sperma langsung kepada meiofauna betina (misalnya pada Copepoda harpacticoid), (ii) membungkus semua sperma dalam satu unit *spermatophora* dan melekatkannya pada meiofauna betina, dengan demikian tersedia sperma untuk membuahi telur yang dikeluarkan (misalnya pada Polychaeta), dan (iii) genus meiofauna yang bersifat hermafrodit memiliki sistem jantan dan betina, sehingga dapat menjamin fertilisasi (misalnya Gastrotricha dan Polychaeta); dan 2) adaptasi pemeliharaan telur dan perlindungan anak-anaknya.

Selain itu, strategi adaptasi yang dikembangkan oleh meiofauna adalah melengkapi perekat pada telur yang dikeluarkannya sehingga dengan cepat menempel pada substrat atau terbungkus dalam kokon yang mudah melekat. Ketika telur menetas mengeluarkan larva, maka larva tersebut tetap berada pada ruangan antarbutiran sedimen karena larva yang dihasilkannya tidak bersifat planktonik (Nybakken & Bertness 2005).

### **Adaptasi Perilaku (*Behavior*)**

Perilaku migrasi juga dapat diperlihatkan oleh meiofauna. Dalam beberapa kasus, genus meiofauna lebih atau kurang mengandalkan transpor pasif oleh arus pasang. Ketika munculnya pasang, meiofauna akan ditranspor secara pasif walaupun meiofauna bergerak dengan pelan-pelan pada permukaan sedimen.

Beberapa genus meiofauna dapat beradaptasi untuk menghadapi pengaruh arus pasang, yaitu dengan mengembangkan mekanisme organ renang. Bagi meiofauna yang dapat berenang secara aktif dapat melakukan migrasi ke kolom air. Pada fase muda, meiofauna berenang secara aktif ke lapisan air di atasnya dan disebarkan ke laut oleh arus. Sementara itu, meiofauna fase dewasa cenderung berada dekat dasar dan kemudian disebarkan kembali oleh arus. Meiofauna yang terbawa oleh arus pasang tersebut akan mengembangkan adaptasi perilaku untuk membuat dan menempati habitat yang baru (McLusky & McIntyre 1988).

Meiofauna dapat beradaptasi terhadap perubahan musim. Pada musim dingin di daerah mangrove, ketika bahan organik terakumulasi ke dalam sedimen, genus meiofauna dari family Chromadoridae (taksa Nematoda) tetap berada di dalam sedimen. Meiofauna ini dapat beradaptasi terhadap kondisi lingkungan sedimen yang sangat dingin. Pada musim panas, mereka bermunculan kembali untuk membentuk koloni yang baru. Strategi adaptasi perilaku meiofauna terhadap perubahan musim dari famili Chromadoridae ini berbeda dengan famili Monhystiridae yang hanya tercatat pada waktu pertumbuhan alga mencapai puncaknya, dan fauna ini berasosiasi dengan proses dekomposisi makrofita (Jensen 1984, diacu dalam Gwyther & Fairweather 2002). Kehadirannya pada musim ini menggambarkan perannya dalam proses dekomposisi dengan memangsa bakteri (Villano & Warwick 1995; Gwyther & Fairweather 2002).

### **Peranan Ekologis Meiofauna Interstisial**

Meiofauna yang menempati sedimen merupakan komponen utama lingkungan bentik (Metcalf 2005; Soltwedel & Prena 2006). Sebagai fauna interstisial, meiofauna merupakan komponen penting dalam ekosistem pantai dan laut. Di sedimen laut, meiofauna memiliki peranan ekologis yang sangat penting, yaitu: 1) sebagai penyedia makanan bagi berbagai tingkat trofik yang lebih tinggi; 2) memainkan peranan penting dalam biodegradasi bahan organik; 3) memudahkan biomineralisasi bahan organik dan meningkatkan regenerasi nutrisi; 4) berperan dalam menyuburkan dasar perairan dan meningkatkan produktivitas bentik; 5) sebagai anggota komunitas bentos yang dapat menyumbangkan pengaruh interaktif kepada biota laut lainnya melalui kompetisi, simbiosis, predasi

dan asosiasi; dan 6) karena sensitivitasnya yang tinggi terhadap masukan antropogenik dan bahan-bahan pencemar, membuatnya sebagai organisme yang baik sekali untuk studi pencemaran dan digunakan sebagai bioindikator dalam menilai kondisi lingkungan laut (Herman & Heip 1988; Aller & Aller 1992; Green & Montagna 1996; Montagna & Harper 1996; Gee & Somerfield 1997; Coull 1999; Lee *et al.* 2000; Mirto *et al.* 2000; Raffaelli 2000; Beier & Traunspurger 2001; Smith *et al.* 2001; Mistri *et al.* 2002; Vezzulli *et al.* 2003; Barnes & Hughes 2004; Stead *et al.* 2005; Buat 2006).

Meiofauna benthik merupakan komponen penting di perairan pantai dan estuaria (Metcalf 2005). Sebagai pemangsa mikroalga dan bakteri, meiofauna telah menunjukkan pengaruhnya terhadap produksi primer, siklus nutrisi dan proses-proses metabolik benthik lainnya (Carman *et al.* 1996, 1997; Manini *et al.* 2000; Pinckney *et al.* 2003). Bahan organik dan nutrisi yang dimangsa oleh meiofauna, kemudian diasimilasinya dan dijadikan sebagai produksi bersih atau direspirasi. Ketika hewan mati, nutrisi diremineralisasi sehingga tersedia untuk proses mikroba dan produksi primer (Coull 1999).

Kehadiran meiofauna dalam suatu ekosistem dapat mempengaruhi struktur komunitas makrofauna secara nyata. Meiofauna yang berasosiasi dengan ekosistem tersebut memiliki peranan yang amat penting, yaitu sebagai salah satu mata rantai penghubung dalam aliran energi dan siklus materi dari alga planktonik sampai konsumen tingkat tinggi (Mann 2000), dan memberikan kontribusi dalam menopang kehidupan organisme trofik yang lebih tinggi (Coull 1988, 1999), seperti kepiting, ikan dan udang (Heip *et al.* 1985; Webber & Thurman 1991).

Terkait dengan responnya terhadap lingkungan, meiofauna mempunyai kepekaan terhadap perubahan-perubahan yang terjadi terhadap lingkungannya, sehingga jenis tertentu dari meiofauna, seperti Nematoda dan Copepoda sering digunakan sebagai indikator dalam menyatakan kelimpahan bahan organik. Perbandingan Nematoda dan Copepoda (rasio N/C) dapat digunakan sebagai alat *biomonitoring* pencemaran organik dalam komunitas benthik (Hodda & Nicholas 1985; Montagna & Harper 1996; Pati *et al.* 1999). Pengaruh utama akumulasi bahan organik adalah pengurangan kandungan oksigen dalam sedimen dan selanjutnya menstimulasi pembentukan lapisan hidrogen sulfida. Kepadatan

Copepoda secara langsung berkaitan dengan faktor lingkungan, seperti kedalaman lapisan RPD (*Redox Potential Discontinuity*), kandungan oksigen, air interstisial (air pori sedimen), dan desikasi/pengeringan sedimen (Mirto *et al.* 2000).

Keuntungan menggunakan meiofauna untuk studi pencemaran adalah: 1) biasanya meiofauna mempunyai kemampuan untuk bertambah dalam lingkungan bentik yang terganggu/tercemar, tidak seperti makrofauna; 2) umumnya meiofauna mempunyai siklus hidup yang pendek (sekitar 30–40 hari), menghasilkan generasi dalam setahun, organisme yang terekspos tahan terhadap toksikan dan siklus hidupnya lebih komplit 3) ukuran meiofauna yang kecil dapat diberikan untuk ukuran sampel yang kecil pula; 4) komunitas meiofauna sifatnya lebih stabil, baik kualitas maupun kuantitasnya terhadap musim dan dari tahun ke tahun daripada makrofauna (Coull & Chandler 1992).

Meiofauna interstisial selain berperan melapukkan dan menghancurkan bahan-bahan organik di dalam sedimen, juga berperan dalam menyuburkan dasar perairan dan meningkatkan produktivitas bentik. Hal ini dapat dijelaskan sebagai berikut: 1) meiofauna interstisial memakan/menghisap apa saja yang ada di muka mulutnya, sedimen, sisa tumbuhan/binatang yang sudah lapuk, bakteri dan mikroflora bentik, yang selanjutnya dicerna dan dikeluarkan sebagai kotoran; 2) meiofauna interstisial yang bergerak secara meliang membuat lubang-lubang dengan dorongan tubuhnya di dalam lapisan sedimen, sehingga kotoran-kotorannya dapat menyuburkan lapisan tersebut, karena kotoran meiofauna interstisial merupakan hasil pencernaan yang banyak mengandung berbagai hasil persenyawaan kimiawi yang kompleks. Sisa-sisa tanaman, mikroflora bentik, mikrofauna yang mengandung zat protein, karbohidrat, lemak dengan enzim-enzim diubahnya dalam tubuh meiofauna interstisial menjadi zat-zat mineral yang bermanfaat yang terkandung dalam kotoran-kotorannya yang biasanya ditempatkan di pintu lubang/lorong-lorongnya secara bertumpukan; 3) pembuatan lubang/lorong-lorong dalam sedimen oleh meiofauna interstisial sampai jauh ke dalam sedimen, berarti meiofauna interstisial telah mengangkat bagian-bagian sedimen dari lapisan bawah ke atas. Akibatnya, bagian-bagian dari zat mineral akan ikut terangkat ke lapisan atas yang dapat memperkaya bahan-bahan mineral dalam sedimen; dan 4) lubang-lubang yang dibuat oleh meiofauna interstisial di

dalam sedimen sangat membantu masuknya air, udara dan makanan ke dalam sedimen (Aljetlawi *et al.* 2000).

Aspek penting lainnya adalah peranan energetik yang dimainkan oleh meiofauna interstisial. Gerlach (1971) diacu dalam Coull (1988) mengatakan bahwa biomassa meiofauna sekitar seperlima dari biomassa makrofauna. Dengan demikian, rasio biomassa makrofauna/meiofauna adalah  $> 5:1$  dimana total energi yang diperlukan makrofauna melebihi meiofauna. Biomassa makrofauna dalam sebagian sistem biasanya lebih besar dari ratio 5:1 tetapi secara ekstrem pada perairan dangkal (hamparan lumpur, estuaria) dan laut dalam, rasio biomassa makrofauna/meiofauna sekitar 1 dan dengan demikian meiofauna memainkan peranan yang lebih penting dalam energetik benthik pada sistem ini.

Kedudukan biomassa meiofauna biasanya lebih rendah daripada makrofauna, tetapi kepadatan, laju metabolik dan produksi hewan-hewan kecil secara proporsional lebih tinggi. Walaupun ukuran mereka lebih kecil, aktivitas metabolik lebih tinggi, dan laju pergantian juga tinggi, produktivitas organisme meiofauna per unit biomassa lebih besar daripada makrofauna (Webber & Thurman 1991; Nybakken & Barnes 2005). Sebagai contoh, pada sedimen lumpur di estuaria Cornwall, United Kingdom produktivitas atau rasio produksi/biomassa (P:B) untuk meiofauna adalah  $11.1 \text{ (g C/m}^2\text{/tahun)}$  dan makrofauna  $1.8 \text{ (g C/m}^2\text{/tahun)}$ . Produksi tahunan makrofauna adalah  $5.46 \text{ g C m}^{-2}$  dan meiofauna  $20.39 \text{ g C m}^{-2}$ . Produksi meiofauna, sekitar  $3.34 \text{ g}$  dimanfaatkan dalam sistem, dan sisanya yang tersedia sekitar  $16.83 \text{ g}$  untuk karnivora yang bergerak. Makrofauna menghasilkan karbon utama secara tahunan sebesar  $58.599 \text{ g C}$ , sedangkan meiofauna sebesar  $107.795 \text{ g C}$  (McLusky & McIntyre 1988). Walaupun biomassa meiofauna ( $0.5 \text{ g C m}^{-2}$  di Laut Wadden) hanya 5% dari biomassa makrofauna ( $10\text{-}20 \text{ g C m}^{-2}$  di Laut Wadden), rasio P/B meiofauna jauh lebih tinggi daripada rasio P/B makrofauna. Oleh sebab itu, meiofauna sangat memberikan kontribusi yang nyata terhadap keseluruhan metabolisme benthos. Barnes dan Hughes (2004) mengatakan bahwa produksi makrofauna benthik jarang melebihi 5% dari komponen organisme dan sering pertumbuhannya lambat serta mempunyai masa hidup yang lama.

Keberadaan meiofauna interstisial dalam sedimen dapat mempengaruhi karakteristik fisika dan kimia sedimen dan sebaliknya. Meiofauna interstisial dapat mempengaruhi percampuran partikel sedimen yang disebabkan oleh pergerakan hewan tersebut kesana-kemari mencari makan atau melarikan diri dari mangsa atau oleh pengambilan partikel selama makan dan pemindahan partikel ke permukaan sedimen selama pembuangan sisa dari hewan tersebut (Hines 1991; Aller & Aller 1992; Marinelli & Woodin 2002).

### **Hubungan dan Interaksi Trofik dalam Meiofauna Interstisial**

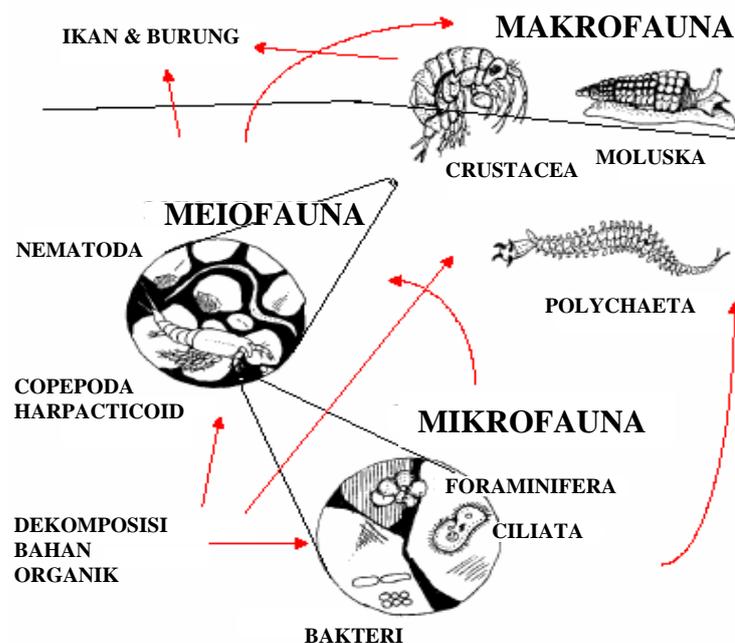
Komunitas meiofauna dapat dipengaruhi oleh fauna bentik dan ikan melalui peristiwa makan memakan. Terlepas dari pemangsaan yang dilakukan oleh organisme lain, sebenarnya dalam komunitas meiofauna itu sendiri terdapat mekanisme pengaturan melalui berbagai pola interaksi sebagai akibat hidup dalam habitat dan sumberdaya yang sama. Bentuk interaksi yang terjadi dapat berupa kompetisi dan predasi (Coull 1988; Livingston 2003; Barnes & Hughes 2004; Nybakken & Bertness 2005).

Beberapa penelitian menyimpulkan bahwa meiofauna tidak dimakan langsung oleh organisme yang lebih besar, tetapi meiofauna penting dalam proses penghancuran detritus. Sementara yang lain menunjukkan bahwa beberapa meiofauna (khususnya Copepoda Harpacticoida) merupakan makanan penting bagi makrofauna (Webber & Thurman 1991; Zobrist & Coull 1992). Meiofauna dimanfaatkan secara aktif oleh larva ikan *Leiostomus xanthurus* (Coull 1988; Street *et al.* 1998; Mann 2000; Nybakken & Bertness 2005), juvenil ikan *Clinus superciliosus*, *Syngnathus scovelli* dan *Hippocampus zosterae*, juvenil ikan *Pleuronectes platessa*, *Microchirrus boscanion* dan *Limanda limanda* (Coull 1999; Nybakken & Bertness 2005), juvenil ikan *Platichthys flesus* (Coull 1999; Aarnio 2000; Nybakken & Bertness 2005), juvenil ikan *Sillago maculata* (Coull *et al.* 1995), dan ikan dewasa *Gobionellus boleosoma* (Gregg & Fleeger 1997; Barnes & Hughes 2004; Nybakken & Bertness 2005).

Pemakan deposit (*deposit feeders*) seperti Polychaeta dan Holothurian juga memakan meiofauna yang lain (Zobrist & Coull 1994). Meiofauna memakan sekitar 70–80% bahan organik yang tersedia di habitatnya, yang pada gilirannya

meiofauna dimakan oleh juvenil udang, kepiting dan ikan. Meiofauna Copepoda Harpacticoida merupakan makanan utama bagi juvenil dari beberapa spesies ikan predator, misalnya ikan demersal atau ikan dasar, ikan gobi, dan ikan *mullet*, mempunyai sejumlah besar meiofauna dalam perutnya dan hewan lainnya seperti udang, Polychaeta besar, dan Hydroida (McLusky & McIntyre 1988; Gregg & Fleeger 1997; Barnes & Hughes 2004; Nybakken & Bertness 2005).

Nybakken dan Bertness (2005) melaporkan bahwa ikan salmon pada masa juvenil merupakan pemangsa meiofauna Copepoda. Predator yang lain terhadap meiofauna termasuk udang *Palaemonetes pugio* tidak hanya memakan meiofauna, tetapi dapat mengontrol sejumlah populasi dan struktur komunitas meiofauna (Gregg & Fleeger 1997; Nybakken & Bertness 2005). Dengan demikian, organisme meiofauna masuk ke dalam jaring-jaring makanan (Gambar 3).

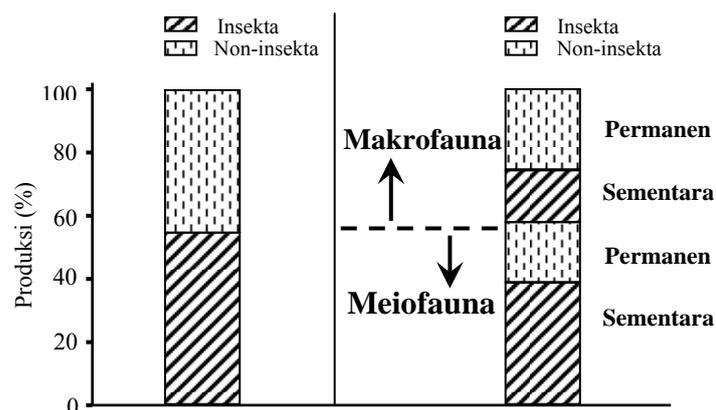


Gambar 3. Hubungan trofik meiofauna interstisial dengan mikrofauna dan makrofauna di lingkungan bentik (Coull 1988, 1999).

Gambar 2 menjelaskan jaring-jaring makanan meiofauna yang potensial, meliputi makrofauna, meiofauna, predator-predator yang berenang dan makanan meiofauna. Makanan meiofauna adalah diatom, bakteri, detritus dan bahan organik. Jika meiofauna tersuspensi, maka ia dapat dimakan oleh predator-predator yang berenang (seperti ikan, udang, dan mysid), pemakan deposit atau

oleh pemakan suspensi. Meiofauna yang merupakan bagian integral dari jaring-jaring makanan di lingkungan benthik, tingkat dimana meiofauna memasuki jaring-jaring makanan makrofauna, sangat bergantung pada tipe sedimen. Pada sedimen lumpur, organisme meiofauna biasanya terkonsentrasi pada lapisan sedimen bagian atas, dimana mereka lebih mudah diambil oleh makrofauna. Pada sedimen pasir, organisme meiofauna mungkin lebih dalam sehingga mereka lebih sulit diambil oleh makrofauna (Coull 1988, 1999).

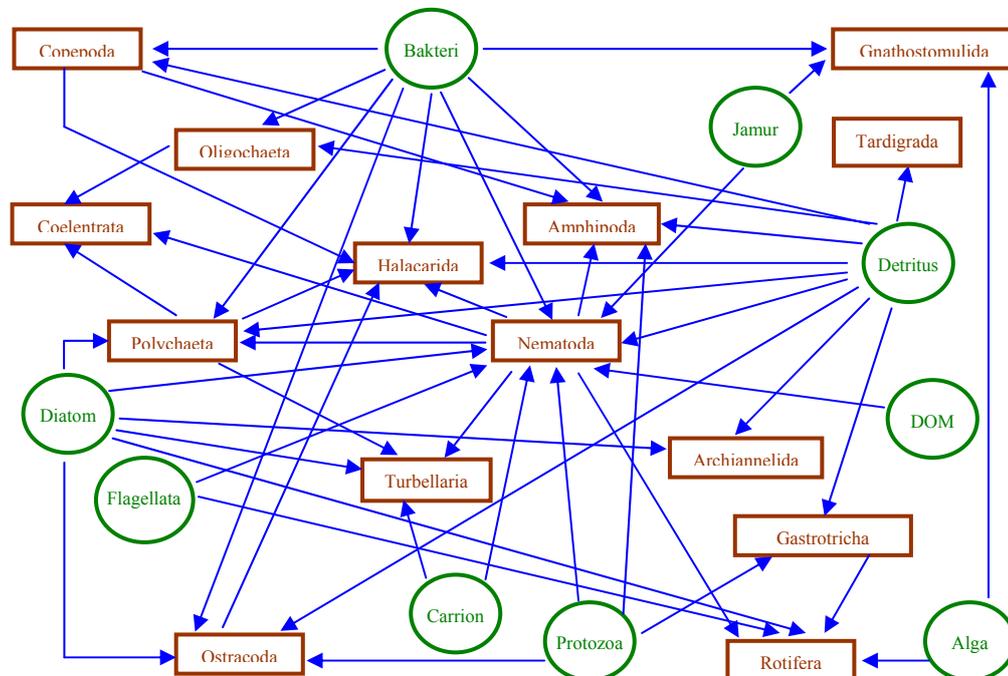
Walaupun sejumlah besar meiofauna didominasi oleh taksa Nematoda, namun taksa Copepoda memberikan kontribusi yang lebih besar sekitar 50% dari total produksi meiofauna, kemudian diikuti oleh Polychaeta (34%) dan Nematoda (12%). Di samping itu, laju produksi harian meiofauna juga tinggi, yaitu pada Februari–Maret (21.3 mgC/m<sup>2</sup>/hari), Mei–Juni (31.4 mgC/m<sup>2</sup>/hari) dan Oktober–Desember (44.6–52.0 mgC/m<sup>2</sup>/hari). Analisis produksi sekunder harian dari taksa yang dominan menggambarkan bahwa perbedaan komponen meiofauna yang dominan terjadi dalam periode yang berbeda. Selama Februari–Maret, Mei–Juni dan September–Oktober Copepoda menunjukkan laju produksi tertinggi, tetapi pada November dan Desember produksi harian meiofauna tercatat sebagian besar adalah Polychaeta dan Nematoda (Danovaro *et al.* 2002). Stead *et al.* (2005) melaporkan bahwa sekitar 51% dari total produksi sekunder benthik berasal dari produksi sekunder meiofauna (meiofauna sementara dan permanen) (Gambar 4).



Gambar 4. Total produksi sekunder benthik yang berasal dari produksi sekunder meiofauna (meiofauna sementara dan permanen) (Stead *et al.* 2005).

Asumsi dasar bahwa peranan utama meiofauna dalam jaring-jaring makanan benthik laut terutama pada remineralisasi atau resiklus nutrisi (Coull 1999; Raffaelli 2000), telah diteliti lebih dari dua dekade tentang interaksi di antara

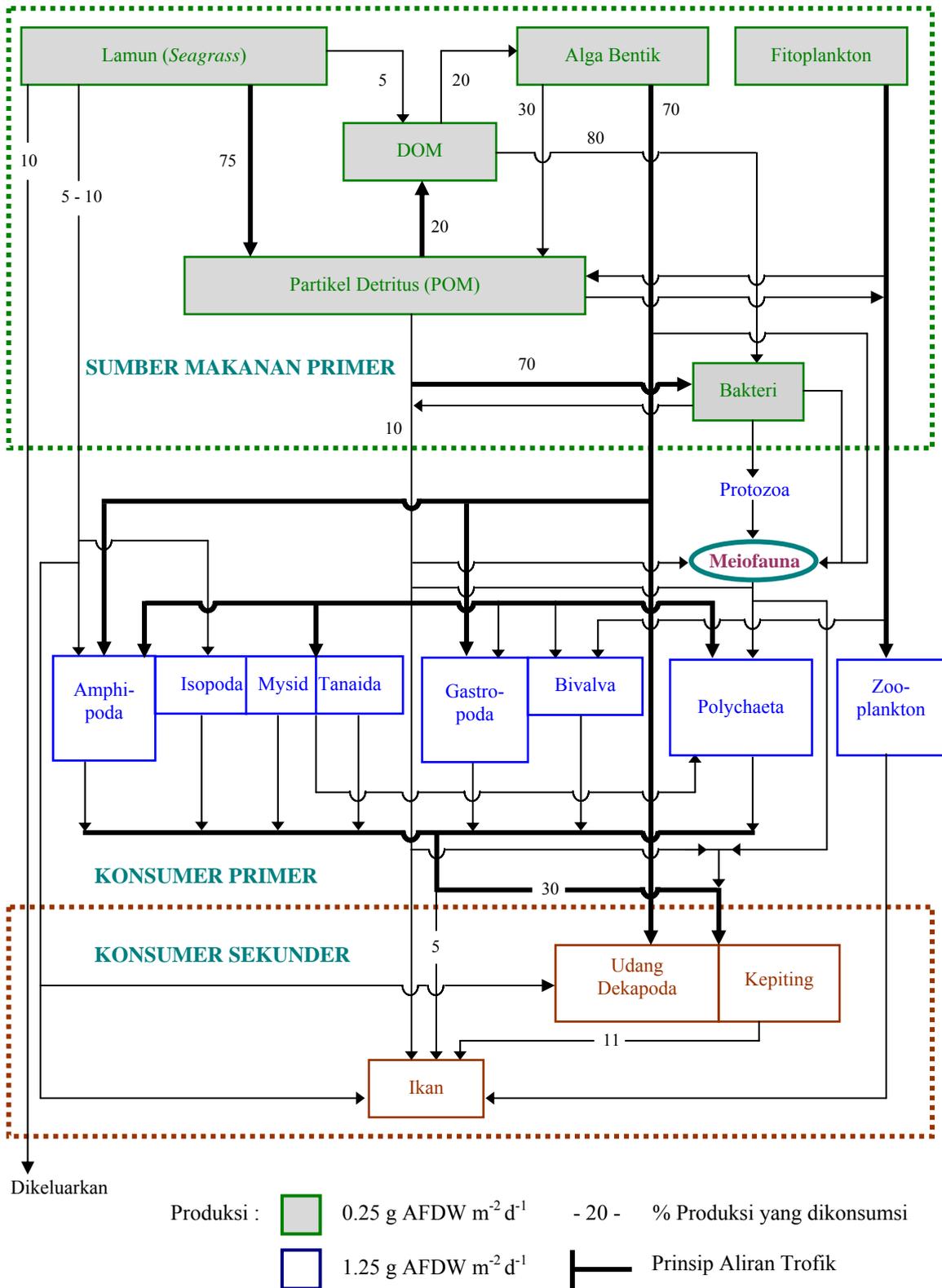
meiofauna yang berbeda (Gambar 5), yang mengapresiasi pentingnya meiofauna bagi predator epibentik yang berukuran kecil. Ukuran tubuh individu meiofauna yang kecil ternyata begitu penting untuk produksi dan aliran energi dalam ekosistem perairan dangkal.



Gambar 5. Interaksi trofik dalam meiofauna interstisial (“meiofauna interstisial dalam kotak”: Coull & Bell 1979, diacu dalam Raffaelli 2000).

Komposisi meiofauna biasanya khas di antara komunitas organisme bentik dan secara umum merupakan organisme yang mendominasi ekosistem bentik. Meiofauna mempunyai produktivitas yang tinggi dan merupakan penyumbang produksi dari bentos estuaria (Herman & Heip 1985) dan ekosistem padang lamun (Danovaro *et al.* 2002). Informasi mengenai produktivitas sekunder meiofauna pada sistem padang lamun kurang tersedia. Dari informasi yang ada, total produksi sekunder meiofauna dalam sistem padang lamun berkisar 7.5–13.2 gC/m<sup>2</sup>/tahun. Nilai ini merupakan nilai tertinggi yang pernah dilaporkan di seluruh dunia (Danovaro *et al.* 2002). Hal ini mengindikasikan bahwa sistem padang lamun merupakan tempat yang baik untuk produksi meiofauna.

Seperti halnya ekosistem lainnya, meiofauna di dalam ekosistem padang lamun (*seagrass*) memiliki peranan yang amat penting, yaitu sebagai salah satu mata rantai penghubung dalam aliran energi dan siklus materi dari alga planktonik sampai konsumen tingkat tinggi (Gambar 6).



Gambar 6. Skema hubungan trofik dalam sistem padang lamun (*seagrass*) di Teluk Westernport, Australia. Area pada kotak adalah sebanding dengan laju produksi bahan organik, dan angka pada garis mengindikasikan persentase produksi yang dipindahkan antar kompartemen (AFDW = *Ash Free Dry Weight*) (Mann 2000).

Dari Gambar 6 terlihat bahwa 5–10% produksi lamun diperkirakan diambil oleh Amphipoda dan Isopoda, 10% dikeluarkan dari area, 75% mati dan menghasilkan bahan organik partikel (*particulate organic matter*, POM), dan 5% menjadi bahan organik terlarut (*dissolved organic matter*, DOM). Selanjutnya, 20% dari POM diubah bentuknya menjadi DOM selama proses dekomposisi. Bakteri menggunakan 70% POM dan 80% DOM, sedangkan sisanya 10% detritus digunakan oleh invertebrata detritivor (pemakan detritus) (Mann 2000).

Sedimen padang lamun mempunyai kandungan bahan organik, konsentrasi kloropigmen dan biomassa bakteri yang tinggi (Danovaro & Gambi 2002). Meiofauna mampu memanfaatkan detritus yang berasal dari plankton dan tumbuhan lamun yang mati, bakteri, dan bahan organik lain yang terakumulasi dalam sedimen atau terkubur/terjebak di sela-sela butiran pasir dan lumpur sebagai sumber makanan, yang selanjutnya meiofauna tersebut dimanfaatkan oleh konsumen terdekat yaitu makrofauna. Karena ukuran meiofauna kecil, jumlah biomassa yang dihasilkan lebih kecil dibandingkan dengan makrofauna, tetapi laju pertumbuhannya lebih tinggi dan masa hidupnya lebih pendek (Webber & Thurman 1991).

Produksi total primer mikrofitobentos secara potensial dikonsumsi oleh meiofauna interstisial sekitar 10% hingga > 50% (sebagai ukuran dari efisiensi trofik padang lamun) (Danovaro *et al.* 2002). Perkiraan ini menunjukkan perlunya meiofauna interstisial dalam aliran energi bentik di ekosistem padang lamun. Kemudian, tutupan tumbuhan air dan kompleksitas substrat juga dapat mempengaruhi struktur komunitas meiofauna interstisial (Boström & Bonsdorff 1997, 2000; Danovaro & Fraschetti 2002).

### **Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Komunitas Meiofauna Interstisial**

Komposisi genus dan kelimpahan individu meiofauna dapat dikontrol dan dipengaruhi oleh sejumlah faktor, baik faktor fisika, kimia maupun biologi. Faktor-faktor yang dimaksud adalah: ukuran partikel sedimen, suhu, dan arus (faktor fisika); salinitas, oksigen, pH dan *Eh* sedimen, dan bahan organik sedimen (faktor kimia); bioturbasi dan pemangsaan/predasi (faktor biologi). Komunitas

meiofauna dipengaruhi oleh karakteristik fisika-kimia sedimen selama habitat sedimen terekspos cukup lama (Rosa & Bemvenuti 2005).

### **Ukuran Partikel dan Jenis Sedimen**

Kondisi yang mempengaruhi meiofauna agak berbeda dengan kondisi yang mempengaruhi makrofauna dalam area yang sama. Sebagian besar faktor penting yang mempengaruhi kehadiran, ketidakhadiran, dan jenis organisme interstisial adalah ukuran butir sedimen. Komposisi sedimen biasanya ditentukan dari ukuran butir sedimen dan dapat mempengaruhi organisme yang ada di dalamnya (Higgins & Thiel 1988; Giere 1993; Silence *et al.* 1993; Coull 1999; Mistri *et al.* 2002; Rodríguez 2004; Nybakken & Bertness 2005).

Ukuran butir sedimen juga penting dalam mengontrol kemampuan sedimen untuk menahan dan mensirkulasi air dan udara. Keberadaan meiofauna di dalam sedimen berhubungan dengan air dan oksigen. Ketersediaannya dalam celah-celah sedimen diperlukan untuk kehidupan organisme ini. Jika ukuran butir sedimen terlalu kasar, ketika terjadi pasang surut, maka air tidak akan tertahan dalam sedimen oleh aksi kapiler, tetapi akan membuat aliran air pada lapisan yang sangat tipis. Sementara, sedimen berbutir halus dapat menahan air dalam celah-celah sedimen melalui aksi kapiler (Rodríguez 2004; Nybakken & Bertness 2005).

Sirkulasi air melalui ruang pori sedimen adalah penting karena pergerakan air ini dapat memperbaharui suplai oksigen dan suplai makanan serta dapat mencegah kondisi kekeringan bagi meiofauna. Kecepatan sirkulasi air dalam sistem interstisial bergantung pada kondisi hidrodinamik air di atasnya dan aktivitas pengaliran air (irigasi) dari tabung-tabung yang dibuat oleh makrozoobentos. Oleh sebab itu, sirkulasi air berlangsung dengan baik pada sedimen berbutir kasar dan berkurang pada sedimen berbutir halus. Jika ukuran butir yang terdapat semakin halus (lumpur), sirkulasi hampir berhenti, dan menghasilkan lapisan transisi. Pada lapisan transisi dari kondisi aerob ke anaerob dalam sedimen, nilai  $E_h$  berubah dengan cepat dari positif ke negatif, yang akhirnya akan menimbulkan lapisan anaerob dalam sedimen. Nilai  $E_h$  ini mengindikasikan kedalaman lapisan aerob dalam sedimen (Webber & Thurman 1991; Giere 1993; Rodríguez 2004; Nybakken & Bertness 2005).

Ukuran butir sedimen merupakan faktor yang terpenting sekali menentukan jumlah ruang interstisial yang tersedia bagi habitat meiofauna. Semakin besar ukuran butir sedimen maka ruang-ruang interstisial yang tersedia di dalam sedimen semakin besar. Dengan kata lain, ukuran butir sedimen yang kasar memiliki volume ruang interstisial yang lebih besar. Oleh sebab itu, organisme interstisial yang dapat mendiami area tersebut lebih besar. Sebaliknya, ukuran butir sedimen yang lebih halus, ketersediaan ruang interstisialnya lebih sedikit dan organisme yang mendiami area tersebut lebih kecil. Barangkali ukuran butir sedimen yang demikian merupakan penghalang bagi pergerakan organisme meiofauna. Dengan demikian, ukuran butir sedimen penting di dalam menentukan komposisi genus dan kelimpahan meiofauna (McLusky & McIntyre 1988; Giere 1993; Coull 1999; Funch *et al.* 2002; Nybakken & Bertness 2005).

Jumlah meiofauna yang maksimum ditemukan pada diameter butiran pasir antara 175-275  $\mu\text{m}$  (Nybakken & Bertness 2005). Menurut Giere (1993), ukuran butir sedimen yang kritis bagi kehadiran meiofauna adalah sekitar 200  $\mu\text{m}$ , sedangkan batas bawah ukuran butir sedimen yang masih dapat dihuni oleh meiofauna adalah 150  $\mu\text{m}$ . Fauna interstisial cenderung menghilang kalau rata-rata diameter ukuran butir di bawah 0.1 mm (Nybakken & Bertness 2005). Sedimen yang berukuran partikel <125  $\mu\text{m}$  didominasi oleh organisme meiofauna penggali, sedangkan sedimen dengan ukuran butir >125  $\mu\text{m}$  didominasi oleh bentuk-bentuk yang berpindah dalam celah-celah sedimen (Higgins & Thiel 1988; Coull 1999; Funch *et al.* 2002). Biasanya di sedimen pasir berukuran kasar jumlah genusnya tinggi, tetapi kelimpahan individunya rendah. Di sedimen pasir yang berukuran sedang, keragaman dan kelimpahan meiofauna cukup tinggi. Sementara di sedimen lumpur yang berbutiran halus, keragamannya rendah tetapi kelimpahan setiap genus cukup tinggi (Giere 1993).

### **Arus**

Arus dapat mempengaruhi keberadaan dan distribusi organisme meiofauna di suatu habitat sedimen (Rodríguez *et al.* 2001; Linhart *et al.* 2002; Tita *et al.* 2002; Rodríguez 2004; Nybakken & Bertness 2005) serta mempengaruhi kebiasaan makan meiofauna (Linhart *et al.* 2002). Kelimpahan beberapa

meiofauna secara negatif dipengaruhi oleh arus. Meiofauna taksa Gastrotricha lebih menyukai daerah yang kecepatan arusnya rendah (Schmid-Araya 1997, diacu dalam Linhart *et al.* 2002). Total jumlah Copepoda berkorelasi negatif terhadap kecepatan arus, namun beberapa genus mempunyai respon yang berbeda terhadap arus dan bahan organik yang terperangkap. Kepadatan Cladocera, Cyclopoda, Ostracoda dan Rotifera menurun dengan meningkatnya kecepatan arus tetapi merespon secara positif terhadap peningkatan bahan organik. Berkorelasinya Copepoda dengan bahan organik diduga disebabkan oleh penggunaan bahan organik tersebut sebagai makanan dan/atau habitat (Rodríguez *et al.* 2001; Schmid-Araya & Schmid 2000, diacu dalam Linhart *et al.*, 2002).

Meiofauna yang meninggalkan sedimen dimungkinkan untuk disebarkan oleh arus ke tempat lain tanpa mengeluarkan banyak energi (Tita *et al.* 2002; Nybakken & Bertness 2005). Bagi meiofauna yang tidak dapat berenang, misalnya Nematoda, dapat berpindah dari suatu lokasi ke lokasi lain karena kemampuannya untuk menuju ke permukaan sedimen. Sementara, Foraminifera yang juga tidak mempunyai organ renang, dan tubuhnya tidak dapat bertahan bila ada arus, maka keberadaannya di tempat lain disebabkan oleh adanya pengadukan sedimen oleh arus (Gooday 1988; Moodley *et al.* 2000).

## **Suhu**

Suhu perairan dipengaruhi oleh musim, komposisi sedimen, sirkulasi udara, kekeruhan, penutupan awan, air hujan, luas permukaan perairan yang langsung mendapat sinar matahari, aliran dan kedalaman perairan. Suhu merupakan salah satu faktor lingkungan perairan yang berperan mengendalikan kondisi ekosistem perairan dan dapat mempengaruhi sifat fisik-kimia perairan dan fisiologi organisme. Peningkatan suhu mengakibatkan peningkatan viskositas, reaksi kimia, evaporasi dan volatilisasi. Peningkatan suhu juga menyebabkan penurunan kelarutan gas dalam air dan menyebabkan terjadinya peningkatan dekomposisi bahan organik oleh mikroba. Selain itu, peningkatan suhu juga menyebabkan peningkatan kecepatan metabolisme dan respirasi organisme air, dan selanjutnya mengakibatkan peningkatan konsumsi oksigen oleh organisme perairan, dan akhirnya mengakibatkan penurunan kandungan oksigen terlarut (Kennish 1990).

Terkait dengan komunitas meiofauna, suhu sedimen merupakan faktor yang menentukan keberadaan dan kelimpahan meiofauna. Perubahan suhu dapat menyebabkan perubahan kelimpahan meiofauna. Populasi meiofauna menurun secara gradual dengan meningkatnya suhu pada permukaan sedimen lumpur. Suhu berpengaruh terhadap waktu generasi meiofauna. Suhu yang optimum untuk perkembangan meiofauna adalah 20–30°C. Pada kisaran suhu yang tinggi sekitar 33–50°C, menyebabkan terjadinya gangguan perkembangan daur hidup, dan penurunan suhu menyebabkan perpanjangan waktu pergantian generasi. Faktor suhu ini berhubungan dengan musim. Kelimpahan meiofauna berfluktuasi secara musiman di daerah subtropis, di mana kelimpahan tertinggi umumnya terjadi pada saat kondisi terhangat dalam setahun (Heip *et al.* 1985).

Kisaran suhu yang ekstrim dapat terjadi di lapisan sedimen bagian atas pada waktu siang dan malam, sedangkan kisaran suhu yang sempit terjadi di sedimen zona subtidal dan intertidal di bawah kedalaman 10-15 cm (Nybakken & Bertness 2005). Lapisan permukaan sedimen bertindak sebagai insulator (penyekat) terhadap lapisan bawah, secara efektif memperkecil perubahan suhu yang signifikan. Di lapisan permukaan sedimen, suhu mungkin berubah secara nyata, bergantung pada suhu udara, pengaruh angin dan hujan, dan suhu air laut (Silence *et al.* 1993; Nybakken & Bertness 2005). Di zona sublitoral dan zona yang lebih dalam lainnya, pengaruh suhu terhadap sebaran meiofauna dapat diabaikan karena di habitat tersebut suhunya relatif konstan (Giere 1993).

Secara alami, meiofauna dapat menyesuaikan diri terhadap perubahan suhu. Meiofauna dapat dijumpai di berbagai daerah di belahan bumi mulai dari perairan kutub, subtropis, tropis, *hydrothermal vent* yang panas hingga tepian supralitoral yang suhunya sangat berfluktuasi. Hal ini mengindikasikan bahwa meiofauna mampu beradaptasi pada berbagai tipe suhu di permukaan bumi (Giere 1993).

### **Salinitas**

Secara umum, meiofauna dapat hidup dengan keragaman yang tinggi pada berbagai tipe salinitas di perairan yang berbeda mulai dari perairan tawar, payau hingga perairan laut. Hal ini mengindikasikan bahwa keragaman meiofauna yang tinggi di dalam komunitasnya, meiofauna memiliki keragaman kemampuan

fisiologis untuk beradaptasi terhadap berbagai tipe salinitas. Salinitas di dalam sedimen dapat berfluktuasi baik secara spasial maupun secara temporal. Secara spasial, gradien salinitas dapat terjadi baik secara vertikal maupun horizontal, sedangkan secara temporal bergantung pada musim dan siklus pasang surut air laut (Higgins & Thiel 1988; Giere 1993).

Salinitas di dalam sedimen dapat meningkat tajam hingga mencapai kondisi hipersalin sebagai akibat dari penguapan yang tinggi di musim panas ketika air laut sedang surut dan panas yang cukup tinggi. Sementara itu, salinitas di dalam sedimen dapat menurun drastis ketika hujan lebat dan air laut sedang surut (Giere 1993; Nybakken & Bertness 2005). Namun demikian, penurunan salinitas ini hanyalah terbatas beberapa sentimeter di lapisan sedimen bagian atas saja (Giere 1993), sedangkan di lapisan sedimen bagian bawah tidak terjadi penurunan salinitas karena lapisan bawah memiliki daya kapiler yang tinggi sehingga mampu mempertahankan salinitas yang normal (Nybakken & Bertness 2005). Salinitas di dasar zona sublitoral kurang berfluktuasi dan biasanya sama dengan salinitas air laut di atasnya, sehingga salinitas di daerah tersebut hampir tidak menjadi faktor pembatas bagi keberadaan dan kelimpahan meiofauna (Giere 1993).

### **Potensial Redoks (*Eh*) dan Derajat Keasaman (*pH*) Sedimen**

Dalam suatu perairan, pencampuran biogenik intensif terjadi di atas permukaan sedimen, sedangkan proses kimia seperti pembusukan, perombakan dan reduksi terjadi di bawah permukaan sedimen yaitu pada lapisan 10-30 cm. Reaksi-reaksi kimia yang terjadi dalam sedimen, yaitu: 1) absorpsi dan pelarutan ion, senyawa antara air dan sedimen; 2) perubahan nilai *Eh* dan *pH* sedimen; 3) transfer senyawa hasil reduksi dari lapisan bawah ke lapisan atas sedimen; 4) siklus karbon, nitrogen, sulfur dan fosfor; dan 5) perubahan konsentrasi ion, baik dalam jaringan organisme maupun dalam sedimen (De Deckre *et al.* 2001).

Potensial redoks (reduksi dan oksidasi) yang menggambarkan aktivitas elektron (*e*) di perairan adalah potensi larutan untuk mentransfer elektron dari suatu oksidan kepada reduktan (Libes 1992; Kester 2001). Reduksi-oksidasi atau potensial redoks adalah pengukuran kuantitatif reduksi-oksidasi dari suatu sistem yang dapat diukur dengan elektroda platina dan merupakan elektroda standar

hidrogen (Kester 2001). Potensial redoks ( $Eh$ ) sedimen merupakan suatu besaran potensial listrik yang dapat menunjukkan proses dekomposisi bahan-bahan organik dalam sedimen yang berlangsung dalam keadaan reduksi atau oksidasi. Reduksi adalah proses penambahan elektron pada persenyawaan kimia, sedangkan oksidasi adalah proses kehilangan elektron dari suatu persenyawaan kimia dari substansi atau dari atom dan radikalnya. Dalam reaksi redoks, oksigen bersifat sebagai penerima elektron (Golterman 1990; Libes 1992; Kester 2001).

Pengaruh utama akumulasi bahan organik adalah reduksi kandungan oksigen dalam sedimen dan selanjutnya menstimulasi pembentukan lapisan hidrogen sulfida ( $H_2S$ ). Di lapisan reduksi,  $Eh$  bernilai negatif, kemudian meningkat (antara 0 sampai +200 mV) di lapisan transisi (RPD) dengan sedimen berwarna abu-abu, dan di lapisan oksidasi nilai  $Eh$  lebih dari +200 mV. Oksigen ( $O_2$ ), besi ( $Fe^{+3}$ ), karbondioksida ( $CO_2$ ) dan nitrat ( $NO_3$ ) lebih banyak dijumpai di lapisan oksidasi. Sementara di lapisan reduksi, zat-zat tersebut telah mengalami reaksi reduksi, sehingga yang lebih banyak dijumpai adalah hidrogen sulfida ( $H_2S$ ), besi ( $Fe^{2+}$ ), metana ( $CH_4$ ) dan amonia ( $NH_3$ ). Dalam lapisan reduksi ini diikuti pula oleh keasaman yang tinggi, warna sedimen kehitam-hitaman dan mempunyai bau yang khas. Pada lapisan lumpur yang berwarna hitam tidak terdapat lagi adanya oksigen dan lebih banyak terdapat endapan anaerob (Golterman 1990). Biasanya, pada lapisan reduksi ini tidak banyak organisme yang mampu hidup (Giere 1993).

Distribusi dan kelimpahan meiofauna sangat dipengaruhi oleh kondisi yang terdapat pada ketiga lapisan sedimen (oksidasi, transisi dan reduksi). Sebagian besar meiofauna, seperti Polychaeta, Copepoda, Turbellaria, Rotifera, Ciliata dan Nematoda, tidak ditemukan lagi pada lapisan reduksi. Di perairan yang belum tercemar dan cukup bahan organik, lapisan oksidasi relatif lebih tebal. Sebaliknya, di perairan kurang oksigen, lapisan oksidasi ini hanya beberapa sentimeter saja dari permukaan sedimen, dan lapisan reduksi akan bergerak agak ke lapisan atas. Ketika tingkat kedalaman RPD berubah menjadi kondisi reduksi, kelimpahan meiofauna (termasuk Copepoda) menurun drastis. Sementara itu, meiofauna yang lain (seperti Nematoda) dapat beradaptasi pada kandungan oksigen yang rendah di bawah lapisan RPD tersebut. Kelimpahan meiofauna akan meningkat pada permukaan sedimen dengan kandungan organik yang tinggi (Mirto *et al.* 2000).

Faktor pH sedimen memiliki peranan yang tidak begitu besar dalam kehidupan meiofauna. Hal ini disebabkan oleh nilai pH air laut yang cukup tinggi sekitar 7.5–8.8 dapat berperan sebagai penyangga (*buffer*) yang dapat mencegah terjadinya perubahan pH yang terlalu besar. Nilai pH dapat turun hingga 7.0 pada saat kondisi sedimen dalam keadaan anaerob dan mengandung H<sub>2</sub>S. Nilai pH ini jarang mencapai 6.0. Nilai pH sedimen dapat mencapai 9.0 ketika mikrofitobentos (diatom) di lapisan permukaan cukup melimpah dan proses fotosintesis terjadi secara intensif (Giere 1993). Nilai pH sedimen juga sangat bergantung pada nilai *Eh* sedimen. Nilai pH sedimen menurun dengan menurunnya nilai *Eh* sedimen yang sejalan dengan bertambahnya kedalaman sedimen (Golterman 1990).

### **Ketersediaan Oksigen**

Sumber utama oksigen terlarut di perairan adalah berasal dari: 1) aktivitas fotosintesis oleh tumbuhan air (lamun) dan fitoplankton; 2) difusi oksigen secara langsung dari udara ke dalam air melalui lapisan permukaan sehingga proses aerasi dapat berlangsung terus; 3) agitasi atau pergolakan massa air akibat adanya ombak atau gelombang; 4) aliran air/arus; dan 5) melalui air hujan. Sementara, kandungan oksigen terlarut dapat berkurang disebabkan oleh: 1) respirasi biota perairan; 2) pemakaian dalam proses dekomposisi bahan organik secara biokimia; 3) pemakaian dalam proses dekomposisi bahan anorganik secara kimia; 4) kenaikan suhu dan salinitas terutama pada daerah pasang-surut. Perubahan salinitas lebih kecil pengaruhnya bila dibandingkan dengan pengaruh suhu terhadap konsentrasi oksigen di laut (Azkab & Muchtar 1998).

Oksigen merupakan faktor penting dalam lingkungan benthik. Hampir semua sedimen laut mempunyai lapisan oksidasi pada permukaan, sedangkan bagian bawahnya merupakan lapisan anoksik dengan komposisi kimia yang berbeda. Pada lapisan sedimen yang oksik terdapat organisme meiofauna yang berlimpah, sedangkan di lapisan yang anoksik terdapat meiofauna tertentu yang dapat hidup dalam keadaan anaerob. Organisme meiofauna yang hidup di bawah kedalaman tersebut akan menghadapi kondisi yang bebas oksigen (Silence *et al.* 1993).

Ketebalan lapisan yang beroksigen bergantung pada ukuran butir sedimen, jumlah bahan organik, pengadukan air, dan metabolisme bakteri (Silence *et al.*

1993; Nybakken & Bertness 2005). Sedimen yang berukuran kasar akan teroksidasi dengan baik dan distribusi vertikal meiofauna tidak terbatas hanya pada lapisan permukaan saja, tetapi dapat mencapai kedalaman sedimen yang lebih dalam. Sebaliknya, pada lingkungan dasar yang lunak, kehadiran meiofauna dalam distribusi vertikal lebih dibatasi hanya pada lapisan permukaan (Heip *et al.* 1985; McLachlan & Turner 1994; Rodríguez 2004).

Peningkatan kedalaman sedimen, biasanya kandungan oksigen berkurang, dan lapisan sedimen yang lebih dalam dikarakteristikan oleh  $E_h$  yang rendah dan tingginya jumlah  $H_2S$ . Dalam sistem ini, tidak terdapat hewan makrofauna, tetapi genus meiofauna dan mikrofauna dapat hidup dalam jumlah besar. Tingginya kandungan bahan organik membuat sistem sulfida merupakan bagian penting dari habitat bentik. Laju reduksi sulfat distimulasi oleh rendahnya kandungan oksigen dalam sedimen (Holmer 1999). Kondisi sedimen yang anoksik dan tingginya kandungan  $H_2S$  sangat efektif mempengaruhi fauna bentik (Wetzel *et al.* 2002).

### **Bahan Organik Sedimen**

Secara umum, berdasarkan ukurannya, bahan organik terdapat dalam dua kelompok utama, yaitu: (1) bahan organik dalam bentuk partikel (*Particulate Organic Matter*, POM), dan (2) bahan organik terlarut (*Dissolved Organic Matter*, DOM). POM adalah bahan organik yang berbentuk partikel yang tertahan/tertinggal pada saringan berukuran  $0.45 \mu m$ , termasuk ke dalamnya adalah karbon organik partikel (POC), nitrogen organik partikel (PON), dan fosfat organik partikel (POP). DOM adalah bahan organik yang lolos pada saringan berukuran  $0.45 \mu m$ , yang meliputi karbon organik terlarut (DOC), nitrogen organik terlarut (DON), dan fosfat organik terlarut (DOP). Gabungan dari POM dan DOM disebut dengan Bahan Organik Total (*Total Organic Matter*, TOM) (Faganeli & Herndl 1991; Libes 1992; Millero & Sohn 1992).

Bahan organik yang disuplai ke sedimen laut berasal dari dua sumber utama, yaitu berasal dari sistem sedimen itu sendiri (*autochthonous*) dan berasal dari luar sistem sedimen (*allochthonous*) yang disuplai dari ekosistem lain. Input bahan organik ke sedimen laut dangkal yang berasal dari sistem sedimen itu sendiri (*autochthonous*) ada dua, yaitu fraksi hidup (*living fraction*) dan fraksi bukan

hidup (*non-living fraction*). Fraksi hidup, yaitu mikrofitanya bentik atau fitoplankton berperan utama dalam menghasilkan bahan organik melalui aktivitas fotosintesis. Makrofitanya, dalam bentuk makroalga atau komunitas lamun (*seagrass*) dapat membentuk sistem yang produktif untuk menghasilkan bahan organik. Fraksi bukan hidup meliputi organisme yang mati, sisa-sisa hasil metabolisme sel terluar terutama fitoplankton, zat buangan (ekskresi) zooplankton dan organisme besar lainnya, ekskresi tumbuhan, penguraian organisme perairan dan daratan, bangkai, humus, detritus dan debris, kumpulan organik dari berbagai tipe, dan partikel organik kompleks lainnya, baik dalam ukuran partikel besar, kecil maupun terlarut. Suplai bahan organik ke sedimen yang berasal dari sumber luar (*allochthonous*) adalah masukan dari daratan (*terrestrial*) melalui sungai, *run-off*, dan aktivitas manusia. Selain itu, senyawa organik yang terakumulasi ke dalam sedimen juga dapat berasal atmosfer yang ditransfer ke laut melalui hujan dan debu yang jatuh ke dalam dalam laut yang selanjutnya mengalami proses pengendapan di sedimen (Chester 1990; Buscail & Gadel 1991; Millero & Sohn 1992; Valiela 1995; Livingston 2003).

Keberadaan kandungan bahan organik berhubungan dengan ukuran partikel sedimen. Pada sedimen halus, persentase kandungan bahan organik lebih tinggi daripada sedimen yang kasar (Köster & Meyer-Reil 2001). Hal ini berhubungan dengan kondisi lingkungan yang tenang sehingga memungkinkan pengendapan sedimen lumpur yang diikuti oleh akumulasi bahan organik ke dasar perairan. Pada sedimen kasar, kandungan bahan organiknya lebih rendah, karena partikel yang halus tidak mengendap. Akumulasi dan proses pengendapan bahan organik di sedimen berhubungan dengan proses pencampuran (*mixing process*) dari partikel sedimen tersebut pada saat penenggelaman. Pada kondisi sedimen yang banyak menerima masukan bahan organik dapat menyebabkan berkurangnya stabilitas sedimen. Hal ini disebabkan oleh pertemuan antara bahan organik dengan lumpur dapat merusak matriks sedimen sehingga stabilitas sedimen berkurang (Ólafsson & Ndaró 1997; Rosa & Bemvenuti 2005).

Ketika detritus dan partikel organik terakumulasi ke dalam sedimen, nasibnya bergantung kepada laju penenggelaman dan jumlah oksigen yang tersedia dalam ruang interstisial (Valiela 1995). Pada area yang cukup konsentrasi

oksigen, bahan organik diasimilasi oleh pemakan suspensi (*suspension feeder*) dan pemakan deposit/detritus (*detritivores/deposit feeder*) atau didekomposisi oleh bakteri heterotrof aerob (dekomposer). Dekomposer merupakan makanan *deposit feeder*. Aksi detritivor penggali (misalnya, Polychaeta) mengaduk sedimen (*bioturbation*) dan membantu masuknya oksigen ke dalam sedimen. Bakteri memindahkan komponen yang lebih labil dari detritus dan sisa yang dihasilkan sukar bertambah. Banyak hasil dari perombakan bahan organik yang terlarut oleh bakteri, didifusikan ke bagian atas, dari air interstisial ke batas antara air dan sedimen (*sediment-water interface*) dan kemudian dikembalikan ke kolom air (Buscail & Gadel 1991; Killops & Killops 1993).

Bahan organik penting dalam sedimen karena pengaruhnya terhadap kehidupan di lingkungan sedimen tersebut. Senyawa organik sebagian besar terdapat dalam jaringan organisme. Bahan organik memainkan peranan yang sangat penting dalam fungsi ekosistem sebagai sumber makanan dan energi bagi organisme heterotrof, yang pada akhirnya akan berfungsi dalam resiklus nutrisi dalam ekosistem. Bahan organik sedimen merupakan sumber resiklus nutrisi untuk produktivitas kolom air bila ia didegradasi. Konsentrasi oksigen terlarut biasanya menurun ketika bahan organik didegradasi oleh bakteri aerob (Silence *et al.* 1993; Libes 1992; Valiela 1995; Holmer 1999; Rossi *et al.* 2001).

Pengkayaan bahan organik di sedimen juga dapat mengganggu struktur komunitas meiofauna. Perubahan struktur komunitas meiofauna ditandai dengan adanya perubahan pada nilai keragamannya. Penurunan nilai keragaman akan terjadi bila perairan menerima masukan bahan organik dan anorganik yang cukup tinggi. Nilai keragaman meiofauna dapat digunakan untuk mengetahui tingkat pencemaran suatu perairan (Mazzola *et al.* 1999; Mirto *et al.* 2000). Tekanan karena buangan bahan organik dan anorganik mengakibatkan terjadinya pembatasan variasi meiofauna, yang berarti hanya beberapa jenis saja yang mampu hidup pada kondisi tersebut. Pengaruh dari perubahan sedimen dan bahan kimia beracun akan menurunkan jumlah meiofauna, bahkan dapat menyebabkan hilangnya beberapa jenis meiofauna di perairan tersebut (Green & Montagna 1996; Schratzberger & Warwick 1998a; Mazzola *et al.* 1999; Mirto *et al.* 2000; Beier & Traunspurger 2001; Marinelli & Woodin 2002; Dalto *et al.* 2006).

### **Ketersediaan Makanan (Nutrisi)**

Di habitat sedimen lunak perairan dangkal, konsumen infauna benthik sering didominasi oleh organisme pemakan deposit, termasuk meiofauna, yang sebagian besar nutrisi makanannya diambil dari pengendapan bahan organik (Rossi *et al.* 2001). Bahan organik di sedimen termasuk ke dalamnya organisme hidup seperti bakteri dan mikroalga, dianggap sebagai salah satu makanannya, dan material mati pada tingkat degradasi yang berbeda (McIntyre *et al.* 1996). Organisme meiofauna pemakan detritus (detritivor) mengandalkan sumber makanannya pada tingkat trofik yang berbeda dan memainkan peranan fundamental dalam transfer energi dalam jaring makanan (Snelgrove & Butman 1994; Hentschel & Jumars 1994; Valiela 1995; Rossi *et al.* 2001).

Komposisi bahan organik berperan penting dalam mengatur kelimpahan dan biomassa meiofauna pemakan deposit (Snelgrove & Butman 1994). Di sedimen lunak perairan dangkal dikarakteristikkan oleh variasi yang kuat dari variabel fisika-kimia. Hal ini kemungkinan kuatnya variasi proses-proses penting yang mengatur populasi meiofauna pemakan deposit dari musim ke musim. Perubahan musiman jumlah individu dapat juga dipengaruhi oleh pemangsaan atau predasi (Valiela 1995), suhu dan fluktuasi ketersediaan sumber makanan (Marsh & Tenore 1990). Stabilitas populasi meiofauna bergantung pada variabel lingkungan yang mempengaruhinya. Tingkat persediaan makanan untuk siklus hidup organisme akan memiliki peranan penting terhadap stabilitas populasi organisme tersebut (Mueller & Huynh 1994).

Sejumlah besar peneliti menekankan pentingnya ketersediaan makanan dalam mengatur dinamika organisme benthik pemakan deposit (Posey *et al.* 1995; Bridges *et al.* 1994; Rossi *et al.* 2001). Nilai nutrisi bahan organik sedimen barangkali ditandai oleh perubahan musiman bahan organik sedimen tersebut. Di perairan subtropis, nilai nutrisi sedimen yang rendah sering terdapat pada akhir musim semi dan musim panas. Jumlah genus meiofauna pemakan deposit dapat berfluktuasi secara musiman dengan menurunnya sejumlah individu di akhir musim panas dan musim gugur (Marsh & Tenore 1990).

Di daerah beriklim sedang (*temperate*), selama musim panas, nilai nutrisi sedimen, dapat menjadi penting untuk mengatur dinamika organisme pemakan

deposit termasuk meiofauna; sementara selama musim dingin, organisme tersebut dapat memanfaatkan biomassa mikroalga sebagai sumber makanan penting (Marsh & Tenore 1990; Rossi *et al.* 2001). Moens dan Vincx (1996) telah memperkirakan bahwa meiofauna taksa Nematoda dapat memakan diatom sekitar 85%, hal ini menggambarkan pentingnya meiofauna memangsa mikroalga bentik. Beberapa meiofauna merupakan pemakan yang bersifat oportunistis (*opportunistic feeders*), di mana perubahan tingkah laku makan berhubungan dengan ketersediaan makanannya. Wetzel *et al.* (2002) menambahkan bahwa tutupan alga bentik yang tinggi dapat meningkatkan kelimpahan meiofauna Nematoda. Keterangan ini menekankan bahwa populasi organisme bentik memanfaatkan sumber makanan untuk pertumbuhan dan reproduksinya pada kondisi iklim yang lebih mendukung dan meningkatnya biomassa mikroalga. Ketersediaannya dapat menjadi faktor penting dalam mengatur pertumbuhan dan reproduksi meiofauna.

### **Bioturbasi**

Bioturbasi merupakan istilah yang diberikan terhadap destabilisasi substrat oleh aktivitas fauna juga dapat mengganggu keadaan di dasar. Bioturbasi (gangguan biologi) penting dalam struktur komunitas bentik laut (Rosa & Bemvenuti 2005), termasuk meiofauna. Dalam kasus lingkungan sedimen, hal ini dapat terjadi melalui aksi penggalian oleh Copepoda atau Polychaeta pemakan deposit (Lindsay & Woodin 1996). Faktor yang dapat mempengaruhi komunitas meiofauna adalah kehadiran makroinvertebrata, seperti kepiting penggali *Chasnagnathus granulata* (Dana) di habitat tersebut. Kepiting ini menggali dan mempertahankan liang yang terbuka semi permanen, dan memindahkan sejumlah besar sedimen selama proses makan sehingga terbentuk gundukan di permukaan sedimen dan memelihara liang yang terbentuk pada permukaan sedimen di sekitar galian (Hines 1991; Iribarne *et al.* 1997; Rosa & Bemvenuti 2005).

Struktur komunitas meiofauna dapat dipengaruhi oleh *C. granulata*, yang menyebabkan rendahnya kepadatan meiofauna taksa Ostracoda, Copepoda dan Turbellaria dalam gundukan sedimen pada habitat lumpur. Namun, Nematoda tidak berpengaruh dalam habitat ini. Kepiting penggali *C. granulata* adalah pemakan deposit (*deposit feeder*), tetapi tidak ada keterangan yang menyatakan

bahwa kepiting ini memangsa secara selektif organisme meiofauna. Pengaruh kepiting ini terhadap struktur komunitas meiofauna biasanya berhubungan dengan gangguan sedimen yang intensif akibat aktivitas penggalian. Gangguan kepiting yang disebabkan oleh deposisi sedimen yang berlangsung terus menerus di sekitar galian biasanya mempengaruhi populasi meiofauna seperti Copepoda dan Ostracoda di permukaan sedimen (Iribarne *et al.* 1997; Botto & Iribarne 1999; Rosa & Bemvenuti 2005).

Meiofauna taksa Copepoda dengan cepat dipengaruhi oleh terjadinya gangguan. Fauna ini merespon lebih cepat terhadap sedimen yang diganggu kembali atau kotoran yang dihasilkan oleh makrofauna (Ólafsson *et al.* 1990). Organisme ini biasanya dengan mudah berpindah, sebagai perenang yang baik dan melakukan migrasi secara aktif ke kolom air selama adanya gangguan di permukaan sedimen (Rosa & Bemvenuti 2005). Beberapa studi melaporkan bahwa Copepoda dipengaruhi oleh gangguan kepiting yang menyebabkan rendahnya kepadatan (densitas) Copepoda di sekitar galian (Warwick *et al.* 1990a; Ólafsson & Ndaro 1997). Hal yang sama dengan Copepoda, taksa Ostracoda juga dapat memperlihatkan pergerakan melalui kolom air. Kepadatan yang rendah di sekitar galian disebabkan oleh migrasi aktif Ostracoda dalam merespon adanya gangguan biologi (bioturbasi) di lapisan permukaan sedimen (Keyser 1988).

Nematoda tidak dipengaruhi oleh aktivitas penggalian kepiting, hal ini menggambarkan bahwa organisme ini dapat beradaptasi dengan baik terhadap gangguan yang disebabkan oleh kepiting (Rosa & Bemvenuti 2005). Hasil yang serupa juga dilaporkan oleh Ólafsson dan Ndaro (1997), yang mengevaluasi pengaruh dua kepiting mangrove (*Uca annulipes* dan *Dotilla fenestrata*) terhadap meiofauna melalui percobaan mikrokosme. Setelah 10 hari ditutup, dia menemukan dua Nematoda pada mikrokosme, satu di lapisan permukaan dan yang lainnya di lapisan yang lebih dalam. Namun, kepiting tidak mengubah struktur kumpulan Nematoda. Hal ini disebabkan oleh fauna Nematoda dapat beradaptasi dengan baik terhadap bioturbasi yang intensif dan tidak efektif dimakan oleh kepiting.

Beberapa studi menunjukkan bahwa permukaan sedimen yang mendapatkan gangguan biologi mempunyai sedikit atau tidak ada pengaruh terhadap Nematoda

(Ólafsson *et al.* 1990; Ólafsson & Elmgren 1991), meskipun dalam kasus lain terdapat perbedaan yang signifikan (Warwick *et al.* 1990a; Schratzberger & Warwick 1999). Warwick *et al.* (1990a) telah menguji pengaruh gangguan sedimen oleh kepiting tentara (*Myctiris platycheles*) terhadap komunitas meiobentik. Hasil pengujiannya menunjukkan bahwa gangguan tersebut tidak mempengaruhi kelimpahan total Nematoda.

Karakteristik sedimen dapat dimodifikasi oleh aktivitas mikrofitobentos, meiofauna dan makrofauna. Modifikasi sedimen dapat dikategorikan ke dalam dua kelompok, yaitu: 1) stabilisasi/deposisi sedimen oleh pengikatan, dan 2) destabilisasi/erosi sedimen oleh bioturbasi. Organisme bentik (makrofauna) dapat mengubah karakteristik sedimen dan menempatkan partikel tersebut pada batas permukaan sedimen. Ini dapat menghasilkan resuspensi sedimen yang intensif oleh gelombang dan arus. Bahan-bahan polimer ekstraseluler yang diekskresikan oleh mikroorganisme akan terikat dengan partikel-partikel sedimen. Dengan demikian, resuspensi sedimen dapat berkurang sehingga sedimen menjadi stabil (Grant *et al.* 1986, diacu dalam De Deckere *et al.* 2001). Meningkatnya bioturbasi oleh makrofauna (misalnya kepiting *Macoma balthica*) dapat meningkatkan erodibilitas (pengikisan) sedimen. Demikian pula dengan *Cerastoderma edule* yang dapat meningkatkan biodeposisi pada sedimen (De Deckere *et al.* 2001).

### **Biodeposisi**

Meiofauna interstisial dapat menghancurkan bagian-bagian bahan sedimen yang bergumpal. Organisme ini di dalam sedimen juga meninggalkan kotoran-kotoran yang membantu memperkaya bahan organik di dalam sedimen. Kotoran-kotoran yang dihasilkan oleh fauna bentik (termasuk kotoran meiofauna interstisial) yang menumpuk di sedimen, dengan cepat dikolonisasi oleh mikroorganisme (bakteri dan jamur) (McLusky & McIntyre 1988).

Meiofauna merupakan organisme yang sangat sensitif terhadap sumber kontaminasi bahan organik yang berbeda, termasuk biodeposisi ikan yang dibudidayakan dalam keramba (Mirto *et al.* 2002a, 2002b; Vezzuli *et al.* 2003; Danovaro 2006) dan kotoran yang dihasilkan oleh kepiting akan terakumulasi pada permukaan sedimen (Ólafsson & Ndaro 1997). Deposisi sedimen yang

berlangsung terus menerus ini mempengaruhi karakteristik sedimen dan fauna bentik (Iribarne *et al.* 1997; Botto & Iribarne 1999).

Biodeposisi dapat mempengaruhi keberadaan meiofauna dalam suatu habitat. Nematoda merupakan takson yang cukup melimpah dan penting penggunaannya sebagai indikator gangguan bahan organik karena mereka dapat ditemukan di semua habitat dengan kepadatan dan keragaman yang tinggi (Mirto *et al.* 2002a, 2002b; Mistri *et al.* 2002; Danovaro 2006). Fauna ini mempunyai toleransi yang tinggi terhadap kondisi lingkungan yang stress, termasuk kondisi lingkungan yang kaya bahan organik. Pengkayaan bahan organik dapat mempengaruhi struktur komunitas meiofauna yang akhirnya akan berpengaruh pada tingkat trofik lainnya (Rosa *et al.* 2001; Metcalfe 2005; Dalto *et al.* 2006).

### **Pemangsaan (Predasi)**

Faktor lain yang juga menentukan struktur komunitas, komposisi genus dan kelimpahan meiofauna adalah pemangsaan. Makroinvertebrata dan juvenil ikan mempengaruhi struktur komunitas meiofauna secara langsung oleh pemangsaan, dan secara tidak langsung oleh perubahan karakteristik fisika-kimia lingkungan sedimen (Ólafsson *et al.* 1990; Warwick *et al.* 1990a; Ólafsson & Elmgren 1991; Ólafsson & Ndaro 1997; Austen *et al.* 1998; Schratzberger & Warwick 1999; Aarnio 2000; Rosa & Bemvenuti 2005). Organisme meiofauna dapat dimangsa oleh predator, baik predator invertebrata maupun vertebrata. Kelimpahan meiofauna di sedimen lumpur menurun dengan cepat ketika juvenil ikan secara eksklusif dan selektif memangsa meiofauna yang hidup pada atau dekat permukaan sedimen (Coull *et al.* 1995; Coull 1999; Xiaoshou *et al.* 2005).

Aktivitas pemangsaan dapat menyebabkan hilangnya meiofauna dari suatu daerah yang sempit dan menyebabkan gangguan yang dapat diikuti oleh suatu rangkaian pembentukan kembali suatu koloni, hal ini menyebabkan terjadinya distribusi yang tidak merata di sedimen (Silence *et al.* 1993; Gee & Somerfield 1997; Pati *et al.* 1999; Barnes & Hughes 2004). Pemangsaan oleh ikan terhadap meiofauna penting dalam proses struktur jaring-jaring makanan dalam sistem bentik (Renaud *et al.* 1999). Selain faktor predasi, faktor kompetisi makanan dan

adanya gangguan biologi (bioturbasi) merupakan penyebab utama perubahan komunitas meiofauna (Steyaert & Schrijvers 1993).

Kehadiran predator dapat mempengaruhi meiofauna dan mungkin menyebabkan perubahan yang besar terhadap kelimpahan organisme tersebut. Kelimpahan meiofauna dekat batas antara sedimen-air meningkat bilamana tidak hadirnya predator. Struktur sedimen halus dapat menciptakan tempat berlindung bagi meiofauna dan dapat mencegah pengaruh yang kuat dari pemangsaan. Berkurangnya tekanan predasi ini menyebabkan mikrofitobentos dan stabilitas sedimen meningkat (Barnes & Hughes 2004).

### **Faktor Ekstrinsik Lingkungan**

Faktor ekstrinsik yang dimaksud di sini adalah gangguan habitat yang berasal dari luar lingkungan habitat sedimen dan menyebabkan stres bagi biota yang menempatnya. Gangguan biota dan perubahan lingkungan dapat menyebabkan stres bagi populasi yang ada di dalamnya. Namun, beberapa gangguan tidak akan menyebabkan stres, sementara yang lainnya akan berpindah dan menyebabkan pemusnahan biota. Sebagian besar faktor-faktor yang mempengaruhi sedimen, seperti gaya hidrodinamik (Hall 1994), aktivitas penangkapan (Thrush *et al.* 1995; Currie & Parry 1996) dan pengerukan (Somerfield *et al.* 1995), tetapi dapat juga termasuk gangguan sedimen oleh epibentik dan predator pelagis (Hall 1994).

Faktor sedimentasi juga dapat mempengaruhi kondisi habitat meiofauna. Kekeruhan yang disebabkan oleh sedimentasi dapat menghalangi penetrasi cahaya yang masuk ke dalam air dan mengganggu proses fotosintesis alga benthik. Akibatnya, produktivitas primer menjadi rendah dan ketersediaan oksigen di kolom air berkurang. Sedimen yang tersuspensi kembali ke kolom air dapat menyumbat permukaan alat pencernaan pemakan suspensi. Gangguan pada permukaan sedimen dapat menghambat perkembangan larva meiofauna interstisial yang menempel pada permukaan sedimen tersebut (Lindsay & Woodin 1996). Tidak stabilnya sedimen dapat menimbulkan stress dalam komunitas meiofauna. Sedimen yang diaduk kembali oleh arus yang kuat juga dapat mengubah rasio Nematoda/Copepoda (N/C) (Silence *et al.* 1993; De Troch *et al.* 2001a; Gwyther & Fairweather 2002; Arroyo *et al.* 2004).